UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

**Caracterización de la ventilación en la edificación
residencial existente. Conciliación entre calidad del aire
interior y eficiencia en la rehabilitación energética**

Tesis doctoral

Autor:

D. Sergio Rodríguez Trejo

Arquitecto

Enero 2016

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 20 .

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de 20 ,
en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:.....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

**Caracterización de la ventilación en la edificación
residencial existente. Conciliación entre calidad del aire
interior y eficiencia en la rehabilitación energética**

Tesis doctoral

Autor:

D. Sergio Rodríguez Trejo

Arquitecto

Directores:

D. Sergio Vega Sánchez

Doctor en Arquitectura

D^a Consolación Ana Acha Román

Doctora en Arquitectura

Enero 2016

“If you cannot measure it, you cannot improve it”

Sir William Thomson, Lord Kelvin

AGRADECIMIENTOS

A Verónica y a Emma, que son mi tiempo y mi sonrisa, mi destino. A mis padres Cristóbal y María y hermanas Cristina y María, que son mi origen y refugio, y sin los cuales no sería quien soy ni podría haber conseguido llegar hasta aquí. A todos mis amigos que me han acompañado en este tiempo y que me han aportado con su paciencia y criterio, apoyo para ser mejor persona. A mis directores de tesis, Sergio y Consuelo, que me han guiado durante estos años. A Sergio, que ha posibilitado el tiempo para aprender a investigar y trabajar en proyectos tan interesantes como Solar Decathlon Europe y SIREIN+. A mis compañeros y compañeras de los grupos de investigación TISE y ABIO, que me han ayudado a convertirme en un buen investigador y a mejorar día a día, en especial a Beatriz, Edwin, Joara, Letzai, Esther, Eva, Belén (Sánchez y Hernández), Almudena, Carmen, Maruxa, Olatz, Marlix, Cristina y Miguel.

A Mayte, Cristina, Lucía y Miguel Ángel, por su amistad a lo largo de los años.

A Tomás, por sus consejos y ejemplo.

A Verónica otra vez, esta, por corregirme y enseñarme siempre cosas nuevas.

A las compañeras de la oficina de proyectos europeos de la UPM, por su ayuda y en especial a Estefanía, por su amistad.

A los profesores y personal del departamento de construcción y tecnología arquitectónicas por haberme ayudado a aprender y apoyado para lograr mis objetivos, muchas veces más allá de lo meramente académico.

A los vecinos del edificio de la calle La canción del olvido en Ciudad de los Ángeles, por la ayuda y paciencia con la investigación.

ÍNDICE

1	RESUMEN	1
1.1	RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL	3
1.2	ABSTRACT	5
2	INTRODUCCIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	7
2.1	INTRODUCCIÓN	9
2.1.1	CALIDAD DEL AIRE INTERIOR Y SALUD	9
2.1.2	REPERCUSIÓN EN LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LA VENTILACIÓN Y LA CALIDAD DEL AIRE EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL	11
2.2	HIPÓTESIS	12
2.3	OBJETIVOS	12
2.4	OBJETIVO GENERAL	13
2.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	METODOLOGÍA, HERRAMIENTAS Y MEDIOS UTILIZADOS	15
3.1	METODOLOGÍA GENERAL DE LA TESIS DOCTORAL	17
3.1.1	FASE 1- CARACTERIZACIÓN	19
3.1.2	FASE 2- ANÁLISIS	19
3.1.3	FASE 3-DEFINICIÓN DE OPTIMIZACIÓN	21
3.1.4	FASE 4-CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	22
3.1.5	CORRELACIÓN DE LAS FASES DE LA METODOLOGÍA CON LOS CAPÍTULOS DE LA TESIS	22
3.2	HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS UTILIZADAS	23
3.2.1	CONTAM V3.1	24
3.2.2	ENERGYPLUS V8.1	28
3.3	MEDIOS MATERIALES	32
3.3.1	ESCENARIO DE MEDICIÓN PUNTUAL	34
3.3.2	ESCENARIO DE MEDICIÓN CONTINUA	36
4	ESTADO DE LA CUESTIÓN	43
4.1	DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A LA VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL	45
4.1.1	DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A LA VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL	47
4.2	CONCEPTO DE VENTILACIÓN	50
4.2.1	VENTILACION EN EDIFICACIÓN	50
4.2.2	TIPOS DE VENTILACIÓN	51
4.2.3	FUERZAS MOTRICES EN LA VENTILACIÓN NATURAL	52
4.2.4	MODELOS DE ESTUDIO DE LA VENTILACIÓN EN ESPACIOS INTERIORES	57
4.2.5	EDAD DEL AIRE Y EFICACIA DE VENTILACIÓN	61
4.2.6	PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AIRE HÚMEDO	66
4.2.7	PROCESOS PSICROMÉTRICOS ELEMENTALES	72
4.3	CALIDAD DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES	75
4.3.1	SINTOMATOLOGÍA RELACIONADA CON LA MALA CALIDAD DE AIRE INTERIOR	77
4.3.2	CONTAMINANTES PRESENTES EN AMBIENTES INTERIORES Y EXTERIORES	77
4.3.3	FORMALDEHÍDO (HCHO)	80
4.3.4	COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (TVOC)	81
4.3.5	EMISIVIDAD PROVENIENTE DE MATERIALES INTERIORES DE CONSTRUCCIÓN	82
4.3.6	SELECCIÓN DE CO ₂ COMO MARCADOR DE LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR	83
4.4	NORMATIVA	86

4.4.1	NORMATIVA CONCERNIENTE A VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL. UNIÓN EUROPEA	87
4.4.2	EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA EN MATERIA DE VENTILACIÓN EN MARCO REGULATORIO ESPAÑOL.....	89
4.4.3	NTE ISV 75	92
4.4.4	CTE DB HS3:2006:2009.....	93
4.4.5	UNE EN 15251:2008	95
4.4.6	COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS ESCENARIOS NORMATIVOS QUE SE CONTEMPLAN EN LA TESIS EN CUANTO A VENTILACIÓN EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL	98
4.5	INFILTRACIÓN Y PERMEABILIDAD AL AIRE DE LA EDIFICACIÓN	99
	MÉTODOS EXPERIMENTALES.	100
4.5.1	MÉTODO DE PRESURIZACIÓN O BLOWER DOOR TEST.....	100
4.5.2	MÉTODOS DE CÁLCULO NUMÉRICO Y FÍSICO.....	101
4.6	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE ESTADO DE LA CUESTIÓN	116
5	CARACTERIZACIÓN DE ASPECTOS RELEVANTES EN CUANTO A VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EN ESPAÑA.....	117
5.1	INTRODUCCIÓN	119
5.2	SELECCIÓN DE LOS PERIODOS DE RELEVANCIA PARA EL ANÁLISIS.....	120
5.2.1	EDAD MEDIA DEL PARQUE EDIFICATORIO RESIDENCIAL ESPAÑOL.....	120
5.2.2	PERIODO DESDE 1900 A 1939.	121
5.2.3	PERIODO DESDE 1939 A 1960.	122
5.2.4	PERIODO DESDE 1960 A 1979.	123
5.2.5	PERIODO DE 1979 AL AÑO 2005.	123
5.2.6	PERIODO DE 2005 A LA ACTUALIDAD.....	124
5.2.7	NORMATIVA ESPECÍFICA PARA LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA.	125
5.3	DETERMINACIÓN DE VALORES TIPOLOGICOS Y CONSTRUCTIVOS MEDIOS DE VIVIENDA EN LOS DISTINTOS PERIODOS	126
5.3.1	ASPECTOS TIPOLOGICOS DE LOS EDIFICIOS RESIDENCIALES	126
5.3.2	ZONAS CLIMÁTICAS A CONSIDERAR.....	128
5.3.3	ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y SISTEMAS EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EXISTENTE	129
5.4	SELECCIÓN DEL PERIODOS NORMATIVOS PARA EL ANÁLISIS.....	143
5.5	SELECCIÓN DEL ZONAS CLIMÁTICAS PARA EL ANÁLISIS	144
5.6	CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS.....	144
5.7	SELECCIÓN DEL EDIFICIO DEMOSTRADOR PARA EL ANÁLISIS Y LA TOMA DE DATOS EXPERIMENTAL	146
6	ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS DEFINIDOS EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL ESPAÑOLA	155
6.1	INTRODUCCIÓN	157
6.2	DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS Y VARIABLES DEL ANÁLISIS	159
6.3	DEFINICIÓN DE LOS RESULTADOS A OBTENER DEL ANÁLISIS.	171
6.4	VALIDACIÓN DE MODELO CON AYUDA DE MEDICIÓN EN EDIFICIO DEMOSTRADOR.....	173
6.5	ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR.....	179
6.5.1	PERIODO PREVIO A LA NORMATIVA. ESCENARIO PRE NTE ISV 75.....	179
6.5.2	ESCENARIO A PARTIR DE LA NORMA NTE ISV 75	183
6.5.3	ESCENARIO EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE DB HS3)	185
6.5.4	ESCENARIO A RAÍZ DE LA NORMA UNE EN 15251	190
6.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS. COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR ENTRE LOS DISTINTOS ESCENARIOS NORMATIVOS	194
6.6.1	CAUDAL DE RENOVACIÓN.....	194

6.6.2	CONCENTRACIÓN MEDIA DE CO ₂	195
6.6.3	EDAD DEL AIRE	195
6.6.4	ESTANCIAS CON MAYORES CONCENTRACIONES.....	196
6.6.5	CONCENTRACIONES DE OTROS CONTAMINANTES (HCHO Y TVOC).....	196
6.6.6	TIEMPO DE SUPERACIÓN DE UMBRALES	197
6.6.7	PORCENTAJE DE INSATISFECHOS	199
6.7	ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO	202
6.7.1	PERIODO PREVIO A LA NORMATIVA. ESCENARIO PRE NTE ISV 75.....	203
6.7.2	ESCENARIO A PARTIR DE LA NORMA NTE ISV 75	206
6.7.3	ESCENARIO EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE DB HS3)	209
6.7.4	ESCENARIO A RAÍZ DE LA NORMA UNE EN 15251	212
6.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS NORMATIVOS EN TERMINOS ENERGÉTICOS	216
6.8.1	DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A LA INFILTRACIÓN, LA VENTILACIÓN Y EL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO.....	216
6.9	CONCLUSIONES PARCIALES. COMPARACION INTEGRADA DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR Y DEMANDA ENERGÉTICA.....	218
6.9.1	PRE NTE ISV 75	219
6.9.2	NTE ISV 75	219
6.9.3	CTE DB HS3.....	220
6.9.4	ESCENARIO UNE EN 15251. PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN	222
6.10	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EXISTENTE.	224
6.11	ANALISIS DE CONDICIONES A LARGO PLAZO DE CALIDAD DEL AIRE INTERIOR.....	225
6.12	ANALISIS DE CONDICIONES PUNTUALES DE CALIDAD DEL AIRE INTERIOR.....	228
7	OPTIMIZACIÓN DE LA VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EXISTENTE	233
7.1	ESTRATEGIA GENERAL DE OPTIMIZACIÓN	235
7.2	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	236
7.2.1	MEJORA DE LA ESTANQUEIDAD DE LA ENVOLVENTE	236
7.2.2	OPCIONES DE REPARACIÓN Y MEJORA DE LA ESTANQUEIDAD DE LA VENTANA.....	237
7.2.3	SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR.....	241
7.2.4	TIPOS DE RECUPERADORES DE CALOR	244
7.2.5	ESTUDIO DE LOS RECUPERADORES DE CALOR EXISTENTES PARA LOS PROPÓSITOS DE LA OPTIMIZACIÓN.	247
7.2.6	SELECCIÓN DE RECUPERADORES DE CALOR.....	248
7.3	METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN DE INTERVENCIONES DE REHABILITACIÓN DE COSTE ÓPTIMO (COST OPTIMAL METHODOLOGY).....	250
7.3.1	APLICACIÓN A LA SOLUCIÓN DE OPTIMIZACIÓN EN LA VENTILACIÓN.....	251
7.4	DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN OPTIMIZADA	253
7.4.1	PRESUPUESTO DEL SISTEMA	254
7.4.2	OPTIMIZACIÓN DE HORARIO. HORARIO DE UTILIZACIÓN DE RECUPERACIÓN DE CALOR	255
7.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS ENERGÉTICOS	257
7.5.1	PRE NTE ISV 75	259
7.5.2	NTE ISV 75	259
7.5.3	CTE DB HS3.....	260

7.5.4	UNE EN 15251	261
7.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CON OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR	261
7.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS DE OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS DE CALIDAD AMBIENTAL Y DEMANDA ENERGÉTICA	267
7.8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS DE COSTE ÓPTIMO	268
8	CONCLUSIONES DE LA TESIS DOCTORAL	277
8.1	CONCLUSIONES DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN	279
8.2	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE CARACTERIZACIÓN.....	280
8.2.1	CONCLUSIONES SOBRE LOS ESCENARIOS A CONSIDERAR.....	280
8.2.2	CONCLUSIONES SOBRE EL BLOQUE DE REFERENCIA.....	281
8.2.3	CONCLUSIONES SOBRE EL EDIFICIO DEMOSTRADOR.....	282
8.3	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE ANÁLISIS.....	283
8.3.1	CONCLUSIONES DE VALIDACIÓN DE MODELOS CON DATOS DE MONITORIZACIÓN.....	283
8.3.2	CONCLUSIONES EN CUANTO A CALIDAD DEL AIRE INTERIOR	284
8.3.3	CONCLUSIONES EN CUANTO A DEMANDA ENERGÉTICA	285
8.3.4	CONCLUSIONES EN CUANTO A COMPARACION INTEGRADA DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR Y DEMANDA ENERGÉTICA	287
8.3.5	CONCLUSIONES EN CUANTO A MEDICIÓN EXPERIMENTAL	289
8.4	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE OPTIMIZACIÓN.....	290
8.4.1	CONCLUSIONES EN CUANTO A LA REDUCCIÓN DE DEMANDA ENERGÉTICA.....	290
8.4.2	CONCLUSIONES EN CUANTO A LA CALIDAD DEL AIRE.....	291
8.4.3	CONCLUSIONES EN CUANTO A LA AMORTIZACIÓN ECONÓMICA	292
8.5	CONCLUSIONES PARTICULARES.....	293
8.6	CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS DOCTORAL. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS	296
8.7	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	298
8.7.1	DIFUSIÓN DE INVESTIGACIÓN	298
9	BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS.....	301
9.1	NORMATIVAS.....	303
9.2	TESIS DOCTORALES	304
9.3	LIBROS, MONOGRAFIAS PROYECTOS E INFORMES	305
9.4	ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y REFERENCIAS WEB.....	308

1 RESUMEN

1.1 RESUMEN DE LA TESIS DOCTORAL

La edificación residencial existente en España y en Europa se encuentra abocada a una rehabilitación profunda para cumplir los objetivos marcados en la estrategia europea para el año 2050. Estos, para el sector de la edificación, se proponen una reducción del 90% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a niveles del año 1990. Este plan a largo plazo establece hitos intermedios de control, con objetivos parciales para el año 2020 y 2030. El objetivo último es aprovechar el potencial de reducción de demanda energética del sector de la edificación, del cual la edificación residencial supone el 85% en España.

Dentro de estos requerimientos, de reducción de demanda energética en la edificación, la ventilación en la edificación residencial se convierte en uno de los retos a resolver por su vinculación directa a la salud y el confort de los ocupantes de la misma, y al mismo tiempo su relación proporcional con la demanda energética que presenta el edificio asociada al acondicionamiento térmico. Gran parte de las pérdidas térmicas de la edificación residencial se producen por el aire de renovación y la infiltración de aire a través de la envolvente.

La directiva europea de eficiencia energética de la edificación (EPBD), que establece las directrices necesarias para alcanzar los objetivos de este sector en cuanto a emisiones de CO₂ y gases de efecto invernadero (GEI), contempla la ventilación con aire limpio como un requisito fundamental a tener en cuenta de cara a las nuevas construcciones y a la rehabilitación energética de los edificios existentes.

El síndrome del edificio enfermo, un conjunto de molestias y síntomas asociados a la baja calidad del aire de edificios no residenciales que surgió a raíz de la crisis del petróleo de 1973, tuvo su origen en una ventilación deficiente y una renovación del aire interior insuficiente de estos edificios, producto del intento de ahorro en la factura energética.

Teniendo en cuenta que, de media, pasamos un 58% de nuestro tiempo en las viviendas, es fundamental cuidar la calidad del aire interior y no empeorarla aplicando medidas de “eficiencia energética” con efectos no esperados. Para conseguir esto es fundamental conocer en profundidad cómo se produce la ventilación en la edificación en bloque en España en sus aspectos de calidad del aire interior y demanda energética asociada a la ventilación.

El objetivo de esta tesis es establecer una metodología de caracterización y de optimización de las necesidades de ventilación para los espacios residenciales existentes en España que aúne el doble objetivo de garantizar la calidad ambiental y reducir la demanda energética de los mismos.

La caracterización del parque edificatorio residencial español en cuanto a ventilación es concluyente: La vivienda en España se distribuye principalmente en tres periodos en los que se encuentran más del 80% del total de las viviendas construidas. El periodo anterior a las normas básicas de la edificación (NBE), de 1960 a 1980, el periodo desde 1980 al año 2005, con el mayor número total de viviendas construidas, guiado por la NTE ISV 75, y el periodo correspondiente a la edificación construida a partir del Código Técnico de la Edificación, en 2006, cuyo documento básico de condiciones de salubridad (DB HS3) es la primera norma de obligado cumplimiento en diseño y dimensionamiento de ventilación residencial en España.

La selección de un modelo de bloque de viviendas de referencia, un valor medio y representativo, seleccionado de entre estos periodos, pero con cualidades que se extienden más allá de uno de ellos, nos permite realizar un **intensivo análisis comparativo de las condiciones de calidad de aire interior y la demanda energética del mismo**, aplicando las distintas configuraciones que presenta la ventilación en viviendas dependiendo del escenario o época constructiva (o normativa) en que esta fuera construida. Este análisis se lleva a cabo apoyándose en un doble enfoque: el modelado numérico de simulaciones y el análisis de datos experimentales, para comprobar y afinar los modelos y observar la situación real de las viviendas en estos dos aspectos.

Gracias a las conclusiones del análisis previo, se define una estrategia de optimización de la ventilación basada fundamentalmente en dos medidas:

- 1) La introducción de un sistema de extracción mecánica y recuperación de calor que permita reducir la demanda energética debida a la renovación del aire y a la vez diluir los contaminantes interiores más eficazmente para mejorar, de esta forma, la calidad del ambiente interior.
- 2) La racionalización del horario de utilización de estos sistemas, no malgastando la energía en periodos de no ocupación, permitiendo una leve ventilación de fondo, debida a la infiltración, que no incida en pérdidas energéticas cuantiosas.

A esta optimización, además de aplicar la metodología de análisis previo, en cuanto a demanda energética y calidad del aire, se aplica una valoración económica integradora y comparativa basada en el reglamento delegado EU244/2012 de coste óptimo (*Cost Optimal Methodology*).

Los resultados principales de esta tesis son:

- Un diagnóstico de la calidad del aire interior de la edificación residencial en España y su demanda energética asociada, imprescindible para lograr una rehabilitación energética profunda garantizando la calidad del aire interior.
- Un indicador de la relación directa entre calidad de aire y demanda energética, para evaluar la adecuación de los sistemas de ventilación, respecto de las nuevas normativas de eficiencia energética y ventilación.
- Una estrategia de optimización, que ofrece una alternativa de intervención, y la aplicación de un método de valoración que permite evaluar la amortización comparada de la instalación de los sistemas.

1.2 ABSTRACT

The housing building stock already built in Spain and Europe faces a deep renovation in the present and near future to accomplish with the objectives agreed in the European strategy for 2050. These objectives, for the building sector, are set in a 90% of Green House Gases (GHG) reduction compared to levels in 1990. This long-term plan has set milestones to control the correct advance of achievement in 2020 and 2030. The main objective is to take advantage of the great potential to reduce energy demand from the building sector, in which housing represents 85% share in Spain.

Among this reduction on building energy demand requirements, ventilation of dwellings becomes one of the challenges to solve as it's directly connected to the indoor air quality (IAQ) and comfort conditions for the users, as well as proportional to the building energy demand on thermal conditioning. A big share of thermal losses in housing is caused by air renovation and infiltration through the envelope leaks.

The European Directive on Building energy performance (EPBD), establishes the roots needed to reach the building sector objectives in terms of CO₂ and GHG emissions. This directive sets the ventilation and renovation with clean air of the new and existing buildings as a fundamental requirement.

The Sick Building Syndrome (SBS), an aggregation of symptoms and annoys associated to low air quality in non residential buildings, appeared as common after the 1973 oil crisis. It is originated in defective ventilation systems and deficient air renovation rates, as a consequence of trying to lower the energy bill.

Accounting that we spend 58% of our time in dwellings, it becomes crucial to look after the indoor air quality and focus in not worsening it by applying "energy efficient" measures, with not expected side effects. To do so, it is primary to research in deep how the ventilation takes place in the housing blocks in Spain, in the aspects related to IAQ and ventilation energy demand.

This thesis main objective is to establish a characterization and optimization methodology regarding the ventilation needs for existing housing in Spain, considering the twofold objective of guaranteeing the air quality as reducing the energy demand.

The characterization of the existing housing building stock in Spain regarding ventilation is conclusive. More of 80% of the housing stock is distributed in 3 main periods: before the implementation of the firsts regulations on building comfort conditions (*Normas Básicas de la Edificación*), from 1960 to 1980; the period after the first recommendations on ventilation (NTE ISV 75) for housing were set, around 1980 until 2005 and; the period corresponding to the housing built after the existing mandatory regulation in terms of indoor sanity conditions and ventilation (Spanish Building Code, DB HS3) was set, in 2006.

Selecting a representative blueprint of a housing block in Spain, which has medium characteristics not just within the 3 periods mention, but which qualities extent beyond the 3 of them, allows the next step, analyzing. This comparative and intense analyzing phase is focused on the air indoor conditions and the related energy demand, applying different configurations to the ventilation systems according to the different constructive or regulation period in which the building is built.

This analysis is also twofold: 1) Numerical modeling with computer simulations and 2) experimental data collection from existing housing in real conditions to check and refine the models to be tested.

Thanks to the analyzing phase conclusions, an optimization strategy on the ventilation of the housing stock is set, based on two actions to take:

- 1) To introduce a mechanical exhaust and intake ventilation system with heat recovery that allows reducing energy demand, as improves the capacity of the system to dilute the pollutant load. This way, the environmental quality is improved.
- 2) To optimize the schedule of the system use, avoids waste of energy in no occupancy periods, relying ventilation during this time in a light infiltration ventilation, intended not to become large and not causing extra energy losses.

Apart from applying the previous analyzing methodology to the optimization strategy, regarding energy demand and air quality, a ROI valorization is performed, based on the cost optimal methodology (delegated regulation EU244/2012).

The main results from the thesis are:

- To obtain a through diagnose regarding air quality and energy demand for the existing housing stock in Spain, unavoidable to reach a energy deep retrofitting scheme with no air quality worsening.
- To obtain a marker to relate air quality and energy demand and evaluate adequateness of ventilation systems, for the new regulations to come.
- To establish an optimization strategy to improve both air quality and energy demand, applying a compared valorization methodology to obtain the Return On Investment (ROI).

2 INTRODUCCIÓN, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1 INTRODUCCIÓN

La presente tesis doctoral profundiza en el conocimiento de la ventilación en edificios residenciales existentes en España. Debido al escaso estudio que esta temática ha tenido en España hasta el pasado reciente, se convierte en un campo de estudio con oportunidad de mejora, teniendo en cuenta la necesidad existente en la edificación nueva y existente, de cambios profundos, enfocados a mejorar la eficiencia energética y reducir sustancialmente las emisiones de gases de efecto invernadero en la edificación residencial.

2.1.1 CALIDAD DEL AIRE INTERIOR Y SALUD

La ventilación de los espacios interiores construidos es un requisito básico para la salud y el bienestar humanos. Desde finales del siglo XIX ha sido objeto de estudio, pero solo a partir de las últimas décadas del siglo XX se ha prestado mayor atención científica y sistemática al estudio y análisis de los mecanismos y fuerzas que condicionan su correcto funcionamiento. Esta necesidad de ampliar el conocimiento en esta temática se debe por un lado a sus consecuencias directas sobre la salud y el confort de los usuarios en los distintos ámbitos edificatorios. Al mismo tiempo, la incidencia que la ventilación tiene en la demanda energética de la edificación ha condicionado la preocupación por optimizar el funcionamiento de estos sistemas. **El acondicionamiento térmico y de filtrado que requiere el aire de renovación supone en muchos casos el 50% de las pérdidas de energía térmica en las viviendas.**

El desarrollo de las sociedades occidentales ha conducido a cambios fundamentales en los hábitos de vida y en el consumo de las personas. Como parte de estos cambios, nos encontramos con que el habitante o usuario medio pasa, según estadísticas recientes, del 85 al 90% de su tiempo en espacios interiores y hasta un 58% del tiempo en las viviendas. **La calidad ambiental de estos espacios interiores, y más aún en el ámbito residencial, se convierte en un requisito fundamental que mejorar y optimizar.**

Estadística de hábitos de conducta en habitantes de la OCDE. % de tiempo en espacios interiores y exteriores.

ECA on Air Quality. Report 22. 2000

Estadística de hábitos de conducta en habitantes de la OCDE. % de tiempo en espacios interiores residenciales.

Brasche y Bishof, 2014

La calidad del aire se evalúa conforme a la concentración de sustancias químicas y biológicas que se encuentran en él. Para estas sustancias, conocidas comúnmente como contaminantes, se establecen recomendaciones en cuanto a concentración (parámetros límite de corto o largo plazo, conocidos por su acrónimo en inglés, *STEL* y *TLV*) que no habrán de superarse. Los límites o

umbrales de estos compuestos se establecen con el objetivo de garantizar una buena de calidad del aire, tanto en los entornos urbanos (contaminación atmosférica), donde son superados cada vez con más frecuencia, como en la atmósfera interior, con una incidencia directa en la calidad del aire que respiramos la mayor parte de nuestro tiempo. En términos generales, los límites que se establecen en cuanto a la mayor parte de los contaminantes domésticos están orientados a garantizar el confort de los ocupantes, pues la percepción sensorial de estos produce un efecto de disconfort que varía según la tolerancia y características del sujeto.

Pero las consecuencias de exposición a ciertos compuestos, ya sea por exposición acumulada o por la alta toxicidad de ciertos contaminantes, producen efectos sensibles y, en muchos casos, duraderos, en la salud de las personas. Tanto es así que **en el momento actual, la contaminación atmosférica y doméstica representan la primera causa de morbilidad a nivel mundial, como causa independiente, según la Organización Mundial de la Salud (OMS).**

En las viviendas y oficinas nos encontramos con múltiples compuestos que en concentraciones habituales pueden ser molestos en cuanto a confort, pero **en concentraciones elevadas o durante un tiempo prolongado, producen una serie de síntomas en las vías respiratorias y mucosas así como jaquecas, conocidos como *síndrome del edificio enfermo*.**

Este conjunto de síntomas se ha relacionado con la mala calidad del aire interior, bien por falta de mantenimiento de los equipos de impulsión y distribución de aire o por la aplicación de un caudal de ventilación insuficiente. Las consecuencias de la mala calidad del aire no afectan únicamente a la salud de los ocupantes. Según Fisk, en un análisis sobre la repercusión de los edificios “enfermos” en la economía de Estados Unidos de América, **el coste asociado a la falta de productividad y el absentismo debidos a la mala calidad de aire interior en estos edificios supera en gran medida los ahorros producidos por la reducción de consumo energético en ventilación y climatización del aire por la utilización de caudales de renovación reducidos o por no mantener adecuadamente los equipos.**

Existen varios métodos para reducir la concentración de contaminantes, incluyendo el filtrado y la absorción química, pero los más sencillos y viables son: **la utilización de materiales con baja emisividad en los acabados interiores y el mobiliario; y por supuesto, el aumento de caudal de renovación de aire interior para diluir los contaminantes.**

Es por ello que **la ventilación de espacios interiores**, según la norma UNE EN 15665:2009, que define las prestaciones de los sistemas de ventilación residencial, **establece los siguientes objetivos:**

1. *La dilución y/o retirada de los contaminantes de fondo (CO₂ metabólico, vapor de agua (H₂O), compuestos orgánicos volátiles (TVOCs), formaldehído (HCHO), Amoniac (NH₃)..)*
2. *La dilución y/o retirada de contaminantes específicos de fuentes locales (Materia particulada, olores...)*
3. *La provisión de aire exterior para los ocupantes.*
4. *La provisión de control sobre los efectos de la temperatura (sobrecalentamiento y corrientes de aire)*
5. *La provisión de aire para los aparatos de combustión.*

2.1.2 REPERCUSIÓN EN LA DEMANDA ENERGÉTICA DE LA VENTILACIÓN Y LA CALIDAD DEL AIRE EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL

Desde el año 2002 con la Directiva 2002/91/EC, que regula el comportamiento energético de los edificios, se establece la EPBD o *Energy Performance of Buildings Directive*. En esta directiva la Unión Europea establece como objetivo prioritario reducir el consumo energético y en particular el asociado a la edificación para lo cual ha desarrollado una serie de normativas que los países miembros han de implementar y desarrollar a nivel estatal. Estas culminan con la Directiva 2010/31/UE *recast (texto refundido)* y la Directiva 2012/27/UE de eficiencia energética. **Los objetivos son ambiciosos: reducir de un 85% a un 90% las emisiones de gases de efecto invernadero respecto a 1990 para el año 2050.** Para el año 2020, la planificación estratégica de la UE establece 3 objetivos particulares a cumplir por los países miembros, llamado objetivo 20-20-20:

- Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero un 20% con respecto a niveles de 1990 (un 14% respecto a los del año 2005).
- Cubrir un 20% de la demanda energética interior de la Unión con energías de fuentes renovables.
- Reducir un 20% el consumo energético de la Unión.

Se han actualizado estos objetivos parciales a cumplir para el año 2030, ajustándolos al desarrollo actual de los y mismos y concretándose en: 40% de reducción de emisiones de GEI con respecto a niveles del año 1990, alcanzar el 27% de producción de energía a partir de fuentes de energía renovables y conseguir un 25% de menos consumo energético.

En cuanto a la edificación, en 2020 todos los edificios de nueva planta deberán aproximarse a la definición de edificios de energía casi nula (EECN) o NZEB del inglés *Net Zero Energy Buildings*. Los edificios de titularidad pública, o utilizados por la administración, deberán cumplir con este requisito en 2018. En conjunto, **las necesidades de edificación en Europa se encuentran satisfechas en un 80% por lo cual incidir sobre el parque edificatorio existente se convierte en estratégico y fundamental.** La certificación energética de la edificación, tanto nueva como existente, y las regulaciones y normativas cada vez más exigentes, son parte de una misma agenda que persigue el objetivo de avanzar hacia la reducción drástica del uso de energía en la edificación y aumentar el ratio de utilización de energías de fuentes renovables en la misma.

La edificación residencial existente ofrece, según la agenda estratégica para el año 2050, un potencial de reducción del 80% de la energía primaria consumida por este conjunto edificatorio. Todo esto, mejorando las condiciones de confort y calidad ambiental se convierte en un reto de gran dificultad. En el caso de la ventilación, la mayor parte de este parque edificatorio, posee sistemas de ventilación natural con un control escaso sobre las condiciones de calidad del aire y la eficiencia energética y sistemas de extracción poco eficientes. Es por tanto **de vital importancia garantizar que la rehabilitación energética de los edificios residenciales se realice sin menoscabar o reducir la calidad de aire interior, más aún, mejorándola.**

El gobierno ha expresado **«la necesidad de una rehabilitación profunda del parque edificatorio para cumplir los objetivos de eficiencia y demanda energética».** (Estrategia a largo plazo para la rehabilitación energética en el sector de la edificación en España. En desarrollo del artículo 4 de la directiva 2012/27/UE, Ministerio de Fomento, año 2014)

Dentro de esta rehabilitación «*profunda del parque edificatorio*» hay que contemplar la ventilación con un doble objetivo: 1- para alcanzar los objetivos de la eficiencia energética y reducción de la demanda asociada a ventilación en la edificación existente y 2- para garantizar la mejor calidad de aire interior posible, optimizando los dos objetivos conjuntamente.

Para conseguir los objetivos de reducir drásticamente la demanda energética asociada a la ventilación en edificación residencial y mejorar las condiciones de calidad de aire interior, es necesario en primer lugar, un conocimiento profundo de este parque edificatorio construido.

Es por ello que esta tesis aborda la problemática de la ventilación intentando conciliar ambas perspectivas para cumplir con los objetivos a cumplir en los próximos años, en el proceso de rehabilitación energética profunda del parque edificatorio residencial español:

- **La reducción de la demanda energética asociada a la ventilación.**
- **La mejora de la calidad del aire interior en las viviendas existentes.**

2.2 HIPÓTESIS

Considerando los antecedentes y la necesidad de la investigación, la hipótesis de partida de esta tesis establece:

Es posible mejorar de manera significativa las condiciones de calidad de aire interior en la edificación residencial existente en España y reducir la demanda energética asociada a los sistemas de acondicionamiento térmico y de ventilación.

2.3 OBJETIVOS

El planteamiento de un objetivo general y otros particulares permite contrastar y validar la hipótesis de partida, a partir de una metodología de investigación orientada al establecimiento y al análisis de los escenarios que permitan la obtención de conclusiones relacionadas con el funcionamiento de la ventilación en la edificación residencial existente en España.

2.4 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general esta tesis es «establecer una metodología de caracterización y de optimización de las necesidades de ventilación para los espacios residenciales existentes en España que aúne el doble objetivo de garantizar la calidad ambiental y reducir la demanda energética de los mismos».

2.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

La consecución del objetivo general de la tesis, se apoya en la definición de objetivos particulares que resuelvan aspectos parciales de la investigación. Estos objetivos son:

1. **Caracterizar la edificación residencial española** en los aspectos relacionados y/o con repercusión en los sistemas de ventilación y la calidad del aire interior
2. **Observar experimentalmente la calidad del aire interior real existente en el parque edificatorio residencial.**
3. **Caracterizar mediante simulaciones y medios informáticos** los distintos escenarios de calidad de aire interior y de demanda energética asociada aplicando distintas normativas coexistentes.
4. **Definir y aplicar una estrategia de optimización** de los sistemas de ventilación basada en la caracterización realizada y en las observaciones experimentales obtenidas.
5. **Valorar los resultados** de la optimización respecto a parámetros de:
 - 1) Reducción del consumo energético asociado a los sistemas de ventilación y acondicionamiento de aire.
 - 2) Repercusión en la calidad de aire.
 - 3) Amortización económica, aplicando la metodología del coste óptimo (*Cost Optimal*).

3 METODOLOGÍA, HERRAMIENTAS Y MEDIOS UTILIZADOS

El esquema metodológico utilizado para la consecución de los objetivos de la tesis y de la validación de la hipótesis de partida ha consistido en un proceso de investigación y análisis siguiendo el método científico. Se han utilizado medios materiales e informáticos para desarrollar la investigación experimental y el análisis de escenarios de simulación siguiendo parámetros de investigaciones de referencia. En este apartado se define tanto la metodología de investigación utilizada como los medios y materiales utilizados para el desarrollo de la tesis doctoral.

3.1 METODOLOGÍA GENERAL DE LA TESIS DOCTORAL

La ventilación y el modo en que se produce en la edificación residencial española existente es, actualmente, objeto de estudio. Se establecen distintas aproximaciones, que van desde el análisis meramente experimental, calculando la permeabilidad de la vivienda para caracterizar la importancia de la infiltración en la ventilación de los espacios interiores, hasta la simulación informática mediante software capaz de caracterizar el movimiento de aire y de contaminantes por el interior de la vivienda, una vez detallados las características de la envolvente y los sistemas de ventilación (admisión, distribución y extracción de aire).

En el caso de la presente tesis se opta por una aproximación intermedia, en la que se determinan mediante procesos de medición experimental distintos parámetros fundamentales para ajustar y definir con precisión el modelo informático que permita obtener datos numéricos fiables en simulación anual con datos climáticos locales de temperatura, humedad relativa, viento y contaminación exterior.

La metodología necesaria para conducir al éxito en la investigación planteada se basa en:

1) **El conocimiento de los procesos que determinan los caudales de ventilación en la edificación residencial existente y la calidad del aire** que corresponde a esta edificación, resuelto en el apartado de *Estado de la cuestión*.

2) Es también imprescindible un **análisis sistemático del tipo de edificación más extendida en España**, en aspectos como tipología en altura, número de ocupantes, tipo de construcción, infiltración... **Esta caracterización conducirá al establecimiento de un edificio y vivienda tipo representativos dentro del universo de referencia** de la edificación residencial existente en España, y es necesaria para que el análisis realizado **permita obtener conclusiones extrapolables y hasta cierto punto válidas para un porcentaje elevado de esta tipología edificatoria**.

3) Un **análisis sistemático tanto desde el punto de vista de cálculo numérico** (resuelto con la ayuda de software de simulación) **como experimental en cuanto a la toma de datos**. Este análisis, realizado para los escenarios (basados en las características de la edificación y exigencias establecidas para los distintos periodos normativos de ventilación en edificación residencial) permitirá caracterizar tanto la calidad del aire interior como la demanda energética asociada de estos escenarios.

4) **La definición de una estrategia de optimización** de la ventilación orientada al cumplimiento del doble objetivo de mejorar la calidad del aire interior y reducir la demanda energética asociada al acondicionamiento térmico y a la ventilación. Asimismo se ha desarrollado el estudio de los costes asociados al tipo de intervención propuesta y su cálculo mediante el proceso comparativo utilizado a nivel europeo para este tipo de intervenciones de rehabilitación (Cost Optimal Methodology). Se aplicarán las estrategias de optimización a los escenarios establecidos en el apartado de *Análisis* obteniendo los resultados, que confirmarán o desmentirán las hipótesis iniciales de la tesis.

5) **Se establecerán las conclusiones de la investigación**, a partir del análisis de los resultados y el proceso de investigación realizado.

En la página siguiente se describe gráficamente el proceso metodológico seguido para llevar a cabo el desarrollo de la tesis doctoral, así como la investigación desarrollada.

Fig.3.1.Esquema gráfico conceptual del proceso metodológico utilizado y orden numérico del desarrollo de la misma

3.1.1 FASE 1- CARACTERIZACIÓN

Esta fase corresponde a los puntos 1 y 2 del esquema gráfico y desarrolla el objetivo particular 1 de la tesis. En ella se pretende caracterizar de manera sistemática la edificación residencial española y establecer, de esta forma, una clasificación de partida para el análisis que sirva de base para otras tipologías. La caracterización del parque edificatorio contempla los siguientes parámetros:

- Año de construcción y escenario normativo correspondiente.
- Zonas climáticas de importancia dentro de la geografía española.
- Número de ocupantes característicos dentro de las viviendas existentes.
- Numero de alturas del edificio.
- Numero de estancias de las viviendas.
- Superficie útil de las viviendas.
- Instalaciones existentes para el acondicionamiento térmico, tanto si son colectivas como individuales.
- Sistemas de ventilación (admisión y extracción del aire de renovación) y tipo de carpintería exterior, importante para definir la infiltración y exfiltración de la envolvente y de la vivienda.

El segundo punto de la fase de caracterización tiene por objeto, una vez determinados los parámetros medios de la edificación residencial, **la selección un edificio tipo con representatividad suficiente** dentro del parque edificatorio residencial en el ámbito de la ventilación, para que el análisis y la definición de optimización sobre él (punto 3 de la fig. 3.1.) permita obtener conclusiones extrapolables y que puedan ser de aplicación directa a un mayor número de edificaciones. Este estudio se ha realizado en parte dentro del proyecto SIREIN+¹ (2011-2015), proyecto financiado en la convocatoria INNPACTO 2011 del Ministerio de Ciencia e Innovación.

3.1.2 FASE 2- ANÁLISIS

Esta fase corresponde a los puntos 4 y 5 del esquema gráfico y desarrolla los objetivos particulares 2 y 3 de la tesis. En esta fase se definen los escenarios de investigación que se van a desarrollar, una vez seleccionado el bloque de referencia. El análisis se desarrolla desde dos perspectivas: demanda energética y calidad de aire interior. Asimismo, se divide en dos aproximaciones metodológicas: 1) investigación mediante **modelización informática** y 2) **toma de datos experimentales**). Los **escenarios están relacionados con las características de los sistemas y el funcionamiento de la ventilación aplicados al bloque de referencia**. Estos escenarios corresponden a las distintas normativas en las que se ha producido la edificación residencial existente en España. Este análisis tiene por objeto describir el comportamiento de las viviendas del bloque de referencia, considerando las distintas normativas que han condicionado el diseño de las viviendas en España en distintas épocas (**PRE NTE ISV 75, NTE ISV 75, CTE DB HS3:2009**) y la norma estándar vigente a nivel europeo de condiciones del ambiente interior para el cumplimiento de la EPBD y el cálculo de la demanda energética de la edificación (**EN 15251:2007**). Se aplicarán modificaciones de las distintas variables (definidas en este capítulo) para determinar su influencia en la calidad de aire y demanda energética de la vivienda.

El proceso de análisis constará de estos distintos apartados:

¹ “SIREIN+: Sistema Integral de Rehabilitación Energética” (IPT-2011-1980-920000). Entidad financiadora: MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN dentro del programa INNPACTO 2011. Entidades participantes: SAINT GOBAIN, UPM, TECNALIA, EMVS, R7 CONSULTORES, KOMMERLING, ENERES-Fernández Molina.

1. Establecimiento de los modelos de estudio.

Tomando como referencia el bloque seleccionado se realizan modelos de simulación para estudiar la demanda energética y la calidad de aire interior y flujos de ventilación:

1. Modelización de calidad de aire interior en espacio multizonal mediante el software COMTAM v3.1
2. Modelización de comportamiento energético del edificio modelo mediante el software DesignBuilder que utiliza el motor de simulación de EnergyPlus v8.1.

En esta primera fase se tomarán como base para la simulación las condiciones de contorno existentes en el demostrador a escala real en el que se han realizado la toma de datos de monitorización continua.

2. Establecimiento de monitorización para la obtención de datos experimentales.

El proceso de monitorización de las variables de calidad ambiental seleccionadas (temperatura, humedad relativa y calidad del aire) en un demostrador a escala real permitirá un triple objetivo:

1. Contrastar las mediciones experimentales con los modelos del apartado 1.
2. Ajustar los modelos desarrollados en el punto anterior
3. Validar finalmente el modelo para efectuar el análisis numérico de manera sistemática con ayuda de los modelos ajustados.

3. Análisis numérico de los escenarios de simulación

En este punto se desarrollan la definición y el estudio de los escenarios de simulación que denominaremos *mapeado de simulación*. Se realizarán las simulaciones informáticas para la obtención de datos relacionados con la demanda energética asociada al acondicionamiento térmico, a la ventilación y a la calidad del aire de los distintos escenarios en las viviendas del bloque de referencia.

Esta fase de modelización se centrará en el comportamiento interior de las viviendas del bloque elegido, tomando siempre como referencia una de planta intermedia (ni planta baja ni última planta). En esta unidad de vivienda se efectuarán variaciones y simulaciones tomando en consideración los siguientes parámetros:

- Normativa de referencia
- Zonas climáticas para las normativas que la incluyan (CTE)
- Orientación principal del bloque de referencia modelado
- Niveles de calidad dentro de la normativa de referencia si existen (UNE EN 15251)
- Número de ocupantes.

Asimismo, se habrán definido con anterioridad:

- La emisividad de ocupantes y de materiales interiores, caracterizada en l/h de CO₂, y ppm de formaldehído y compuestos orgánicos volátiles.
- Características del sistema de ventilación y de la envolvente en cuanto a permeabilidad a la entrada del aire.

4. Mediciones experimentales

En este punto se desarrolla la toma de datos con dos objetivos:

1. **Analizar en un escenario de medición puntual** (periodos de alrededor de 1 día) la calidad ambiental real existente en viviendas construidas en distintos periodos normativos (escenarios en el análisis) respecto a los parámetros² (contaminantes de referencia) seleccionados como relevantes a la hora de determinar la calidad del aire. Estos testigos sirven como muestra indicativa de la calidad del aire interior a modo de testeo aleatorio.

Para realizar este análisis se ha realizado el siguiente proceso:

- a. Identificación de viviendas válidas para el testeo, con características similares a las que encontramos tras la fase 1 de caracterización.
 - b. Medición puntual de condiciones de calidad de aire interior (CO, CO₂, TVOCs y HCHO).
2. **Analizar en un escenario de medición continua** de calidad ambiental interior (calidad del aire) basado en la medida de la concentración de CO₂ en el salón de tres de las viviendas del bloque demostrador y el consumo de dichas viviendas durante un periodo de más de 1 año.

Para llevar a cabo el análisis se han tomado datos continuos de calidad de aire interior y consumo energético:

- a. Medición continua en periodo de referencia de invierno (año 2014) de condiciones de temperatura, humedad relativa y CO₂
- b. Medida de contadores antes y después de intervención de rehabilitación de fachada

3.1.3 FASE 3-DEFINICIÓN DE OPTIMIZACIÓN

Esta fase corresponde a los puntos 6 y 7 del esquema gráfico y desarrolla los objetivos particulares 4 y 5 de la tesis. El objetivo general de la tesis doctoral persigue «*Establecer una metodología de caracterización y de optimización de las necesidades de ventilación para los espacios residenciales existentes en España que aúne el doble objetivo de garantizar la calidad ambiental y reducir la demanda energética de los mismos*».

Hasta este punto de la metodología se han desarrollado: la caracterización de la ventilación en la edificación residencial en España, el análisis de los aspectos relacionados con la calidad del aire interior y la demanda energética asociada en el modelo de referencia, y la observación experimental de la calidad del aire en viviendas del parque residencial español.

El objetivo de esta fase es la definición de una estrategia de optimización basada en dos principios con influencia en la calidad del aire interior y la demanda energética asociada:

1. **Aumentar el caudal de renovación mediante la introducción de un sistema equilibrado individual de impulsión y extracción de aire con recuperación de calor.** El aumento de caudal de renovación mejorará la calidad del aire interior, garantizando un caudal a determinar en las estancias, independiente de la infiltración. La recuperación de calor permitirá la reducción de la demanda energética debida a la incorporación de este sistema mecánico para la ventilación.
2. **Establecer una optimización del funcionamiento de la ventilación, adaptándola al perfil de uso de una vivienda tipo.** En el periodo en que no exista ocupación se desactivará el

² AEN/CTN 100 Climatización, 2009. UNE-EN-15665. Ventilación de edificios. Determinación de los criterios de rendimiento para los sistemas de ventilación residencial. norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 15665:2009.

sistema mecánico de impulsión/extracción con recuperación de calor, reduciéndose la renovación de aire a la correspondiente a la infiltración, manteniendo un nivel mínimo de ventilación durante estos periodos, siguiendo recomendaciones de la norma UNE EN 15665:2009.

Una vez definida la estrategia, se aplicará a los escenarios de simulación numérica definidos en fase 2 de análisis, para realizar la comparación de resultados en cuanto a la calidad del aire y a la demanda energética.

Para realizar una evaluación fundamentada de la valoración de la estrategia de optimización definida, se ha desarrollado un análisis económico de la misma, según los parámetros establecidos en el Reglamento Delegado EC244/2012 conocido como **Cost Optimal methodology**³.

Por tanto, en esta fase se analiza la optimización aplicada a los distintos escenarios, obteniéndose los resultados comparados de mejora y la amortización económica de las medidas en un periodo máximo de 30 años.

3.1.4 FASE 4-CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Esta fase corresponde al punto 8 del esquema gráfico En esta fase de la investigación se elaboran y desarrollan las conclusiones finales de la tesis, y se exponen los rendimientos en cuanto a producción científica obtenidos de la investigación realizada y las futuras líneas de investigación con que se pretende dar continuidad a la actividad investigadora.

3.1.5 CORRELACIÓN DE LAS FASES DE LA METODOLOGÍA CON LOS CAPÍTULO DE LA TESIS

Las distintas fases de la metodología descritas en los puntos anteriores se desarrollan en los capítulos 4 a 8. A continuación se describe brevemente el contenido de estos capítulos:

En el capítulo 4 se realiza una síntesis sobre el estado de la cuestión, articulada en puntos relativos a los aspectos más relevantes a efectos de la tesis: energía demandada por la ventilación en la edificación residencial, concepto y terminología general de ventilación, calidad de aire interior, normativa de aplicación existente en relación con la calidad de aire interior y la eficiencia energética, y la infiltración y permeabilidad al aire de la edificación.

En el capítulo 5 se caracteriza y clasifica la edificación residencial existente en España con respecto a los aspectos tipológicos y constructivos con incidencia en la ventilación y en la calidad del aire interior, y con respecto a la normativa o regulación de aplicación respecto a la edad del parque edificatorio. De la caracterización de la edificación residencial existente se obtienen las características de un edificio de referencia tipo, con representatividad en cuanto a la manera en que se produce la ventilación en los bloques de vivienda existentes en la mayor parte del territorio del estado. Se realiza también una selección de las distintas zonas climáticas de referencia según la normativa del Código Técnico. Tanto el edificio de referencia tipo como las zonas climáticas se utilizarán en el capítulo 6 para la realización del análisis. Se ha seleccionado un bloque de viviendas

³ Parliament, E., 2012. COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements". Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:EN:PDF> , pp.18–36.

existente, que cumple con las características del edificio de referencia, como modelo para la realización del análisis y de la toma de datos experimentales a desarrollar en el capítulo 6.

En el capítulo 6 se desarrolla el análisis de la ventilación en cuanto a la calidad del aire interior y a la demanda energética asociada a la ventilación y al acondicionamiento térmico del aire. El modelo para realizar el análisis es el basado en el edificio demostrador, que cumple con las características establecidas para el edificio de referencia detallado en el capítulo 5, y permite realizar el análisis de medición experimental de datos de calidad de aire interior en edificio demostrador. Se analizan los dos aspectos mencionados, relacionándolos en un análisis integrado, de gran importancia para establecer la necesaria relación entre la calidad del aire y la demanda energética asociada. Asimismo, se realiza en este capítulo la toma de datos experimentales para el conocimiento de las condiciones reales en viviendas de referencia de las concentraciones de contaminantes interiores de interés.

En el capítulo 7 se define la estrategia de optimización, basada en: la mejora de la estanquidad al aire de la vivienda, el establecimiento de un sistema de recuperación de calor del aire de extracción en el falso techo del baño de la vivienda tipo y la definición de un horario optimizado de utilización del sistema basado en la ocupación de la vivienda. En el desarrollo del capítulo se desarrolla el análisis de la aplicación de la estrategia de optimización en los mismos escenarios establecidos para el análisis previo (capítulo 6), para establecer una comparación en los mismos términos de demanda energética, calidad de aire interior y comparación integrada de los mismos. Por último, como valoración de la aplicabilidad del sistema, se analiza en este capítulo la amortización y viabilidad económica de la intervención en los distintos escenarios contemplados. Este análisis se realiza según las instrucciones establecidas en el reglamento delegado EU244/2012 de la Unión Europea, conocido como *cost optimal methodology* (metodología de coste óptimo).

En el capítulo 8 se enumeran las conclusiones, tanto las conclusiones por capítulos específicos, como las conclusiones generales y particulares de la tesis. Para finalizar, se enumeran las futuras líneas de investigación y la difusión realizada en relación con la investigación realizada.

3.2 HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS UTILIZADAS

En el desarrollo de la tesis doctoral se ha contado con el manejo de diversas herramientas informáticas para la consecución de los objetivos de la investigación. El software que destaca dentro de los usados y el objetivo de su utilización es el siguiente:

SOFTWARE Y VERSIÓN	OBJETIVO DEL USO	FASE EN LA QUE SE HA UTILIZADO
Fluent Ltd. v6.1	Dinámica de fluidos (CFD) Comprensión del movimiento del aire dentro de la edificación	Documentación y Estado de la cuestión
CONTAM v3.1	Red de flujos de ventilación (AFN).	Análisis y Optimización
DesignBuilder (EnergyPlus v8.1)	Demanda energética de la edificación (BES)	Análisis y Optimización
Statsgraphics	Estadística y tratamiento de datos	Documentación, Estado de la cuestión y Análisis de mediciones experimentales
Microsoft Excel v2007	Cálculo numérico y tratamiento de datos	Estado de la Cuestión, Análisis y Optimización

Tabla 3.1. Índice de software utilizado en la tesis doctoral

De entre el software que hemos mencionado, utilizado en distintas fases de la investigación, procedo a explicar el más representativo, por su importancia en la obtención de los resultados y conclusiones de la tesis.

3.2.1 CONTAM V3.1

El software CONTAM es una herramienta para el análisis de movimiento del aire y el transporte de contaminantes en espacios multizonales de carácter complejo. Este software permite el desarrollo de modelos de espacio multizonal introduciendo características de envolvente, sistemas de ventilación, condiciones ambientales interiores y exteriores, horarios de ocupación, etc.

*CONTAM puede ser de utilidad para varios propósitos. Su capacidad para calcular los flujos de ventilación permite evaluar la adecuación y la variación de las renovaciones de aire interior de manera dinámica y la distribución de aire dentro del edificio, y estimar la influencia de la envolvente en la infiltración global. La predicción de concentración de contaminantes se puede emplear para estimar la calidad de aire interior (CAI) antes de su construcción u ocupación, para investigar la influencia de las decisiones en el diseño de los sistemas de ventilación y la selección de materiales, y para estimar la CAI en edificios existentes. La concentración de contaminantes predicha se puede usar para estimar la exposición individual basada en patrones de comportamiento y ocupación. La exposición individual puede compararse con diferentes situaciones y caudales de renovación de aire, así como la emisividad de las fuentes de contaminantes.*⁴

En el caso de la investigación llevada a cabo en la tesis, se han definido los escenarios siguiendo el dimensionamiento de elementos y sistemas de ventilación según las distintas normativas existentes en el parque edificatorio español (definidas en el capítulo «Estado de la cuestión») en el edificio que sirve como modelo (desarrollado en el capítulo «Caracterización»). En el mismo se definirán las simulaciones a realizar modificando los parámetros variables para la obtención de valores relacionados con la calidad de aire interior y con la renovación de aire (ACH) para su introducción como parámetro inicial en el software EnergyPlus v8.1.a través del software DesignBuilder v4.5.

La metodología de introducción del modelo que se ha seguido para la utilización del software CONTAM v3.1 ha sido la siguiente:

⁴ Walton, G.N. & Dols, W.S., 2006. NISTIR 7251 CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation,

1. Definición de las zonas del edificio (estancias de las viviendas y espacios comunes) con sus características geométricas en superficie y volumen. Estas zonas son equivalentes a las del edificio que servirá como demostrador, en el apartado de medición experimental (edificio situado en calle la Canción del Olvido 28, en el distrito de Villaverde en Madrid)

Fig.3.2. Definición de zonas en CONTAM v3.1

2. Definición de los elementos que permiten el flujo de aire entre zonas y con el exterior. Estos elementos se caracterizan por el área equivalente de infiltración, el tipo de flujo, el comportamiento o limitación por presión o por caudal y el horario de funcionamiento. En el dimensionamiento de estos elementos se definirán los elementos que producen el flujo de manera acorde a las prescripciones normativas en cada época de construcción.

Fig. 3.3. Definición de elementos de flujo en CONTAM v3.1

3. Definición de las temperaturas operativas de las zonas interiores de cara al establecimiento de las diferencias entre interior y exterior que determinan infiltración o exfiltración entre ambos espacios.

Fig.3.4. Definición de horario de temperaturas de consigna en CONTAM v3.1.

4. Definición de las fuentes de emisión de contaminantes.

Fig. 3.5. Definición de contaminantes y establecimiento de fuentes en las zonas en CONTAM v3.1

5. Definición de horarios de ocupación de fuentes de contaminantes.
6. Definición de archivo climático con base a los datos por el *US Department of Energy* (Departamento de Energía de Estados Unidos) en formato .epw para las distintas zonas climáticas establecidas en el Código Técnico de la Edificación. Estos archivos contarán con información de viento, para poder evaluar convenientemente la influencia en la renovación de aire de la infiltración en los distintos escenarios.

En el capítulo de análisis se definirán los parámetros utilizados en cada escenario. En la página siguiente se establece la metodología de simulación en cuanto a cambio de variables, describiendo como ejemplo uno de los escenarios.

Fig. 3.6. Definición de metodología de simulación con el software CONTAM v3.1

En la página anterior se realiza una aproximación gráfica al mapeado de simulaciones para uno de los escenarios. El punto de partida es el modelo realizado en el punto inicial, describiendo el edificio demostrador. El proceso establece a continuación las variables de contorno relacionadas con el escenario normativo definido. En segundo lugar se establecen las condiciones climáticas de simulación, según el archivo climático de referencia. El tercer punto consiste en la definición de la orientación del edificio para determinar la influencia de la misma en la infiltración y la ventilación en general y, en su caso (escenario UNE EN 15251), los distintos niveles de calidad del aire, establecidos según caudal de ventilación y concentración en ppm de CO₂. El siguiente paso es el establecimiento del número de ocupantes. Los objetivos que se persiguen con cada simulación pueden diferir. Para dos ocupantes el objetivo se ha establecido en la obtención de valores de renovación de aire, de concentración de CO₂ y del perfil de ocupación, para validar el modelo informático con la medición real en el edificio demostrador. Los otros objetivos van orientados a:

1. La obtención de un caudal de renovación para introducirlo como dato en la simulación energética.
2. La obtención de variables referidas a la calidad del aire interior, como son:
 - a. Concentración dinámica y en distintas estancias de CO₂
 - b. Porcentaje del tiempo por encima de 1200 ppm (concentración establecida como límite en el capítulo «Estado de la cuestión»).
 - c. Concentración dinámica y en distintas estancias de formaldehído (HCHO).
 - d. Concentración dinámica y en distintas estancias de compuestos orgánicos totales (TVOCs).
 - e. Edad del aire (AGE).
 - f. Porcentaje de insatisfechos (PPI) según ISO UNE EN 7730:2006.

3.2.2 ENERGYPLUS V8.1

El módulo EnergyPlus, utilizado a través del software DesignBuilder v4.5. es una herramienta para el análisis ambiental y de demanda energética de la edificación. Este software permite el desarrollo de modelos complejos con visualización en 3D. Introduciendo las características de la envolvente, los sistemas, las condiciones ambientales interiores y exteriores, los horarios de ocupación..., se pueden obtener resultados relacionados con el comportamiento térmico y energético del edificio, las pérdidas y ganancias de energía del edificio con el ambiente y el consumo asociado a los sistemas necesarios para mantener las condiciones de confort establecidas como consigna.

(...).Este módulo integra el motor de cálculo de EnergyPlus, que ha sido desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) y representa una de las herramientas de su tipo más avanzadas del mundo. Con el uso del módulo EnergyPlus es posible desarrollar simulaciones dinámicas avanzadas en tiempo real, empleando archivos de datos climáticos horarios, así como cálculos de dimensionamiento de los sistemas de HVAC. Puede ser usado para el análisis en modo mecánico (con sistemas HVAC) como en modo pasivo.⁵

La metodología de introducción del modelo que se ha seguido para la utilización del software EnergyPlus v8.1 a través del interface de DesignBuilder ha sido la siguiente:

1. Definición de los bloques del edificio (viviendas y espacios comunes) con sus características geométricas en superficie y volumen, así como sus divisiones interiores. Estas zonas son

⁵ DesignBuilder software, Sol-arq, Aurea consulting, 2014. Manual de ayuda DesignBuilder en español.

equivalentes a las del edificio que servirá como demostrador, en el apartado de medición experimental (edificio situado en calle la Canción del Olvido 28, en el distrito de Villaverde en Madrid)

Fig. 3.7. Definición de bloque de viviendas y zonas interiores de vivienda en modelo de edificio demostrador en designBuilder v4.5

- Definición de los elementos de la envolvente térmica (forjados, muros y ventanas) con sus características de capas, con sus transmitancias, inercia, materiales y resto de propiedades físicas. En este caso, se ha desarrollado la base de datos de características de la envolvente como parte de los trabajos realizados en el proyecto SIREIN+.

Fig. 3.8. Definición de condiciones de contorno en designBuilder v4.5

3. Además, se han descrito los horarios de uso, la actividad de los ocupantes, la infiltración en la envolvente según el cálculo realizado en CONTAM o datos climáticos y características del cálculo a realizar. Han de definirse las condiciones de temperatura y humedad relativa requerida en los espacios, para realizar el cálculo de la demanda energética requerida para garantizar estas condiciones en simulación anual. Estos parámetros serán definidos según lo establecido en el CTE y en documentos reconocidos (IDAE 2009⁶, CTE DB HE1 2013, apéndice C⁷).

Fig. 3.9. Definición de perfiles de actividad y funcionamiento de sistemas en DesignBuilder v4.5

4. En el capítulo «Análisis», se definirán los parámetros utilizados en cada escenario. En la página siguiente se establece la metodología de simulación en cuanto a cambio de variables, describiendo como ejemplo uno de los escenarios.

⁶ AICIA-Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de ingenieros industriales de Sevilla, 2009. Condiciones de aceptación de procedimientos alternativos a LIDER y CALENER.

⁷ Código Técnico de la Edificación, Documento básico HE ahorro de energía, 2013, pp.1–70. Disponible en: <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/>.

EnergyPlus8.1. mapeado de simulaciones

Fig. 3.10. Definición de metodología de simulación en DesignBuilder v4.5 con motor de cálculo EnergyPlus v8.1

5. En la página anterior se realiza una aproximación gráfica al mapeado de simulaciones para uno de los escenarios. El punto de partida es el modelo realizado en el punto inicial, describiendo el edificio demostrador. El proceso establece a continuación las variables de contorno relacionadas con el escenario normativo definido. En segundo lugar se establecen las condiciones climáticas de simulación, según el archivo climático de referencia. El tercer punto consiste en la definición de la orientación del edificio para determinar la influencia de la misma en la infiltración y en la ventilación en general. Asimismo, en el escenario correspondiente a la normativa UNE EN 15251 se realizará el término comparativo respecto a los niveles de calidad establecidos en la misma (ver «Estado de la cuestión»). El siguiente paso es el establecimiento del número de ocupantes. Los objetivos que se persiguen con cada simulación pueden diferir. Para dos ocupantes el objetivo se ha establecido en la validación de los consumos a través de la obtención de lectura del contador de gas de las viviendas monitorizadas en el edificio demostrador que sirve como base para el modelo de simulación desarrollado. Los otros objetivos van orientados a:
 1. La obtención de demanda asociada al acondicionamiento térmico en cada vivienda
 2. La obtención de demanda asociada a la infiltración y a la ventilación.
 3. Obtención de valores globales de demanda energética del edificio y las variaciones con respecto a las variables establecidas.

3.3 MEDIOS MATERIALES

En la determinación de las medidas experimentales se han realizado dos estrategias de medida de datos experimentales con los objetivos de:

1. **Analizar en un escenario de medición puntual** (periodos de alrededor de 1 día) la calidad ambiental real existente en viviendas construidas en distintos periodos normativos (escenarios en el análisis) respecto a los parámetros⁸ (contaminantes de referencia) seleccionados como relevantes a la hora de determinar la calidad del aire. Estos testigos sirven como muestra indicativa de la calidad del aire interior a modo de testeo aleatorio. Para realizar este análisis se ha realizado el siguiente proceso:
 - a. Identificación de viviendas válidas para el testeo, con características similares a las que encontramos tras la fase 1 de caracterización.
 - b. Medición puntual de condiciones de calidad de aire interior (CO, CO₂, TVOCs y HCHO).
2. **Analizar en un escenario de medición continua** de calidad ambiental interior (calidad del aire) basado en la medida de la concentración de CO₂ en el salón de tres de las viviendas del bloque demostrador y el consumo de dichas viviendas durante un periodo de más de 1 año. Para llevar a cabo el análisis se han tomado datos continuos de calidad de aire interior y de consumo energético:
 - a. Medición continua en periodo de referencia de invierno (año 2014) de condiciones de temperatura, humedad relativa y CO₂.
 - b. Medida de contadores antes y después de intervención de rehabilitación de fachada.

⁸ AEN/CTN 100 Climatización, 2009. UNE-EN-15665. Ventilación de edificios. Determinación de los criterios de rendimiento para los sistemas de ventilación residencial. norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 15665:2009.

Fig.3.11.11. Definición de metodología de medición experimental de datos de calidad de aire y consumo energético

3.3.1 ESCENARIO DE MEDICIÓN PUNTUAL

La medición puntual de la calidad del aire interior se ha realizado usando distintos testigos al azar, siguiendo los mismos procedimientos con el objetivo de obtener datos que, aun no siendo representativos para la totalidad, ni para las distintas localizaciones, si pueden ofrecer una valoración cualitativa de la frecuencia y la medida con la que se superan los umbrales límite de exposición a corto plazo (*STEL*⁹) en el interior de las viviendas edificadas en distinta época (asociada a la aplicación de una de las distintas normativas en materia de ventilación definidas en el capítulo «Estado de la cuestión»).

Para realizar estas mediciones se han establecido protocolos para hacer equiparables las medidas:

1. La medida se realizará en el salón de la vivienda.
2. El periodo mínimo de medida será de 1 hora, y el máximo de 24 horas.
3. El equipo se instalará en un lugar ventilado del salón, en la zona de respiración del mismo, aunque el equipo de medición posee de un micro ventilador para facilitar la circulación del aire.
4. Se anotarán el número de ocupantes y las variaciones relevantes en cuanto a calidad del aire o incremento o disminución de caudal de ventilación.

3.3.1.1 INSTRUMENTACIÓN

Wireless IAQ Profile Monitor

El módulo de medición *IAQ Profile Monitor* de PPM Technologies Ltd. es un equipo multisensor con capacidad de transmisión inalámbrica orientado a dar un diagnóstico rápido y visual de la calidad de aire en los edificios. Con el objetivo de determinar los niveles de ciertos contaminantes relacionados con el *síndrome del edificio enfermo* (SEE), se sitúa una red de sensores (*Zigbee Sensor Mesh*) cuyos datos son gestionados y visualizados desde una estación base. El monitor permite al usuario el control y la visualización de distintas unidades de la red. En el caso de esta investigación, se ha contado con un único equipo, para la determinación de la calidad del aire en ciertas estancias, pero de manera independiente, sin poder evaluar la interacción y transmisión de distintos contaminantes de una estancia a otra, lo que hubiera sido otro aspecto destacable para otra investigación, que se dejará para futuras líneas a desarrollar.

Fig. 3.12. Unidad de medición multisensor inalámbrica "Wireless IAQ Profile Monitor" de PPM Technologies Ltd. y configuración de red de sensores inalámbricos.

⁹ del inglés *Short Term Exposure Limit*

Las especificaciones técnicas de la unidad de medida son las siguientes:

Alimentación	12v DC a través de conexión a corriente alterna con adaptador DC- cable de 2.5mm de diámetro
Condiciones de funcionamiento	0-30°C, 15-90%RH
Dimensiones	240mm x 240mm x 55mm (hasta 7 sensores)
Instalación	Conexión a la unidad principal vía conexión Zigbee wireless y de esta al resto de unidades
Software	Software propio facilitado por la compañía Windows XP Professional Edition o Windows 7 Professional Edition
Toma de datos	Puede gestionar hasta 7 valores por minuto

Tabla 3.2. Características técnicas de la unidad de medición multisensor Wireless IAQ Profile Monitor.

Cada unidad de IAQ Profile Monitor puede alojar hasta 7 sensores. Los sensores que puede alojar son los siguientes:

Contaminante o parámetro medido	Tipo de sensor	Rango de medición	Instalado en medición de la presente tesis
Formaldehído(HCHO)	Electroquímico	0-10 ppm 0-12.3 mg/m ³	Sí
Glutaraldehído	Electroquímico	0-10 ppm	No
Temperatura	CMOSens	-40 /125°C	Sí
Humedad	CMOSens	0-100%	Sí
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	Electroquímico	0-5 ppm	No
Monóxido de Carbono (CO)	Electroquímico	0-100 ppm	Sí
Dióxido de Carbono (CO₂)	NDIR	0-2000 ppm	Sí
Dióxido de Azufre (SO₂)	Electroquímico	0-5 ppm	No
Compuestos Orgánicos Volátiles Totales (TVOCs)	PID	0-16 ppm 0-36,8 mg/m ³ 0-0,052 kg/kg	Sí
Metano (CH₄)	Infrared	0-100%	No
Amoníaco (NH₃)	Electroquímico	0-100 ppm	No
Ozono (O₃)	Electroquímico	0-1 ppm	No
Sulfuro de Hidrógeno(H₂S)	Electroquímico	0-50 ppm	No
Detector de humos	Óptico		No

Tabla. 3.3. Listado de sensores disponibles para la unidad "Wireless IAQ Profile Monitor" de PPM Technologies Ltd.

En la tabla 3.3. se han destacado los sensores que se han instalado para conducir la investigación experimental.

3.3.1.2 IMPORTANCIA DE LA CALIBRACIÓN

La importancia de la calibración en el uso de células de medida electroquímicas se debe a que su vida útil está limitada por la intensidad de la actividad de los electrodos de medición de gas. Esta actividad

se reduce gradualmente en el tiempo y así la sensibilidad del sensor (la cantidad de corriente generada por ppm de gas) se reduce gradualmente. Si el instrumento de medida se calibra regularmente esta reducción se puede compensar ajustando la medida de corriente por ppm.

Si el sensor no se calibra, la vida útil del sensor se agotará y la medida no será fiable: la sensibilidad del sensor se reducirá sensiblemente, haciendo inútiles su medida y las señales de alarma por superación de umbrales límite de detección de sustancias peligrosas. En la medición en el caso de estudio, las concentraciones de las sustancias testeadas pueden ser peligrosas si se detecta que los niveles superan frecuentemente el umbral límite de exposición corto plazo (STEL). En el desarrollo de la investigación realizada en la presente tesis, se han contemplado los tiempos de calibración, contando con todos los equipos de medición y sensores calibrados adecuadamente, y comprobados de manera manual in situ con contraste de las medidas. Los equipos de medición continua se han instalado por técnicos del grupo de robótica de la ETSIT en la UPM, garantizando su adecuación; y la medición de la calidad del aire cuenta con la calibración de fábrica del fabricante PPM Technologies LTD.

3.3.1.3 FIABILIDAD DE LOS SENSORES

La fiabilidad de los sensores queda garantizada por el fabricante al $\pm 25\%$ ¹⁰¹¹ según las medidas efectuadas y publicadas en los siguientes artículos:

- Balmat J.L. & Meadows, G.W. (1985) Monitoring of Formaldehyde in air. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 46 (10) 578-584
- Brooksbank A.M. & Roberts, L. (2005) Performance characterization of the Formaldemeter-hvt. PPM Technology 050405/RD/A.
- Coyne, L.B. Cook, R.E., Mann, J.R., Bouyoucos, S., McDonald, O.F. & Baldwin, C.L. (1985) Formaldehyde: A comparative evaluation of four monitoring methods. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 46 (10) 609-619
- Hewson J.C., Conway, G.B & Ward, P.S. (1985) Client Report on the PPM Formaldemeter MKII. Shirley Institute 21/13/1626

3.3.2 ESCENARIO DE MEDICIÓN CONTINUA

La medición continua de la calidad del aire interior se ha realizado en tres testigos (3 viviendas), siguiendo los mismos parámetros, con el objetivo de obtener datos comparables en cuanto a la concentración de CO₂. Esta medición, aun realizándose únicamente en una de las estancias de la vivienda (la que a priori parece que pudiera ser la que concentra el mayor número de periodos de superación de umbrales máximos), debido a la mayor densidad a priori de personas presentes en periodos representativos según la normativa (CTE)¹² y a que al tratarse, en principio, de la estancia con un horario más cambiante, permite observar con mayor claridad el comportamiento del usuario en la vivienda (en los dormitorios se producen horarios por lo general más fácilmente establecidos). La medición se produce en el edificio de referencia y se persiguen dos objetivos fundamentales:

1. La determinación de la validez de los modelos informáticos realizados con el software CONTAM v3.1 para la realización de los análisis posteriores. Se necesita un cierto grado de

¹⁰ Deborah V.L. Myers, Ph.D, E.I. et al., 2009. Short-term monitoring of formaldehyde : comparison of two direct-reading instruments to a laboratory-based method. Report no: EPHB 331-05b. U.S. Department of Health and Human Services Public Health Service. Centers for Disease Control and Prevention. National Institute for Occupational safety and Health (NIOSH).

¹¹ PPM Technologies Ltd., 2011. A summary of several Formaldemeter performance studies. , 46(10), pp.1-5.

¹² En el Código Técnico de la Edificación, DB HS3 se determina la presencia en el salón del número total de habitantes de cara al dimensionamiento de la ventilación en esta estancia.

fiabilidad en cuanto al número de periodos por encima de la concentración máxima de referencia establecida a nivel europeo de cara al cálculo de la demanda energética asociada a la ventilación y a los sistemas que garantizan la calidad ambiental interior.

2. Determinación de la situación en periodo de medición prolongado, para obtener datos relevantes en cuanto a la calidad del aire interior real en viviendas edificado en un periodo determinado (pre-normativo) dentro de un edificio representativo seleccionado como estándar dentro del parque edificatorio residencial español. Los datos han de ser considerados relevantes dentro de las condiciones de contorno que se establecerán en el apartado siguiente.

Para realizar estas mediciones se han establecido protocolos para hacer equiparables las medidas:

1. La medida se realizará en el salón de la vivienda.
2. El periodo continuo de medición será del 23 de enero al 27 de mayo de 2014.
3. El equipo se instalará en un lugar ventilado del salón, en la zona de respiración del mismo, aunque el equipo de medición posee de un micro ventilador para facilitar la circulación del aire.
4. El número de ocupantes y sus características: De 1 a 2 personas, mayores de 80 años, hombre y mujer en dos de las viviendas, un hombre y la persona que se hace cargo de su cuidado durante el día en el tercer caso de estudio.

3.3.2.1 MONITORIZACIÓN

El objetivo principal de la monitorización es caracterizar la calidad ambiental interior de las viviendas para evaluar la influencia que el nuevo aislamiento tiene en ella. Por esa razón, se plantea el seguimiento de los siguientes parámetros:

- Temperatura de aire exterior, en °C.
- Temperatura de aire interior, en °C.
- Humedad relativa de aire interior, en %.
- Contenido de CO₂ de aire interior, en ppm.
- Temperatura superficial en la cámara de aire, en °C.
- Temperatura superficial en la cara interior del paramento de fachada, en °C.

La ubicación de los sensores planteada en cada una de las tres viviendas monitorizadas es la siguiente:

Fig. 3.13. Disposición de los sistemas de monitorización en dos de las viviendas del demostrador experimental.(7º

derecha e izquierda)

Esta propuesta permite recoger datos de calidad de aire, temperatura operativa y humedad relativa del interior de cada vivienda, así como de las temperaturas superficiales en los paramentos en cada una de las cuatro orientaciones.

El periodo de toma de datos se ha desarrollado siguiendo el siguiente calendario:

CALENDARIO DE MONITORIZACIÓN													
enero-14							febrero-14						
L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D
		1	2	3	4	5						1	2
6	7	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7	8	9
13	14	15	16	17	18	19	10	11	12	13	14	15	16
20	21	22	23	24	25	26	17	18	19	20	21	22	23
27	28	29	30	31			24	25	26	27	28		
marzo-14							abril-14						
L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D
3	4	5	6	7	8	9		1	2	3	4	5	6
10	11	12	13	14	15	16	7	8	9	10	11	12	13
17	18	19	20	21	22	23	14	15	16	17	18	19	20
24	25	26	27	28	29	30	21	22	23	24	25	26	27
31							28	29	30				
mayo-14								Montaje-desmontaje sistemas					
L	M	X	J	V	S	D		Fase de ajuste de sistemas					
			1	2	5	6		Fase de monitorización					
5	6	7	8	9	12	13		Entrega de encuesta a los vecinos					
12	13	14	15	16	19	20		Recogida de datos de monitorización					
19	20	21	22	23	26	27		Entrevistas con los vecinos					
26	27	28	29	30				Lectura de contadores					

La toma de datos forma parte de un plan de experimentación en el que se ha realizado el aislamiento de la cámara interior entre las hojas de ladrillo de fachada, mediante inyección de borra de lana de vidrio, para evaluar la mejora del comportamiento térmico de la fachada y la reducción de demanda mediante medidas de bajo coste. El calendario de la experimentación propiamente dicha, en cuanto al proceso de inyección cuenta con: toma de datos de consumo desde el año previo a la intervención al año posterior, encuesta a los vecinos sobre satisfacción con la intervención realizada y la percepción de variación en consumo y en la calidad ambiental.

3.3.2.2 INSTRUMENTACIÓN

La instrumentación que se ha utilizado en el desarrollo de esta medición y en la toma de datos ha constado de los elementos definidos a continuación:

Termopar

Se trata de un cable de par paralelo de hilo sólido de 0.5mm de diámetro aislado individualmente y en conjunto con Teflón®. Se recomienda su uso en diversas aplicaciones y en especial para refrigeración, donde se requiere pasar el cable a través de puertas selladas. El objetivo de este cable es el de medir los cambios de temperatura, transformándolos en corriente eléctrica. En nuestro caso se ha utilizado el sensor para medir la temperatura superficial del paramento en las distintas orientaciones y la temperatura en la cámara sin ventilar del cerramiento. No es de mayor importancia para la determinación de los parámetros de calidad ambiental, pero sí para los objetivos

que se perseguían en el proyecto SIREIN+, de evaluar la mejora del cerramiento en cuanto a transmitancia térmica tras la inyección de aislamiento térmico de borra de lana de vidrio.

Fig. 3.14. Sensor de temperatura, tipo termopar.

Termo higrómetro con sensor de CO₂

La medida de los parámetros de temperatura ambiente, de la humedad relativa y de la concentración de CO₂ se ha realizado mediante la instalación de un sensor integrado tipo SCR de Schneider Electric. Las características de medición de este sensor son:

Parámetro	Unidad de medida	Intervalo de medición	Precisión (en condiciones de 20 °C y 101,3 kPa)
Temperatura	°C	10 a 35 °C	±0,5 °C
Humedad relativa	%	0 a 95%	±2%
Concentración de CO ₂	ppm	0 a 2000 ppm	±2%

Tabla 3.4. Características técnicas del sensor SCR de Schneider Electric

Fig. 3.15. Sensor de temperatura, humedad relativa y CO₂ tipo SCR. Schneider Electric

Sensor exterior de temperatura y humedad relativa

Este tipo de sensor, de la casa comercial TREND, ha sido utilizado para medir los parámetros de temperatura ambiente y humedad relativa del exterior. Siempre que es posible, es mejor obtener datos locales a la hora de llevar a cabo un experimento. En todo caso, se han tenido en cuenta y contrastado con datos meteorológicos y climáticos de las estaciones disponibles en AEMET y una estación de medida gestionada por el grupo ABIO de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid. Las características de medición de este sensor figuran en la tabla 3.5.

Parámetro	Unidad de medida	Intervalo de medición	Precisión (en condiciones de 20 °C y 101,3 kPa)
Temperatura	°C	-35 a 55 °C	±1,0 °C
Humedad relativa	%	0 a 100%	±10%

Tabla 3.5. Características técnicas de sensor HT/O de TREND

Fig. 3.16 Sensor exterior de temperatura y humedad relativa HT/O. TREND

Módulo de adquisición de datos

La obtención de datos se ha realizado mediante la instalación de un cuadro exterior en el rellano de las escaleras, que contiene el panel de adquisición de datos de toda la instalación de monitorización. El esquema de distribución y funcionamiento se muestra a continuación:

Fig. 3.17. Esquema de elementos y conexionado de la monitorización realizada en el edificio demostrador.

Leyenda y descripción de elementos

1. (BREAKER). Interruptor de corriente conectado a red de corriente alterna a 220V a 50Hz.
2. (24 V y 12 V). Adaptadores de corriente alterna a corriente continua a 24V y 12V .
3. (THERM). Tarjeta de termopares. Cada tarjeta tiene una capacidad de conexión de 3 termopares.
 - 8 canales
 - Bornas:
 - - Hilo blanco del termopar
 - + Hilo marrón de termopar
4. (RTD). Tarjeta de termistores. Cada tarjeta tiene una capacidad de conexión de 2 termistores (medición de temperatura y humedad relativa)
 - 4 canales
 - Bornas:
 - - 0V

	<ul style="list-style-type: none"> ○ N terminal de medida de la resistencia ○ P terminal de medida de la resistencia ○ + 24V
5.	<p>(ANALOG). Tarjeta analógica de adquisición de datos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 6 canales • Bornas: <ul style="list-style-type: none"> ○ - 0V ○ S entrada de datos ○ + 24 V • Tarjeta para la conexión de sensores con salida en tensión o corriente. • Sensores tipo anemómetro, fotómetro, piranómetro, HR, CO₂, etc.
6.	<p>TJMON. Tarjeta de adquisición y gestión de datos desarrollada por la Universidad Politécnica de Madrid desarrollada por el grupo de robótica y sistemas de control de la UPM.</p> <p>Es la unidad principal de CPU del cuadro, y controla la hora y el funcionamiento de adquisición del resto de sensores y módulos.</p>

Tabla 3.6. Leyenda y descripción de elementos

Fig.3.18. Definición de esquema de medición experimental de datos de calidad de aire en medición continua

4 ESTADO DE LA CUESTIÓN

En la presente tesis se tratan campos de conocimiento muy amplios desde una perspectiva concreta. Por ello, en el estado de la cuestión se han estudiado específicamente los aspectos relacionados con los objetivos de esta, y desde la perspectiva de los mismos. Como parte del desarrollo del estado de la cuestión se incluyen los apartados referentes a la energía demandada por la edificación residencial, la ventilación en edificación residencial, la calidad del aire en ambientes interiores y especialmente en edificación residencial, y aspectos relacionados con las mismas, como son la infiltración y permeabilidad de la envolvente en edificación, la normativa relacionada con estos tres aspectos principales y los contaminantes presentes en los espacios interiores residenciales, y estrategias para reducir su concentración.

4.1 DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A LA VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL

Teniendo en cuenta que la mayor parte de los edificios necesarios hasta 2030 ya están construidos en Europa [BPIE, 2011]¹³, la rehabilitación energética se convierte necesariamente en el camino para conseguir los objetivos marcados por las directivas europeas, en el campo de la eficiencia energética de la edificación. La Unión Europea afirma que el mayor potencial de reducción de demanda energética para cumplir los objetivos manifestados en la hoja de ruta para los años 2020, 2030 y 2050 se encuentra en los edificios (Energy Efficiency Plan, 2011)¹⁴. Como datos relevantes en cuanto a la capacidad de reducción de demanda, se ha fijado, como escenario mínimo para el año 2020, una reducción del consumo del sector de la edificación de entre 60 y 80 Mtoe/año (UE, 2002)¹⁵.

Fig.4.1. Tipología edificatoria en UE. 2011.
Fuente: BPIE. 2011

Fig.4.2. Tipología edificatoria en España. 2011.
Fuente: BPIE. 2011

Según la DG Energy (Dirección General para la Energía de la Comisión Europea) y Eurostat (Agencia Europea de Estadística), en 2014 las viviendas representaron un 26% del total de uso final de energía en la UE (Unión Europea), siendo, tras el transporte, el sector con mayor demanda energética. En España, el uso final de energía por sectores varía con respecto al conjunto de la Unión Europea, representando las viviendas el 19% del total (fig. 4.4.). Este porcentaje ha ido en aumento desde el año 2000, habiéndose estabilizado la tendencia solo en los años de la crisis, a partir de 2009 (fig. 2.1.) (informe SECH SPAHOUSEC, IDAE 2011¹⁶, Proyecto Odyssee 2012¹⁷). La vivienda en Europa necesita aumentar su eficiencia y reducir su demanda energética drásticamente. Desde el año 2000 en Europa, de media, la demanda eléctrica de las viviendas se ha reducido debido a las medidas de eficiencia energética adoptadas en seguimiento de las directivas de eficiencia energética (Directiva 2002/91/EC¹⁸, Directiva 2010/31/EU¹⁹, Directiva 2012/27/EU²⁰). En España, el consumo medio de

¹³ Economidou, M. et al., 2011. "Europe's buildings under the microscope",

¹⁴ Energy Efficiency Plan 2011, Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social Committee and the committee of the regions, European Commission, 2011.

¹⁵ Summary of the impact assessment accompanying document to the proposal for a recast of the energy performance of buildings directive (2002/91/EC).

¹⁶ Informe Proyecto SECH-SPAHOUSEC. IDAE. 2011.

¹⁷ Proyecto Odyssee. Key performance indicators. Proyecto Odyssee/Mure. <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/online-indicators.html>

¹⁸ Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of building

¹⁹ Directiva de eficiencia energética en los edificios" (2010/31/EU)

²⁰ Directiva de eficiencia energética (2012/27/EU)

energía por vivienda para usos térmicos es de $129 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ en vivienda unifamiliar y $96 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ en vivienda en bloque, (IDAE 2011, WWF 2010²¹).

Fig. 4.3. Evolución de la demanda energética en Tep (Toe, tonelada equivalente de petróleo) por vivienda en España y la media en Europa. <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/online-indicators.html>

Los edificios residenciales en la Unión suponen el 75% del total de edificios, representando aproximadamente un consumo energético anual de 80 Mtoe/año según el informe Odyssee (EU, 2005)²² correspondiendo al resto de la edificación un porcentaje de consumo de 35 Mtoe/año. Del total de edificios residenciales en Europa, el 70% son de tipología unifamiliar y el 30% en vivienda en bloque (fig. 1.2.), con distintas características con respecto a demanda energética. En España, sin embargo, este porcentaje es totalmente diferente: el 66% de las viviendas corresponden a edificios multifamiliares (viviendas en bloque), mientras que tan solo el 34% corresponde a vivienda unifamiliar (fig.1.2.). También varía el consumo energético correspondiente a vivienda en España con respecto a la UE (Fig.2.). En la edificación residencial, en España, la demanda requerida para calefacción es de casi el 50%, variando en función de la zona climática en que se localice. En el informe SECH SPAHOUSEC realizado por el Instituto para la Diversificación y el Ahorro Energético (IDAE), finalizado en el año 2011, se especifican por zonas (mediterránea, zona de meseta y zona atlántica) los usos energéticos y de vivienda tipo respecto a: vivienda en bloque o unifamiliar, número de ocupantes por vivienda, tipo de energía utilizada para acondicionamiento térmico, nivel socioeconómico del grupo familiar, etc. La demanda energética de viviendas en bloque para calefacción es el 32% del total mientras que en global el aire acondicionado supone tan solo un 1%, salvo en las zonas climáticas con severidad climática de verano. El porcentaje total para usos térmicos en este tipo de vivienda representa un 60%. El porcentaje para viviendas unifamiliares representa el 49% para calefacción, el 2% para refrigeración y 70% para usos térmicos.

²¹ Nucete, E. et al, 2010. Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO2 del parque residencial existente en España en 2020. WWF España

²² Eichhammer, W. et al, 2010. Financing the Energy Efficient transformation of the Building Sector in the EU. Lessons from the ODYSSEE-MURE project.

Uso final de la energía por sectores.
España 2013

Fig.4.4. Uso de energía final en España por sectores.2012. Fuente: DG Energy. EC. 2014

Viviendas en bloque. Uso de energía primaria.
España 2013

Fig. 4.5. Uso de energía primaria en edificación residencial en bloque en España.2011. Fuente: IDAE proyecto SECH SPAHOUSEC Informe final. 2011

4.1.1 DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A LA VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL

Como parte de los sistemas que demandan energía en la vivienda se encuentran los correspondientes a acondicionamiento térmico del aire y ventilación (2010/31/EU). Según Orme, la demanda correspondiente a estos sistemas dentro de la edificación corresponde a tres aspectos fundamentales:

1. La demanda energética derivada del acondicionamiento del aire dentro de la edificación, incluyendo la energía térmica debida a la renovación del aire interior.
2. La conducción y transmitancia a través de la envolvente térmica del edificio.
3. La debida a la eficiencia energética de los sistemas utilizados para dicho acondicionamiento térmico del aire y ventilación así como las pérdidas por funcionamiento de los mismos.

Parte de la energía requerida en la edificación se destina a acondicionar el aire interior para que sea apto para el consumo de los ocupantes y los usos que se le vayan a dar. Dentro de las pérdidas térmicas que se producen en la edificación, aproximadamente el 45% se deben a la ventilación y renovación de aire interior, el 41% a pérdidas por conducción y el 14% a refrigeración, tal y como se observa en la figura bajo estas líneas (Orme et al, 2000)²³.

²³ M. Orme, Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures, Energy and Buildings 33 (3) (2001) 199–205.

En cuanto a la ventilación en edificación residencial, la mayor parte de la misma en España no utiliza sistemas de ventilación que demanden energía (sistemas de impulsión o extracción mecánica), utilizando la mayor parte de las mismas medios naturales (facilitados por la permeabilidad de la envolvente, la presión del viento y la diferencia entre condiciones interiores y exteriores)(Sherman et al., 1998)²⁴ para garantizar la renovación del aire requerida. Sin embargo, las pérdidas de energía térmica producidas por este sistema de ventilación natural dificultan las posibilidades de optimización de las pérdidas de energía debidas a la renovación del aire del interior, debido a la dependencia de las condiciones exteriores.

Según M. Orme, miembro del *Air Infiltration and Ventilation Centre* (AIVC) el acondicionamiento térmico de la edificación residencial supone de un 30% a un 55% de la demanda energética anual en edificación residencial, dependiendo de la severidad climática del invierno. Esta afirmación concuerda con las estimaciones del ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers), que estima que la renovación de aire exterior representa de un 20% a un 50% de las cargas térmicas del edificio en los países desarrollados. (ASHRAE Fundamentals. 2009)²⁵.

Los factores que más influyen en la demanda energética de la ventilación residencial según las fuentes citadas, entre otras, son:

- **Permeabilidad al aire de la envolvente**

Las condiciones de la envolvente en cuanto a las juntas constructivas, holguras entre sistemas y elementos condicionan la estanquidad al aire del edificio y posibilitan la entrada de aire de manera no intencional en la edificación. Según diversas fuentes (INIVE 2011)²⁶, la infiltración de aire por la envolvente produce pérdidas térmicas en la edificación de aproximadamente un 10% del total²⁷. De la misma forma, en términos de eficiencia de medidas para reducir la demanda energética en edificios residenciales, el aumento de la impermeabilidad al aire de la envolvente supone una mayor capacidad de reducción de demanda en calefacción en comparación con el aumento del aislamiento térmico de la envolvente.

- **Sistema de ventilación (natural, híbrida, mecánica con extracción de aire, equilibrada, con recuperación de calor.)**

La repercusión del sistema de ventilación y el tipo de energía utilizada para su funcionamiento es grande. Así, según el proyecto ASIEPI (ASessment and Improvement of the EPBD Impact for new buildings and building renovation)²⁸, los diferentes sistemas de ventilación pueden afectar de manera significativa a la eficiencia energética de los mismos y

²⁴ Sherman, M.H. & Dickerhoff, D.J., 1998. Airtightness of U.S. dwellings. ASHRAE Transactions, 104, pp.1359–1367.

²⁵ Ashrae, 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-34248378404&partnerID=tZOtx3y1>.

²⁶ Eeig, I., 2010. Stimulating increased energy efficiency and better building ventilation,

²⁷ Guyot G., Carrié F.R, Schild P., ASIEPI Project : Stimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD, Final technical report, 50 p.,<http://www.asiepi.eu/wp-5-airtightness/available-reports.html>

²⁸ ASIEPI, 2010. The final recommendations of the ASIEPI project: How to make EPB-regulations more effective? , (March 2010), p.121.

a la calidad del aire. (Holsteijn, V., 2012.)²⁹. En la fig.4.6. se muestra la repercusión en la energía primaria en edificación residencial en bloque de: las pérdidas por infiltración (*infiltration heat*), el calor destinado al aire de renovación (*ventilation heat*) y la electricidad de los sistemas mecánicos (*electricity*). Se puede observar la reducción de demanda debida a infiltración con la incorporación de sistemas de extracción (mecánicos e híbridos), lo que conlleva un aumento de energía eléctrica mientras la energía primaria asociada a la calefacción del aire de renovación continúa invariable, desde la situación de ventilación natural. La incorporación de un sistema equilibrado de extracción e impulsión con recuperación de calor mantiene las pérdidas por infiltración, y aumenta la demanda de electricidad de los sistemas mecánicos, pero reduce en gran medida la demanda de energía primaria de la calefacción del aire de renovación.

Fig. 4.6. Energía primaria asociada a ventilación, infiltración y sistemas eléctricos respecto a distintos sistemas de ventilación en edificación residencial: natural (natural), con extracción mecánica (exhaust) y sistema equilibrado con recuperación de calor (balanced HR). (Holsteijn, V., 2012)

- **Renovaciones/hora realizadas**

De manera intuitiva se puede comprender que a mayor número de renovaciones de aire a temperatura fuera de rango de confort, se producirá una mayor demanda energética asociada a los sistemas de acondicionamiento térmico y ventilación. Del mismo modo, si el aire exterior es fresco (tiene bajos niveles de concentración de contaminantes), la calidad del aire interior mejorará según aumente el caudal de renovación. La inclusión de filtros para la introducción y limpieza del aire exterior también repercuten en la calidad del aire interior positivamente, pero también en la demanda energética asociada, por la caída de presión que supone la introducción de dichos filtros en el sistema.

- **Ocupación**

El número de ocupantes produce un doble efecto sobre la demanda energética de la ventilación en edificación. Por un lado, supone una ganancia térmica debido al metabolismo

²⁹ Holsteijn, V., 2012. Final Report Task 3 User Requirements , Infrastructure Ventilation Systems. , pp.1–88.

de los ocupantes, que aportan calor al espacio interior. Por otro lado, las necesidades de salubridad del aire respirado aumentan cuanto mayor es el número de ocupantes. Esto es debido, por un lado, a las necesidades por respiración y, por otro lado, al aumento de bioefluentes que desprenden dichos ocupantes, que elevan significativamente las necesidades de renovación por hora de aire interior. Las normativas existentes consideran para el cálculo de necesidad de renovación de aire en espacios interiores la ocupación para la mayoría de tipologías edificatorias (tipos de uso), y suele ser, en muchas de ellas, la que determina el caudal final mínimo de ventilación exigido en edificación residencial.

4.2 CONCEPTO DE VENTILACIÓN

4.2.1 VENTILACION EN EDIFICACIÓN

La ventilación consiste en la renovación del aire de un recinto, mediante el suministro de aire limpio, y la eliminación del aire viciado, a fin de mejorar la calidad del aire interior. Con ella se pretende retener, eliminar y diluir los contaminantes emitidos en el interior a fin de conseguir un nivel de calidad aceptable y deseado.

Esta necesidad de aire de renovación, obtenido del exterior, deriva consecuentemente en un consumo energético para acondicionarlo. Es en este punto donde se desarrollará la optimización, para determinar qué factores pueden mejorar y conciliar al tiempo el objetivo de reducir la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico y ventilación en edificación residencial, y mejorar sensiblemente la calidad ambiental de estos espacios interiores.

Las normativas y modelos de ventilación existentes en los países europeos parten del supuesto de que los ocupantes de un espacio cerrado son los contaminadores principales o exclusivos, siendo únicamente a partir de las últimas regulaciones, como son las normativas utilizadas desde el año 2007 (EN 15251:2007, UNE 171300-1:2009), cuando se incluyen los contaminantes de fuente interior (materiales y mobiliario en su mayoría) como causantes principales de la contaminación ambiental del interior, cuyos componentes químicos hay que diluir de igual manera que los producidos por los ocupantes.

A partir de recientes estudios se ha podido comprobar que los materiales de un edificio son a menudo fuente de contaminantes de gran importancia, tanto o más que los propios ocupantes.

Es necesario, para hacer una estimación de los requisitos de ventilación de los edificios, considerar la carga total de contaminantes, incluyendo en ellos la causada por los materiales de la edificación, los ocupantes y sus actividades. Las directrices no definen o cuantifican la cantidad dada para conseguir este objetivo, como hacen las normativas.

Más adelante se cuantificarán según diferentes normativas o escalas de referencia el nivel de renovación y calidad de aire determinadas, con el objetivo de definir una línea racional común entre distintas y determinadas cantidades.

La calidad del aire exterior disponible, así como la eficacia de la ventilación del recinto ventilado, son aspectos a tener en cuenta. El índice de ventilación necesaria para proporcionar la calidad de aire interior seleccionada se puede calcular tomando como base todas las fuentes contaminantes presentes, la calidad del aire exterior disponible y la eficacia de la ventilación del recinto ventilado.

Los índices necesarios para garantizar la salud y el confort suelen ser distintos, aplicándose siempre el mayor de ellos.

4.2.2 TIPOS DE VENTILACIÓN

Según el aspecto que estemos considerando respecto a la ventilación, obtendremos una clasificación u otra. Así, si estamos considerando la calidad de la mezcla de aire o eficacia de la ventilación, los tipos serán³⁰:

4.2.2.1 VENTILACIÓN POR DESPLAZAMIENTO:

En este tipo de ventilación existe una zona de impulsión del aire y una zona de extracción y entre ambas fluye el aire con una mínima mezcla con el previamente existente en el recinto. La eficiencia de este tipo de ventilación es la máxima, pudiendo, en ocasiones, ser superior a la unidad. Fig. 5

Fig. 4.7. Esquema de ventilación por desplazamiento. http://www.engineeringtoolbox.com/ventilation-efficiency-d_124.html

4.2.2.2 VENTILACIÓN POR MEZCLA:

En este tipo de ventilación, la zona de impulsión está generalmente por encima de la zona ocupada. Las mejores condiciones se alcanzan cuando la mezcla es tan perfecta que las dos zonas se transforman en una. La eficacia de ventilación puede incluso alcanzar la unidad.

Fig. 4.8. Esquema de ventilación por mezcla. http://www.engineeringtoolbox.com/ventilation-efficiency-d_124.html

4.2.2.3 CORTOCIRCUITO O BYPASS:

Es la carencia de una ventilación adecuada motivada más que por una insuficiencia de caudal de aire, por la existencia de zonas muertas o zonas a las que el aire limpio de ventilación accede de un modo deficiente. Se trata de uno de los problemas más frecuentes, motivado por una inadecuada

³⁰ VAQUERO DE LA HOZ, Mar.T., 2011. CALIDAD del AIRE INTERIOR (IAQ) en las EDIFICACIONES HOSPITALARIAS. Tesis doctoral.

localización de los puntos de impulsión y retorno de aire respecto las zonas ocupadas, o por la incorporación de tabiques, mobiliario o mamparas, no previstos en un principio, en el recorrido original del flujo de aire. El modelo de cortocircuito es el que más se aproxima cuando se da una ventilación de un área con impulsión y retorno en la parte superior de cerramientos enfrentados, en la que se han incorporado posteriormente obstáculos.

Fig. 4.9. Esquema de ventilación por bypass o cortocircuito. http://www.engineeringtoolbox.com/ventilation-efficiency-d_124.html

4.2.2.4 VENTILACIÓN POR PISTÓN:

Este tipo de ventilación es aplicada en espacios con unos requerimientos elevados de ventilación. En ellos se requiere una limpieza total del aire sin dejar zonas muertas, tales como quirófanos y laboratorios. El sistema es de elevada eficacia (mayor que 1) y la edad del aire se reduce al mínimo, pero requiere una ratio de renovación de aire elevada, con el consiguiente consumo energético asociado.

Fig. 4.10. Esquema de ventilación por pistón. http://www.engineeringtoolbox.com/ventilation-efficiency-d_124.html

4.2.3 FUERZAS MOTRICES EN LA VENTILACIÓN NATURAL

En principio, si consideramos las fuerzas en conjunto, podríamos diferenciar entre ventilación natural o forzada. Esta clasificación está sobradamente desarrollada en la literatura estudiada (ver clasificación en Neila, J. Bedoya. C, 1994)³¹. En esta clasificación se desarrollan tres niveles (la clasificación base, la genérica y la sistemática), según si la ventilación se establece únicamente por medios naturales o mecánicos, según el tipo de tiro, de aberturas, de extracción y de impulsión... La clasificación realizada y sus elementos se sintetizan en la tabla 1, bajo estas líneas:

³¹ Neila J, Bedoya C.1994. Técnicas arquitectónicas y constructivas de Acondicionamiento ambiental. Ed. Munilla-Lería

Clasificación base	Clasificación genérica	Clasificación sistemática
Natural	Tiro natural	Patio
		Patinillo
		Conducto vertical individual
		Conducto vertical colectivo
		Chimenea de hogar abierto
		Chimenea de hogar cerrado
	Hueco en cerramiento	Infiltraciones
		Hueco de ventana
		Ventana aireada
		Rejilla de aireación
		Conducto horizontal
		Hueco en cubierta
		Aireador en cubierta
		Cerramiento de lamas
	Natural forzada	Chimenea de aire inducido
		Chimenea térmica solar
		Dispositivo de recalentamiento en fachada
		Chimenea rotacional de succión
	Condicionada	Ventilación por servidumbre
	Movimiento natural de aire	Cuerpo calefactor
Forzada	Por depresión	Extracción directa
		Conducto horizontal de extracción forzada
		Conducto vertical de extracción forzada
	Por sobrepresión	Impulsión directa
		Impulsión directa acondicionada
		Impulsión indirecta acondicionada
		Conducto de impulsión forzada
	Equilibrada	Conducto de corto recorrido
		Impulsor-extractor
	Movimiento forzado de aire	Ventilador
		Acondicionamiento interno
		Campana de recirculación
	Natural-mecánica	Higroregulable
		Conducto vertical con extractor en boca
		Conducto vertical con extractor en remate
		Conducto horizontal

Tabla 4.1. Clasificación base, genérica y sistemática de los sistemas de ventilación en edificación.
Neila y Bedoya, 1994

Considerando la fuerza motriz que posibilita la introducción y salida del aire del interior de la edificación, la clasificación será la siguiente³²:

4.2.3.1 VENTILACIÓN POR EFECTO BERNOULLI O EFECTO CHIMENEA;

En este tipo de ventilación, la diferencia de presiones entre el interior y el espacio exterior (normalmente a menor altura y con menor densidad debido a la diferencia de temperatura por la existencia de un conducto vertical de extracción), así como la velocidad del aire en el exterior en el punto de desembocadura del conducto de extracción provoca la fuerza necesaria para extraer el aire interior y producir una depresión interior que permita la introducción del aire a través de las aberturas y ventanas. Se rige por la fórmula bajo estas líneas:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = cte$$

Donde:

- V Velocidad del fluido en la sección considerada.
- ρ Densidad del fluido.
- P Presión a lo largo de la línea de corriente.
- g Aceleración gravitatoria.
- z Altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

Fig. 4.11. Esquema de diferencia de presiones que inducen la ventilación por efecto chimenea en la vivienda. Awbi 2010.

En la fig. 4.11. se observa el cambio de presión debido a la diferente temperatura y densidad entre: 1) el interior y el exterior y 2) la zona en el nivel superior y la zona en el nivel inferior. La diferencia de presión provoca una fuerza motriz que va en una dirección u otra dependiendo de las distintas condiciones existentes entre el interior y el exterior. En condiciones de invierno (temperatura interior sensiblemente mayor que en el exterior), la entrada de aire se produce en el nivel inferior en condiciones normales con presión mayor en el interior que en el exterior. En cambio el aire tiende a salir en condiciones normales desde el nivel superior (a temperatura mayor y presión menor en el interior que en el exterior).

4.2.3.2 VENTILACIÓN POR PRESIÓN INDUCIDA DE VIENTO

Las corrientes de aire alrededor de la edificación producen diferencia de presión sobre las fachadas, lo que induce la entrada o la salida de aire a través de las aberturas del edificio en las distintas orientaciones de las fachadas y a distintas alturas de la misma. Del mismo modo, el factor de

³² Ghiaus, C. & Allard, F., 2005. Natural ventilation in the urban environment: assessment and design

protección de la fachada con respecto a los obstáculos que rodean al edificio también afecta a la intensidad y dirección de la presión de viento sobre la misma. La fórmula que rige la entrada de aire a través de la fachada debida a una presión inducida (sea esta por viento u otros medios mecánicos) es la siguiente:

$$M=C\cdot(\Delta P)^n$$

Donde:

M Caudal másico que se introduce en la edificación, o sale de la misma.

C Coeficiente de presión, dependiente de las condiciones de contorno.

ΔP Diferencia de presiones entre el interior y el exterior.

n Coeficiente relativo al número de Reynolds de la entrada de aire (0,5 en general para régimen laminar, usualmente ventanas y de 0,65 a 0,667 para régimen turbulento, como rejillas, y elementos con obstáculos para la entrada como son los aireadores).

Los coeficientes de presión en las distintas fachadas se especifican en la norma europea UNE EN 13465:2004³³ y la norma UNE EN 15242:2007³⁴. Asimismo, Liddament³⁵ en 1986 establece los patrones de los coeficientes de presión en las fachadas.

Fig.4.12. ejemplo de coeficientes de presión de viento en las fachadas según su incidencia.

Fuente. Liddament, 1986

Swami (1987)³⁶ desarrolló dos algoritmos para representar el comportamiento de coeficiente de presión de viento en distintos puntos de la fachada variando su orientación y exposición, para edificios de baja altura y edificios altos.

³³ UNE EN 13465:2004. Ventilación en edificios. Métodos de cálculo para la obtención del caudal de aire en viviendas.

³⁴ UNE EN 15242:2007. Ventilación en edificios. Métodos de cálculo para la determinación de las tasas de los caudales de aire en edificios, incluyendo la infiltración.

³⁵ Liddament, M. W. (1986) Air Infiltration Calculation Techniques: An Application Guide, Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK

Los coeficientes y cómo se calculan se desarrollan en mayor detalle en el apartado de **Infiltración y permeabilidad al aire de la envolvente**, dentro de este capítulo de estado de la cuestión.

4.2.3.3 VENTILACIÓN FORZADA

El esquema de funcionamiento de este tipo de ventilación incluye elementos de funcionamiento mecánico que suplen el funcionamiento por fuerzas motrices naturales definidas en los apartados previos. Generalmente el diseño de estos sistemas incluye la hipótesis de no ser suficiente con los medios naturales para garantizar el suministro de aire, bien por necesidades de filtrado del mismo, bien por el uso que se le dé al edificio (en cuanto a intensidad de ocupación y tipo de sensibilidad de los ocupantes), o bien por las características del aire exterior que hace recomendable un filtrado que dificulta la impulsión por medios naturales.

4.2.3.4 VENTILACIÓN UNILATERAL

Es la manera más sencilla en que se produce la ventilación. El aire entra y sale en un único espacio, proporcionando únicamente renovación de aire a esta zona o espacio del edificio. La entrada y salida de aire se produce por un único elemento o abertura, aprovechándose de la diferencia de presión entre la parte baja y alta del espacio (el aire caliente, más ligero se establece en la parte superior y el más frío, de mayor densidad, permanece en la parte inferior). Esta abertura, si se trata de una única abertura, es bidireccional.³⁷

VENTILACIÓN UNILATERAL

VENTILACIÓN CRUZADA

VENTILACIÓN UNILATERAL + VIENTO

VENTILACIÓN CRUZADA + VIENTO

Fig.4.13. Tipo de ventilación según la entrada de aire. El autor según distintas fuentes

4.2.3.5 VENTILACIÓN CRUZADA

Cuando el aire entra en una estancia por una o más aberturas y se desplaza por las otras zonas del edificio hasta su salida. En este caso las fuerzas que pueden actuar son el efecto Bernoulli y la de la presión de viento, de manera que exista una diferencia de presiones entre la fachada a barlovento y

³⁶ Swami, M. V. (1987) 'Procedures for calculating the natural ventilation airflow rates in buildings'. ASHRAE Research Project 448-RP, Final Report FSEC-CR-163-86, Florida Solar Energy Centre, Cape Canaveral, USA

³⁷ Awbi, H.B., 1998. Chapter 7—Ventilation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2(1-2), pp.157–188. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403219800015X> [Accessed November 10, 2015].

a sotavento. Los obstáculos interiores y las divisiones afectan la eficacia de barrido de la estrategia de ventilación.

4.2.4 MODELOS DE ESTUDIO DE LA VENTILACIÓN EN ESPACIOS INTERIORES.

El estudio del movimiento del aire (expresado en caudal másico o caudal volumétrico) en el interior de la edificación, así como la generación y el transporte de vapor de agua y de contaminantes en el interior y la transferencia entre el interior y el exterior, requieren de un cálculo complejo. Este depende de multitud de variables locales (físicas y químicas) que requieren de una aproximación computacional para afrontarlo con exactitud a través de software de dinámica de fluidos (CFD). Aun así, estos software disponibles en el mercado como Fluent Ltd. no consiguen realizar cálculos que varíen sus condiciones de contorno en el tiempo, como sucede en la realidad, por lo que la aproximación al problema se realiza escenario tras escenario (*frame by frame*).

La resolución experimental se puede realizar desde dos métodos: la medición in situ a escala real y la medición con modelos a escala en túneles de viento.³⁸ La aproximación como combinación de programas de simulación energética (BES)³⁹ y de resolución de redes de ventilación (AFN)⁴⁰ requiere un ajuste de los coeficientes para realizar los cálculos con exactitud en cada situación. Pese a ello, el cálculo aproximado consigue definir de una manera aceptable las condiciones en que se produce el fenómeno de ventilación en el interior de la edificación, con su demanda energética asociada.

Para conseguir una calidad de aire interior o calcular las cargas de acondicionamiento térmico del edificio, es importante conocer los patrones del movimiento de aire en el interior. Existen, según Liddament, dos aproximaciones básicas para determinar el caudal y flujo de aire en los edificios: la medición y la modelización matemática⁴¹ (fig.8). En todos los modelos desarrollados hasta el momento, salvo los que utilizan la mecánica de fluidos (CFD) se considera la asunción de la mezcla completa (asunción que es básicamente cierta siempre que no se produzcan zonas muertas o asimetría en la distribución de aire⁴²). En un principio, para el estudio de los flujos de aire y contaminantes en las viviendas, se adoptaron dos asunciones básicas: la simplificación de considerar la vivienda como un espacio unizona (que interactúa con el ambiente exterior), o como una red distribuida de espacios interconectados, o espacio multizona.

³⁸ Cóstola, D., Blocken, B. & Hensen, J.L.M., 2009. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. *Building and Environment*, 44(10), pp.2027–2036. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.02.006>.

³⁹ Del ingles Building Energy Simulation

⁴⁰ Del ingles Airflow Network

⁴¹ Liddament, M. W. (1986) *Air Infiltration Calculation Techniques: An Application Guide*, Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK

⁴² Meiss, A. & Feijó, J., 2011. Influencia de la ubicación de las aberturas en la eficiencia de la ventilación en viviendas. *Informes de la Construcción*, 63(522), pp.53–60. Available at: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/1239/1324>.

Fig. 4.14. Descripción esquemática de los procesos para estimar la renovación de aire en ventilación de la edificación. Liddament 1986

4.2.4.1 MODELOS DE ESPACIO UNIZONAL Y MODELOS DE ESPACIO MULTIZONAL

Tradicionalmente se ha afrontado el estudio de la ventilación en los espacios interiores desde dos perspectivas básicas:

1. El modelo de espacio unizonal.
2. El modelo de espacio multizonal.

La asunción del modelo de espacio unizonal es una manera de simplificar los cálculos muy útil cuando no se disponen de mecanismos de cálculo rápidos, pues los resultados obtenidos por este modelo son medias que no detallan las características interiores en cuanto a las variaciones entre las distintas estancias, obteniendo un resultado orientativo, correspondiente a la vivienda o edificio de una manera global, y muy limitado en su utilidad⁴³. También puede asumirse cuando se define la situación de una sola estancia (que no tenga una interacción importante con el resto de estancias de un mismo edificio o vivienda), obteniendo valores indicativos que no definen la interacción con el resto de espacios o zonas adyacentes.

Fig. 4.15. Descripción esquemática de modelo basado en espacio unizonal y multizonal con ventilación unilateral y extracción por tiro natural. Fuente: el autor

⁴³ Ghiaus, C. & Allard, F., 2005. Natural ventilation in the urban environment: assessment and design, p. 95. Available at: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=q1eWw8B4cwoC&oi=fnd&pg=PR7&dq=natural+ventilation+in+the+urban+environment+:++assesment+and+design&ots=GyfdLPS7q&sig=RvIv3h2wBvEtdt0HSJQX-NRGbCM>.

Dentro de la asunción de espacio unizonal se puede establecer la asunción de ventilación unilateral o ventilación multilateral, en la que intervienen varias aberturas. Generalmente se asume la ventilación unilateral, para aprovechar la simplificación del modelo. En cambio, la ventilación con modelo de espacio multizonal permite tener en cuenta la interacción en caudal y presión de las distintas estancias que dividen un mismo espacio, con sus puertas y ventanas y diferentes orientaciones.

Fig. 4.16. Descripción esquemática de modelo basado en multizonal estableciendo una red de nodos interconectados Fuente: Santamouris, 1998⁴⁴

Este esquema es el desarrollado y tenido en cuenta en los software denominados de redes de ventilación (Airflow Networks), tales como COMIS⁴⁵ desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA) y CONTAM⁴⁶ desarrollado por el NIST (National Institute for Standards and Technology), ambos con características similares, y con la posibilidad de acoplarse a modelos utilizando software de dinámica de fluidos (CFD) para detallar el cálculo de situaciones concretas. Se presenta una breve descripción de los software más utilizados para estudiar el movimiento de aire, los flujos y caudales y la variación y evolución dinámica de concentración de contaminantes en el interior de la edificación (considerando espacio multizonal) en su relación con el ambiente exterior.

⁴⁴ Santamouris, M. (1998) 'Prediction methods', in Allard, F. (ed), Natural Ventilation in Buildings, James and James, London

⁴⁵ Feustel, H.E., 1998. COMIS — An International Multizone Air-Flow and Contaminant Transport Model COMIS — An International Multizone Air-Flow and Contaminant Transport Model.

⁴⁶ Walton, G.N. & Dols, W.S., 2006. NISTIR 7251 CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation,

La comparación de las capacidades de simulación entre los software de redes de ventilación (AFN) y los programas basados en la dinámica de fluidos (CFD) se resumen a continuación⁴⁷:

Comparativa de capacidades entre programas basados en AFN y basados en CFD

	AFN (espacio multizonal)	CFD (dinámica de fluidos)
Asunciones de simulación		
Concentración uniforme de contaminación en cada zona		
Equilibrio másico del aire estable en cada zona		
No considera el efecto de momento	Sí	No
Transporte de contaminantes instantáneo (sin retardo) entre zonas		
Presión distribuida uniformemente en cada zona		
Capacidades de simulación		
Simulación anual y dinámica del edificio completo	Mejor	
Cálculo de la infiltración del edificio	Mejor	
Velocidad de computación	Mejor	Mejor
Modelización del movimiento del aire y la concentración de contaminantes		Mejor
Modelización de la presión de viento en los edificios		Mejor
Modelización de espacios y entradas de aire de gran tamaño		Mejor
Modelización de exposición por persona		

Tabla 4.2. Comparativa de capacidades entre programas basados en AFN y basados en CFD. Wang et al. 2010

4.2.4.2 COMIS. AÑO 1990

El software COMIS es un desarrollo para modelado de espacios multizontales. Su estructura en módulos permite la simulación de edificios que permiten su utilización de manera aislada, o en conexión con otros programas de simulación de demanda energética. Su desarrollo se debió al trabajo de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), que creó un grupo de trabajo de expertos para estudiar el flujo y caudal de aire en espacios multizontales en 1990. El objetivo era estudiar el fenómeno físico que producía el movimiento de aire y contaminantes en el interior de la edificación. Especial atención se tuvo en el diseño para dar soluciones precisas a determinados cálculos, como la ventilación unilateral, la entrada de aire en aberturas de gran tamaño, y la determinación del coeficiente de presión de viento en las diferentes fachadas (fig. 11). En la actualidad, el programa define de manera solvente la ventilación desde el exterior al interior de la edificación y exporta directamente los resultados al entorno TRNSYS.

⁴⁷ Wang, L.L., Dols, W.S. & Chen, Q., 2010. Using CFD Capabilities of CONTAM 3.0 for Simulating Airflow and Contaminant Transport in and around Buildings. HVAC&R Research, 16(6), pp.749–763.

Fig. 4.17. Esquema de resolución del problema en COMIS ⁴⁸

4.2.4.3 CONTAM. AÑO 2005

El software CONTAM es una herramienta para el análisis de movimiento del aire y el transporte de contaminantes en espacios multizonales, de carácter complejo. Su primera versión se desarrolló en el año 2005 por el NIST y las diferencias con su homólogo del IEA (COMIS) son: la complejidad de acoplamiento con TRNSYS (en la última versión 3.5 ya es posible, pero anteriormente el acoplamiento se producía con su módulo CF0⁴⁹), y la sencillez en su utilización (admite tabulaciones y patrones base de más fácil uso que COMIS). En cuanto a la precisión, depende en gran medida del detalle en la introducción de los datos, así como en el método y testeo de validación de los modelos para ambos programas.⁵⁰

Fig. 4.18. Esquema de resolución del problema en CONTAM. ⁵¹

En el desarrollo de la tesis doctoral se ha hecho uso de programas de simulación en CFD (Fluent LTD. v6.0) y de análisis multizonal en AFN (CONTAM v3.1. y COMIS v3.2) seleccionándose CONTAM v3.1 por su mayor eficacia en la resolución de los problemas que trata esta tesis, aunque la apreciación de las otras aproximaciones han resultado valiosas para la observación de cómo se produce la ventilación en la edificación residencial.

4.2.5 EDAD DEL AIRE Y EFICACIA DE VENTILACIÓN.

El objetivo del diseño y funcionamiento de los sistemas de acondicionamiento y renovación del aire interior de las edificaciones es conseguir abastecer con aire puro, limpio y libre de contaminantes a

⁴⁸ Feustel, H.E. et al., 2005. COMIS 3.2 - User Guide.

⁴⁹ Wang, L.L., Dols, W.S. & Chen, Q., 2010. Using CFD Capabilities of CONTAM 3.0 for Simulating Airflow and Contaminant Transport in and around Buildings. HVAC&R Research, 16(6), pp.749–763.

⁵⁰ Fürbringer, J.-M. et al., FINAL REPORT EVALUATION OF COMIS Appendices,

⁵¹ Walton, G.N. & Dols, W.S., 2006. NISTIR 7251 CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation,

los ocupantes y evacuar el aire usado en la medida de que su calidad lo hace menos respirable y ha acumulado una mayor concentración de contaminantes de fuente interior o exterior.

En su dinámica, el aire se comporta como un fluido y sigue patrones de movimiento que no son directamente interpretables y dependen de multitud de variables en el tiempo, lo que provoca divergencias en cuanto al objetivo de diseño y el comportamiento real.

Usualmente se tiende a garantizar la adecuada renovación del aire de los espacios interiores a través de abastecer con un caudal mayor del teóricamente necesario para evitar situaciones de exceso de acumulación de contaminantes interiores y dotar de aire fresco a todos los ocupantes y las estancias, ya que al ser difícil de determinar el número de ocupantes y el camino que sigue el aire interior a través de las puertas y estancias, la manera más fácil de garantizar esta renovación es la de sobrepasar en varias veces el caudal estrictamente necesario.

Las definiciones y ecuaciones expresadas en este apartado se basan en desarrollos efectuados con mayor detalle en Sandberg, 1984⁵² y Sutcliffe, 1990⁵³ entre otros, condensados y explicados por Roulet, 2008⁵⁴.

4.2.5.1 EDAD DEL AIRE.

Asumiendo que el aire interior comienza su vida en el momento en que entra a la estancia a acondicionar, se denomina edad del aire al tiempo que un volumen de aire permanece en una estancia sin ser sustituido⁵⁵. La edad del aire en una estancia se define como la edad media de las partículas de aire de la estancia que llegan a un punto de la estancia.

$$f(\tau_r) = -\frac{dF(\tau_r)}{d\tau} \text{ y } F(\tau_r) = 1 - \int_0^{\tau_r} f(\tau_r) dt$$

4.2.5.2 CONSTANTE NOMINAL

La constante nominal τ_n de una zona ventilada, es la relación entre su volumen V y el ratio de renovación de aire fresco incorporado, o la relación entre la masa de aire contenido en un espacio y el ratio de renovación de masa.

$$\tau_n = \frac{V}{q} = \frac{M}{Q}$$

Siendo inverso a la tasa de renovación de aire, n . Si la zona a ventilar posee un sistema de expulsión de aire, como refiere Sandberg (1984), la constante nominal es igual a la edad media del aire en el punto de expulsión.

$$\tau_n = \bar{\tau}_e$$

4.2.5.3 EFICACIA DE INTERCAMBIO DE AIRE

Esta eficacia define como se distribuye el aire en la estancia. El tiempo τ_a requerido de media para renovar el aire en el espacio es dos veces la edad del aire (Sandberg and Sjöberg, 1983⁵⁶):

⁵² Sandberg, M., 1984, The multi-chamber theory reconsidered from the viewpoint of air quality studies, Building and Environment, vol. 19, pp. 221–233.

⁵³ Sutcliffe, H. C., 1990, A guide to air changes efficiency, AIVC Technical Note 28, Bracknell, UK. Order at inive@bbri.be.

⁵⁴ Roulet, C.-A., 2008. Ventilation and Airflow in Buildings: Methods for Diagnosis and Evaluation

⁵⁵ M. Sandberg, What is ventilation efficiency? Building and Environment 16 (1981) 123–135.

⁵⁶ Sandberg, M., and M. Sjöberg, 1983, The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, Building and Environment, vol. 18, pp. 181–197.

$$\tau_a = 2(\tau)$$

Dada una tasa de renovación y un volumen dado, el menor tiempo requerido para sustituir el aire en esta zona viene dado por la constante nominal. De este modo, la eficacia de intercambio de aire es calculada según la siguiente fórmula:

$$\eta_a = \frac{\tau_n}{2(\tau)}$$

En espacios con mezcla completa del aire antiguo y renovado, la edad del aire es igual a la constante nominal, y la eficacia de ventilación es del 50%. El caso más desfavorable es aquel en el que se produce estratificación y acumulación de aire por zonas, desembocando en una eficacia de ventilación inferior al 50%.

4.2.5.4 MEDIDA DE LA EDAD DEL AIRE

Se produce con la ayuda de un gas trazador, del cual se monitoriza la concentración en una estancia determinada. Las características de este gas deben ser las siguientes:

- Ninguna absorción o reacción con el entorno.
- Comportamiento equivalente al del aire.

Se considera la edad del aire la misma que la que se detecte en el caso del gas trazador liberado en el espacio. La inyección del trazador puede ser realizada mediante tres estrategias:

- Inyección uniforme de trazador al comienzo del test.
- Inyección uniforme y constante desde el comienzo del test.
- Inyección puntual del trazador al comienzo del test.

4.2.5.5 MEDICIÓN DE CAUDAL DE RENOVACIÓN EXISTENTE EN EDIFICIOS Y ESTANCIAS UNIZONALES

En este capítulo se presenta la manera de proceder para calcular la tasa de renovación de aire en un espacio o zona de edificio, independientemente de los sistemas mecánicos utilizados o no. Se considera una estancia unizona como un espacio homogéneo desde el punto de vista de la calidad del aire y en el cual un gas trazador se distribuye homogéneamente.

El procedimiento consiste en la inyección de ese gas trazador en el espacio o zona a examinar. Este procedimiento puede realizarse siguiendo varias estrategias: registrar e interpretar la disminución de niveles de concentración tras finalizar la inyección, monitorizar la concentración del gas inyectándolo a concentración constante, o medir el caudal de gas requerido para mantener la concentración del mismo en un valor constante.

Al inyectar el gas trazador en una estancia, la ley de conservación de las masas nos lleva a deducir:

$$\frac{dm}{dt} = I + C_o Q_{oi} - C_i Q_{io}$$

Donde:

- m Masa de gas trazador [kg].
- I Caudal de gas trazador inyectado [kg/s].
- C Concentración de masa de gas.
- Q Caudal másico (de una zona a otra).
- i Subíndice de ambiente interior.
- o Subíndice de ambiente exterior.

El caudal másico entre zonas será equivalente

$$Q_{oi} = Q_{io}$$

La masa de gas trazador en la zona está en correspondencia a la masa de aire total $m = C_i M$

Combinando estas dos ecuaciones obtenemos:

$$M \frac{dC_i}{dt} = I + Q_{oi}(C_o - C_i)$$

Al tratarse M de un valor casi constante a temperatura constante la ecuación del caudal de renovación es:

$$Q_{io} = \frac{I + M \frac{dC_i}{dt}}{\Delta C}$$

Para garantizar cierta exactitud en la medición, es necesario homogeneizar los resultados integrándolos mediante la fórmula:

$$\int_t^{t+\Delta t} Q_{io} dt = \int_t^{t+\Delta t} \frac{I}{\Delta C} dt - M \int_t^{t+\Delta t} \frac{dC_i}{\Delta C}$$

Luego:

$$\int_t^{t+\Delta t} Q_{io} dt = \int_t^{t+\Delta t} \frac{I}{\Delta C} dt - M [\ln(\Delta C(t)) - \ln(\Delta C(t + \Delta t))]$$

y:

$$\langle Q_{io} \rangle = \langle \frac{I}{\Delta C} \rangle - \frac{M}{\Delta t} \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)}$$

4.2.5.6 MEDICIÓN POR DILUCIÓN DE GAS TRAZADOR

El proceso consiste en la inyección de una determinada cantidad de gas trazador hasta que este alcanza una concentración inicial $C_{i,0}$. En el momento denominado t_0 se detiene la inyección de gas, luego $I = 0$. De la ecuación previa se obtiene que:

$$C = C_{(t_0)} \exp\left(-\frac{Q_{io}}{M} t\right)$$

La cantidad $\tau = \frac{M}{Q_{io}}$ corresponde a la constante nominal de la zona de medida. Es la relación entre la masa de aire contenido en la zona y la masa de aire renovado. Es también el tiempo necesitado para introducir en la zona de medida una masa de aire igual a la que contiene. Siendo $I = 0$ la ecuación siguiente se convierte en:

$$\langle Q_{io} \rangle = -\frac{M}{\Delta t} \ln \frac{\Delta C(t)}{\Delta C(t + \Delta t)}$$

Esta ecuación permite el cálculo de la tasa de renovación de aire de una manera sencilla con la toma de dos mediciones en dos instantes determinados. A este método se le denomina el método de dilución. Se obtiene de manera directa la constante nominal y un valor deductivo de la tasa media de renovación de aire.

4.2.5.7 APLICACIÓN EN EXPERIMENTO PROPIO

Durante la monitorización que se explicará en el apartado correspondiente de la tesis doctoral, se ha realizado el experimento para comprobar su aplicación en espacios unizionales de las viviendas construidas en distinto momento y cumpliendo con distintas regulaciones existentes en España a lo largo de los años. La siguiente tabla muestra una muestra de los resultados obtenidos.

Concentración de CO ₂ . Experimento por dilución de gas trazador	Tiempo (h)	Concentración (ppm)	Concentración (mg/m ³)
Momento inicial	11:34	947	1733,01
Momento final	12:34	525	960,75
Tiempo	1:00	422	772,26
Concentración aire exterior (referencia)		400	732
Volumen salón (m ³)		55	m ³
Caudal de renovación (ACH)		0,945	h ⁻¹

Tabla 4.3. Experimento de cálculo de caudal de renovación a partir de medición de gas trazador en espacios unizionales aplicando el método de Sandberg según explicación de Roulet. El autor. 2015

Sin emisión de gas trazador, el volumen para reducir la concentración a la concentración exterior es la unidad.

4.2.5.8 MEDICIÓN POR INYECCIÓN DE GAS TRAZADOR CONSTANTE

Si la tasa de inyección es constante se deduce:

$$\Delta C = \Delta C_{(t_0)} \frac{I}{Q_{i0}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) + \frac{I}{Q_{i0}}$$

Este método permite la utilización de manera sencilla si se establece un valor Q_{i0} constante. De esta forma se puede obtener M y τ_n . En este caso, el exponencial se convierte en despreciable tras 3 tomas de datos y por tanto;

$$\Delta C = \frac{I}{Q_{i0}} \quad Q_{i0} = \frac{I}{\Delta C}$$

Este valor es deductivo y por tanto impreciso, si la tasa de renovación de aire interior no es constante.

4.2.5.9 MEDICIÓN POR CONCENTRACIÓN DE GAS TRAZADOR CONSTANTE

Con la ayuda de un controlador de caudal másico constante, se puede mantener la concentración de gas trazador constante variando la inyección de manera controlada. En este caso, la variable asociada a la variación de concentración es nula por lo que la ecuación resulta:

$$I + Q_{oi}(C_o - C_i) = 0$$

Luego:

$$Q_{oi} = \frac{I}{(C_o - C_i)} = \frac{I}{\Delta C}$$

4.2.5.10 MEDICIÓN DE LA TASA DE RENOVACIÓN DE AIRE USANDO LA DILUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE CO₂

El CO₂ metabólico, generado por los ocupantes junto con otros bioefluentes, puede ser utilizado como gas trazador, con aparatos de medición relativamente poco complejos. El método consiste en tomar el pico de concentración de CO₂ en la estancia como la tasa de renovación por persona. El análisis de las variaciones experimentadas según los ocupantes abandonan el espacio en cuestión permite deducir la constante nominal del espacio ventilado, que depende en su totalidad de la tasa de renovación y la tasa de infiltraciones. Si se combina con un estudio de diferencia de presiones entre interior y exterior, este método puede ser utilizado para determinar la estanqueidad de la envolvente al aire.

La tasa de renovación equivalente

La medida de CO₂ debería tomarse no tan solo en el exterior, sino en las zonas adyacentes. La influencia de las zonas adyacentes en la concentración de CO₂ solo puede ser determinada de manera compleja. El concepto de tasa de renovación de aire exterior equivalente reduce esta incertidumbre. Corresponde a la tasa de aire de renovación que equivale a la concentración de CO₂ sin contabilizar las zonas adyacentes.

La tasa de renovación equivalente por persona

Cada persona produce una media (en perfil metabólico de trabajo ligero, 100 W) unos 20 litros cada hora [l/h] de CO₂. Asumiendo que los ocupantes fueran la única fuente de CO₂ la tasa equivalente de renovación por persona está relacionada con la concentración exterior e interior de CO₂.

$$Q_e = \frac{S}{C_i - C_o}$$

En donde S es la fuente (p.e. 20 l/h) y las concentraciones base se asumen cuando se considera la estancia razonablemente estabilizada.

4.2.6 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AIRE HÚMEDO

En este apartado se describen las propiedades del aire desde el punto de vista de la termodinámica. Para ello se toman como referencia distintas fuentes que definen los términos teóricos que se describen. Es un apartado que aunque no define propiamente el estado de la cuestión, establece las bases teóricas en las que se basa el acondicionamiento del aire.

El propósito perseguido al introducir y renovar el aire al interior de un espacio o edificación es controlar su temperatura, humedad, pureza y movimiento, para garantizar las condiciones confortables al usuario. El aire atmosférico está sujeto a determinadas propiedades en función del estado en que se encuentre. Estas propiedades serán la base para las transformaciones y adecuaciones necesarias para realizar este acondicionamiento.

El aire atmosférico limpio es, en condiciones normales una disolución en fase gaseosa compuesta por nitrógeno, oxígeno, argón, dióxido de carbono y vapor de agua junto con cantidades mucho menores de otras sustancias, denominándose aire seco a la mezcla de gases que resulta de eliminar el contenido de vapor de agua en el aire atmosférico.

La composición del aire seco y limpio, a altitudes próximas al nivel del mar es la especificada en la norma UNE 28533:85⁵⁷, resultando prácticamente constante en toda la atmósfera, hasta alturas superiores a 11 km, con independencia de la localidad geográfica considerada. Sin embargo, el

⁵⁷UNE 28533:1985. Atmósfera normal. Standard Atmosphere.

contenido del vapor de agua varía mucho, tanto con la situación geográfica como el tiempo, dependiendo de circunstancias climáticas y meteorológicas, no existiendo prácticamente vapor de agua a alturas superiores a 10 km.

Es por ello que se puede considerar al aire atmosférico como una mezcla binaria formada por vapor de agua, cuya masa media es igual a 18,02 kg/mol, y un segundo componente, el aire seco de masa molecular media 28,96 kg/mol. Esta disolución binaria recibe el nombre de aire húmedo, y es la considerada habitualmente en los cálculos técnicos.

En termodinámica se demuestra la regla de las fases, según la cual el número de grados de libertad (L) de un sistema en equilibrio termodinámico, es una función del número de componentes (C) y del número de fases (F), dada por:

$$F+L=C+2$$

Según la regla de fases⁵⁸, el número de grados de libertad de un aire húmedo no saturado, es igual a tres; es decir, para que queden determinadas todas las propiedades termodinámicas de un aire húmedo no saturado resulta preciso especificar tres de sus propiedades. En la práctica se suelen escoger para este fin la temperatura T, la presión total P de la fase gaseosa, así como la composición de la misma.

La presión total es igual a la presión atmosférica. El valor de la presión atmosférica varía ligeramente con las condiciones climatológicas reinantes en cada instante en la localidad considerada y con la altitud de esta. El valor medio de la presión atmosférica al nivel del mar es de 1013,25 mbar.

Fig.4.19. variación de presión atmosférica. Norma UNE 28533:85

4.2.6.1 HUMEDAD ABSOLUTA ⁵⁹

La fracción másica del vapor de agua en la muestra considerada de aire entre el vapor del agua del aire húmedo y el aire seco se denomina humedad absoluta o específica:

$$X=m_v/m_a$$

La presión parcial ejercida por el vapor de agua en una muestra de aire húmedo es una función exclusiva de su humedad absoluta y de la presión atmosférica total:

⁵⁸ Devoe, H., 2012. Thermodynamics and Chemistry Second Edition, Available at: <http://www2.chem.umd.edu/thermobook/>.

⁵⁹ Sherif, S.A., 2002. Overview of psychrometrics. ASHRAE Journal, (July), pp.33–39.

Neila J, Bedoya C.1994. Técnicas arquitectónicas y constructivas de Acondicionamiento ambiental. Ed. Munilla-Lería. Las definiciones de los términos se han obtenido de la lectura de varias fuentes coincidentes.

$$\frac{P_v}{P_o - P_v} = \frac{x_v \cdot R_v}{R_a}$$

De esta misma manera se definen el resto de propiedades físicas del aire húmedo:

Grado de saturación

$$\mu = \frac{X}{X_s(P_o, T)}$$

4.2.6.2 HUMEDAD RELATIVA

$$\Phi = \frac{P_v}{P_s(P_o, T)}$$

4.2.6.3 VOLUMEN ESPECÍFICO

$$V = M_a \cdot V_a + M_v \cdot V_v$$

4.2.6.4 ENTALPÍA ESPECÍFICA DEL AIRE HÚMEDO

$$I = M_a \cdot i_a + M_v \cdot i_v$$

De donde $i = i_a + X \cdot i_v$

4.2.6.5 ENTALPÍA DEL AIRE SECO

Para expresar la entalpía del aire seco se escoge como estado de referencia la fase gaseosa a las condiciones del punto triple del agua, cuya temperatura se considera aproximadamente igual a 0°C, por lo que

$$I_a = C_{pa} \cdot (t - 273K) = C_{pa} \cdot t$$

Donde:

t Temperatura en Celsius.

C_{pa} Capacidad calorífica del aire seco a presión constante.

$$C_{pa} = 1,006 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

4.2.6.6 ENTALPÍA DEL AGUA

Para expresar la entalpía del agua se escoge como referencia la fase líquida a las condiciones del punto triple, por lo que deben distinguirse tres casos, según el agua se presente en forma de líquido, vapor o hielo.

Entalpía del agua líquida

$$I_w = C_w \cdot t$$

donde C_w es el calor específico del agua líquida = 4,187 kJ/kg.°C

Entalpía del vapor de agua

$$I_v = r_v^0 + C_{pv} \cdot t$$

donde $r_v^0 = 2501 \text{ kJ/kg}$ es la energía acumulada en el cambio de fase y $C_{pv} = 1,805 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ es la capacidad calorífica del vapor de agua a presión constante

Entalpía del hielo

$$I_h = r_f^0 + C_h \cdot t \quad \text{en donde } r_f^0 = -333 \text{ kJ/kg y } C_{pv} = 2,05 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

Obsérvese que la entalpía del hielo es siempre negativa.

Entalpía del aire húmedo

Se consideran tres situaciones, según el agua esté presente en forma de vapor únicamente ($X \leq X_s$),

$$I = C_{pa} \cdot t + X \cdot (r_v^0 + C_{pv} \cdot t) \quad C_{pah} = C_{pa} + X \cdot C_{pv}$$

Aire saturado con gotitas de agua en suspensión ($X = X_s$ y $T > 0^\circ\text{C}$)

$$I = C_{pa} \cdot t + X_s \cdot (r_v^0 + C_{pv} \cdot t) + (X - X_s) \cdot C_w \cdot t$$

Si el aire está saturado y contiene cristales de hielo en suspensión

$$I = C_{pa} \cdot t + X_s \cdot (r_v^0 + C_{pv} \cdot t) + (X - X_s) \cdot (r_f^0 + C_h \cdot t)$$

4.2.6.7 TEMPERATURA TERMODINÁMICA HÚMEDA: SATURACIÓN ADIABÁTICA

En termodinámica se denomina a un proceso como adiabático, cuando se realiza sin intercambio de calor alguno con el exterior. Para imaginar la saturación adiabática, se imagina el siguiente proceso ideal, realizado en una cámara perfectamente aislada que impide el paso de calor a través de sus paredes. La cámara es atravesada por un flujo de aire constante, que a la entrada tiene una temperatura t y una humedad absoluta X y entalpía específica i . En la parte inferior de la cámara se introduce agua líquida, siendo la longitud de la cámara suficiente para que el aire que sale de la misma lo haga saturado. Al ser un proceso adiabático, el calor necesario para que el agua de la cámara se evapore y sature el aire de salida tiene que ser tomado del mismo aire, por lo que la temperatura de salida del aire será inferior a la de entrada.

La entalpía se habrá también reducido, según la expresión:

$$i - X \cdot i_w = i' - X' \cdot i_w$$

donde el primer factor depende de la presión total P , la temperatura t del aire entrante, su humedad absoluta y la temperatura t^* . Mientras tanto, el segundo término depende en exclusividad de P y t^* , al tratarse de aire saturado.

De este proceso se obtiene otra propiedad del aire húmedo: la temperatura termodinámica húmeda. Por este motivo a la temperatura real se la denomina temperatura seca.

4.2.6.8 DIAGRAMA PSICROMÉTRICO: WILLIS H. CARRIER Y ASHRAE

La ejecución y determinación analítica de las propiedades elementales del aire resulta un cálculo laborioso. Para su determinación gráfica y ágil, se estableció de manera extendida el uso de los diagramas psicrométricos. Se construyen para un determinado valor de presión total de la mezcla que usualmente se considera igual a la presión atmosférica a nivel de mar (1013,25 mbar).

Hasta 1990 su utilización era del 90% de los profesionales del sector del acondicionamiento térmico del aire aunque hoy en día la utilización de medios informáticos, con un 99% de precisión, hace que su uso sea minoritario⁶⁰.

El desarrollo de estos diagramas surgió en a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. El pionero en desarrollar el diagrama como hoy se conoce fue Willis H. Carrier⁶¹. Carrier publicó sus teorías en 1911 aunque su diagrama data del 1904. Otros pioneros en este proceso fueron Grosvenor en 1908 y Mollier en 1923. El diagrama de Carrier emplea como coordenadas la temperatura seca y la humedad absoluta, adoptándose unos ejes rectangulares, con temperaturas abscisas y humedades absolutas en ordenadas.

$$X_s = \frac{0,6220 \cdot P_s}{P_o - P_v}$$

Con esta fórmula puede determinarse la humedad absoluta de saturación, lo que permite localizar por puntos la curva de saturación ($\phi=\mu=1$) que separa en el diagrama la zona correspondiente al aire húmedo no saturado de la zona polifásica. Una vez determinada esta, resulta fácil dibujar las curvas de grado de saturación constante, admitiéndose en la práctica que el grado de saturación y humedad relativa son aproximadamente iguales.

Fig.4.20. Diagrama psicrométrico Carrier en unidades del S.I.. Fuente: HANDS DOWN SOFTWARE, www.handsdownsoftware.com⁶².

⁶⁰ Gatley, D., 2004. Psychrometric Chart Celebrates 100th Anniversary. ASHRAE Journal, (November), pp.16–20.

⁶¹ Gatley, D., 2004. Psychrometric Chart Celebrates 100th Anniversary. ASHRAE Journal, (November), pp.16–20.

⁶² <http://www.handsdownsoftware.com/CARRIER-Chart.PDF>

En el diagrama ASHRAE la utilización de la entalpía y la humedad absoluta como coordenadas presentan importantes ventajas, pues permite eliminar una serie de hipótesis aproximativas que disminuyen la precisión de los cálculos. Es por ello, que se está extendiendo su uso en la actualidad.

El diagrama ASHRAE se construye sobre ejes oblicuos en los que se llevan como coordenadas respectivas la entalpía específica y la humedad absoluta, por lo que las líneas isoentálpicas y las de humedad absoluta constante forman sendas familias de rectas paralelas. En este diagrama, tanto las líneas isotermas como las de temperatura húmeda constante son rectas, aunque no son paralelas.

Fig.4.21. Diagrama psicrométrico ASHRAE en unidades del S.I.. Fuente. HANDS DOWN SOFTWARE, www.handsdownsoftware.com⁶³.

⁶³ <http://www.handsdownsoftware.com/ASHRAE-Chart.PDF>

4.2.7 PROCESOS PSICROMÉTRICOS ELEMENTALES

Cuando el aire cambia algunas de sus propiedades, modifica normalmente alguna de las otras, manteniendo su equilibrio termodinámico. Es en estas transformaciones en las que se pretende actuar minimizando el consumo energético para obtener la mezcla de aire húmedo óptima para el usuario. Los procesos elementales con los que se trabajará para adecuar las propiedades del aire de mezcla del interior serán los siguientes:

4.2.7.1 MEZCLA ADIABÁTICA DE CORRIENTES⁶⁴

Se efectúa por mezcla directa de dos corrientes de aire (m_1, m_2) del que se obtiene la mezcla (m_3). De las ecuaciones de balance se obtiene:

$$m_1 + m_2 = m_3$$

$$m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 = m_3 \cdot x_3$$

$$m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i_2 = m_3 \cdot i_3$$

luego;

$$x_3 = \frac{m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2}{m_3}$$

$$i_3 = \frac{m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i_2}{m_3}$$

$$t_3 = \frac{m_1 \cdot t_1 + m_2 \cdot t_2}{m_3}$$

4.2.7.2 CALENTAMIENTO O ENFRIAMIENTO SENSIBLES

Se denomina así al proceso en que se varía la temperatura seca del aire, permaneciendo constante su humedad absoluta. Un ejemplo es el paso de una corriente por un intercambiador de flujos cruzados (aire-fluido) de tubos aleteados con un fluido interior a una temperatura diferente a la de la corriente de aire, con lo que se intercambia calor por conducción. Si el proceso que se desarrolla es de enfriamiento, hay que tener en cuenta que la superficie por la que fluye el aire deberá tener una temperatura superior a la de rocío si se quieren evitar condensaciones.

$$m_1 = m_2 = m$$

$$x_1 = x_2 = x$$

$$Q = m \cdot (i_2 - i_1)$$

$$q = C_{pah} \cdot (t_2 - t_1)$$

⁶⁴ Sherif, S.A., 2002. Overview of psychrometrics. ASHRAE Journal, (July), pp.33–39. Las definiciones de los términos se han obtenido de la lectura de varias Fuentes coincidentes.

Es importante tener en cuenta que aunque la humedad absoluta no varíe, si lo hará la humedad relativa. Este es un proceso claramente apreciable en instalaciones de calefacción por elementos individuales, como radiadores o fan coils.

4.2.7.3 FACTOR TÉRMICO Y FACTOR DE CALENTAMIENTO SENSIBLE

Una recta en el diagrama psicrométrico representa un cierto proceso, para el cual la evolución de las propiedades del aire húmedo tiene lugar de modo que el aumento de la entalpía es proporcional al cambio en humedad absoluta. Estos procesos, muy frecuentes en climatización, tienen cada uno de ellos un factor térmico definido.

$$FT = \Delta i / \Delta X$$

Quedando los procesos totalmente definidos conociendo el factor térmico y uno de los estados por los que atraviesa el proceso.

En el diagrama del ASHRAE el factor de calentamiento sensible queda definido como el proceso lineal representado por la siguiente expresión:

$$FCS = 1 - r_v^0 / FT$$

Determinando cada uno de sus valores una dirección del plano i-x. Si se admite la capacidad calorífica específica media, a presión constante, del aire húmedo, no varía al cambiar el contenido de humedad, puede demostrarse fácilmente que:

$$CS = C_{pah} \Delta t / \Delta i$$

El factor de calentamiento sensible expresa la fracción del incremento entálpico del aire que tiene lugar durante un proceso y que tiene su origen en el calentamiento sensible.

4.2.7.4 CALENTAMIENTO Y HUMIDIFICACIÓN

En verano, el aire acondicionado que se impulsa en el interior de un local absorbe simultáneamente calor y humedad a su paso a través del mismo.

Los balances de energía y materia permiten escribir:

$$m_w = m \cdot (x_1 + x_2)$$

$$Q = m \cdot (i_1 + i_2)$$

En donde m_w es el caudal másico de vapor de agua que se incorpora al aire húmedo y Q es la carga térmica total que ha de eliminarse del local por lo que el factor térmico del proceso viene dado por

$$FT = \Delta i / \Delta X = Q / m_w$$

4.2.7.5 HUMIDIFICACIÓN ADIABÁTICA

Se trata de la determinación del punto de mezcla resultante de la humidificación adiabática de una corriente de aire de condiciones dadas, por la adición de una cierta cantidad de agua líquida o vapor de agua.

$$i_2 - i_1 = (x_2 - x_1) \cdot i_w$$

El factor térmico del proceso es igual a la entalpía del agua adicionada, representándose este en un diagrama i-x, por tanto, una línea recta.

Adición adiabática de vapor:

La entalpía del vapor de agua a temperatura t_w es:

$$i_w = r_v^0 + c_{pv} \cdot t_w$$

en este proceso, cuando el vapor esta a una temperatura superior a 100 °C, lo que conlleva es humidificación y ligero calentamiento del aire (se eleva la temperatura seca en valor pequeño).

Adición adiabática de agua líquida

La adición de agua líquida a una corriente de aire húmedo, determina siempre un enfriamiento de la corriente de aire.

El enfriamiento de una corriente de aire mediante la evaporación de agua líquida pulverizada en su seno es el fundamento físico de los dispositivos denominados lavadores.

$$i_1 \gg (x_2 - x_1) \cdot i_w \text{ por lo que } i_2 = i_1$$

es decir, la humectación adiabática por aporte de agua líquida es un proceso aproximadamente isoentálpico, por lo que se puede deducir que tiene lugar aproximadamente según una línea de temperatura húmeda constante.

Es una condición para que se produzca este proceso, que el agua añadida se encuentre por encima de la temperatura de rocío, o de lo contrario, se producirá condensación de vapor de agua sobre la interfase líquido aire, con la consiguiente deshumectación del aire de partida.

4.2.7.6 DESHUMECTACIÓN POR ENFRIAMIENTO

Cuando se hace pasar una corriente de aire húmedo sobre una superficie fría, que se mantiene a una temperatura inferior a la de rocío del mismo, condensará una parte del vapor de agua que contiene y por tanto disminuirá su humedad absoluta. Es evidente que si la temperatura del aire húmedo saturado disminuye por debajo de 0°C, la fase condensada aparecerá en forma de escarcha, fenómeno usual en los evaporadores de cámaras frigoríficas.

4.3 CALIDAD DEL AIRE EN ESPACIOS INTERIORES

La ventilación de los espacios interiores construidos es un requisito básico para la salud y el bienestar humanos. La calidad del ambiente interior empieza a ser citada como un problema a finales de los años 60, aunque los primeros estudios no aparecen hasta diez años después, cuando la repercusión de la crisis energética y el embargo de petróleo del año 1973, provocó la infrautilización de sistemas de acondicionamiento térmico y ventilación, que desembocaron en la aparición del Síndrome del edificio enfermo (SEE). La ventilación en la edificación ha sido y es objeto de estudio debido a las consecuencias que tiene sobre la salud de los habitantes y usuarios en los distintos ámbitos edificatorios y a la incidencia que la ventilación tiene en el global de la demanda energética de la edificación. El desarrollo de las sociedades occidentales ha conducido a cambios fundamentales en los hábitos de vida y consumo de las personas. Como parte de estos cambios, nos encontramos con que el ser humano, como habitante o usuario, pasa del 85 al 90% de su tiempo en edificaciones cerradas [ECA, 2000]⁶⁵ y hasta un 60% del tiempo en espacios residenciales [Jenkins et al.1992⁶⁶ Thatcher and Layton 1995⁶⁷, Brasche and Bishof, 2014⁶⁸, , Kim et al⁶⁹ 2013]. La calidad ambiental de los espacios interiores, y más aún en el ámbito residencial, se convierte en un requisito fundamental que mejorar y optimizar. Asimismo, los parámetros límite (TLV) de calidad del aire en los entornos urbanos son sobrepasados cada vez más frecuentemente [European Collaborative Action, 2000⁷⁰] incidiendo de manera indirecta en la calidad del aire interior de la edificación [Lunden, Terry, Zang and others⁷¹] y en la salud de los habitantes de las ciudades. Todo ello, sumado a la necesidad de

⁶⁵ ECA (European Collaborative Action on "Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure"), 2000 Risk Assessment In Relation To Indoor Air Quality, Report No 22. EUR 19529 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities

⁶⁶ Jenkins, P.L. et al., 1992. Activity patterns of Californians: Use of and proximity to indoor pollutant sources. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 26(12), pp.2141–2148. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0026910376&partnerID=tZOtx3y1> [Accessed April 8, 2015].

⁶⁷ Thatcher, T.L. & Layton, D.W., 1995. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence. Atmospheric Environment, 29(13), pp.1487–1497. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0028989379&partnerID=tZOtx3y1>.

⁶⁸ Brasche S, Bischof W. Daily time spent indoors in German homes--baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. Int J Hyg Environ Health. 2005;208(4):247-53. PubMed PMID: 16078638.

⁶⁹ Kim, J. et al., 2013. Gender differences in office occupant perception of indoor environmental quality (IEQ). Building and Environment, 70, pp.245–256. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132313002485> [Accessed February 12, 2015].

⁷⁰ ECA (European Collaborative Action) Working group 1 (MOLINA, C, PICKERING, C, ANTHONY, C, VALBJORN O, DE BORTOLI, M., 1989. INDOOR AIR QUALITY & ITS IMPACT ON. Report 4.Sick Building Syndrome. , (4). ECA (European Collaborative Action) Working group 15 (BERGLUND, B, BLUYSSSEN, P, CLAUSEN, G, GARRIGA TRILLO, A, GUNNARSEN, L. . . , INDOOR AIR QUALITY & ITS IMPACT ON. Report 20.Sensory Evaluation of Indoor Air Quality,

Spengler, John D., jonathan M.S., 2000. Indoor air quality handbook,

⁷¹ Lunden, M.M. et al., 2003. The transformation of outdoor ammonium nitrate aerosols in the indoor environment. Atmospheric Environment, 37(39-40), pp.5633–5644. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0345724959&partnerID=tZOtx3y1> [Accessed April 8, 2015].

Terry, A.C. et al., 2014. Occupant exposure to indoor air pollutants in modern European offices: An integrated modelling approach. Atmospheric Environment, 82, pp.9–16. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231013007309> [Accessed April 6, 2015].

Zhang, J., He, Q. & Liou, P.J., 1994. Characteristics of aldehydes: Concentrations, sources, and exposures for indoor and outdoor residential microenvironments. Environmental Science and Technology, 28(1), pp.146–152. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0028174923&partnerID=tZOtx3y1>.

reducción y optimización de los consumos energéticos en la edificación y emisiones de GEI (gases de efecto invernadero), concretada en normativas y directivas desarrolladas en todos los niveles de ámbito normativo, desde el europeo comunitario como los de ámbito nacional y local hacen necesario realizar estudios complejos que tomen en cuenta los distintos elementos que condicionan tanto la calidad ambiental interior como su implicación en la demanda energética dentro de la edificación residencial. Los condicionantes de índole energética pueden llegar a representar en los próximos años una barrera a la consecución de ambientes interiores que garanticen la mayor salubridad y ausencia de contaminantes interiores.

La Organización Mundial de la Salud (OMS)⁷² estimó en 2012, que 7 millones de personas (1 de cada 8 muertes anuales a nivel global) murieron por causas relacionadas con la mala calidad del aire, interior y exterior. Esta estimación la sitúa como primera causa independiente de muerte. Reducir la contaminación ambiental podría salvar millones de vidas anualmente. En 2012, 3,7 millones de muertes estuvieron relacionadas con contaminación atmosférica, y 4,3 millones debidas a contaminación de aire en interiores debidas en su mayoría a viviendas con cocina o calefacción con combustible en base a madera, carbón o derivados del petróleo. Al no estar exentos los ocupantes con alta exposición a contaminación doméstica a la contaminación atmosférica, no se puede realizar la suma de los dos términos directamente. Es por ello que el total estimado es de 7 millones en lugar de 8 millones. Estas muertes se estima fueron inducidas de manera directa por exposición a contaminantes tanto en exteriores como en interiores.

Estas muertes se relacionan con tipos de enfermedades, que se indican en las tablas 1 y 2 bajo estas líneas

Contaminación exterior.	Causas de muerte por tipo de enfermedad.
40%	Enfermedad Hemorrágica cardiaca.
40%	Paro cardiaco
11%	Obstrucción pulmonar severa
6%	Cáncer de pulmón
3%	Infecciones del aparato respiratorio en niños

Tabla 4.5. Porcentajes de mortalidad asociada a contaminación atmosférica y distribución según tipo de enfermedad

Contaminación interior.	Causas de muerte por tipo de enfermedad
34%	Paro cardiaco
26%	Enfermedad Hemorrágica cardiaca.
22%	Obstrucción pulmonar severa
12%	Infecciones del aparato respiratorio en niños
6%	Cáncer de pulmón

Tabla 4.5. Porcentajes de mortalidad asociada a contaminación interior y distribución según tipo de enfermedad

⁷² <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>

Fig.4.22. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>

Según estudios menos recientes (2003), la repercusión de los efectos de la mala calidad del aire sobre la salud a nivel mundial se situaba alrededor del 11%⁷³ de las causas de mortalidad, comparable al tabaco y el alcohol (9%) y la desnutrición (15%), lo cual implica que en los últimos 12 años el número de muertes debidas a la mala calidad del aire ha aumentado.

A nivel nacional, en España no se han realizado estudios asociando la calidad del aire interior y exterior a las enfermedades y muertes producidas, pero existe una preocupación creciente por los niveles ambientales atmosféricos de contaminantes en las grandes ciudades, que han establecido observatorios, regulaciones y limitaciones a concentración de distintos contaminantes, y medios de comunicación orientados a informar a los habitantes de los niveles en tiempo real, resumido mensual y anualmente, con el objetivo de concienciar y proteger ante todo la salud de las personas más sensibles (niños y personas de edad avanzada o hipersensibilidad a determinados agentes contaminantes o alérgenos)⁷⁴

4.3.1 SINTOMATOLOGÍA RELACIONADA CON LA MALA CALIDAD DE AIRE INTERIOR

Según estudios del Instituto Nacional de la salud en el trabajo, *el número de trabajadores del sector servicios afectados por el deterioro de las condiciones ambientales de sus lugares de trabajo ha experimentado un notable aumento en las últimas décadas*. En España no se ha realizado una aproximación sistemática a las condiciones de salud provocada por los ambientes interiores residenciales, y en particular debido a la contaminación del aire en estos ambientes, pero si se establecen sintomatologías específicas y guías de valores límite de ciertos contaminantes en espacios interiores residenciales a nivel mundial⁷⁵.

4.3.2 CONTAMINANTES PRESENTES EN AMBIENTES INTERIORES Y EXTERIORES

Para edificios no residenciales (salvo ambientes industriales y agrícolas) la norma UNE 171330:2008 establece límites y niveles de contaminación química, microbiológica y por parámetros físicos (iluminación, ruido, electromagnetismo, temperatura y humedad...). Los contaminantes en

⁷³ Smith K.R., 2003 The global burden of disease from unhealthy buildings: preliminary results from a comparative risk assessment, Proceedings of healthy buildings 2003, Singapore.

⁷⁴ Dirección General de Sostenibilidad y Planificación de la Movilidad, 2014. "Calidad del aire:2014".

⁷⁵ World Health Organization, 2010. "WHO guidelines for IAQ: Selected Pollutants".

ambientes interiores pueden presentarse como moléculas individuales (gases y vapores) o moléculas complejas (aerosoles).

Fig.4.23. Origen de los contaminantes encontrados en el interior de las viviendas. Figura tratada por el autor⁷⁶

Según Ruiz, se pueden dividir en cinco grandes grupos según su origen⁷⁷⁷⁸⁷⁹⁸⁰:

1. Productos derivados de la combustión: Productos derivados de procesos de combustión de sustancias que contienen Carbono (C). Suele tratarse de los dióxidos y monóxidos, de Carbono y otros compuestos como Azufre y Nitrógeno. Los efectos sobre la salud suelen ser de asfixia (CO) o de irritación de mucosas, falta de concentración, mareos y problemas respiratorios. También se encuentran en la forma de materia particulada.
2. Compuestos orgánicos volátiles. Provenientes de los materiales de construcción y acabado interior, tanto de la edificación como de los elementos mobiliarios que contienen Carbono y un punto de fusión a temperatura ambiente, lo que les convierte en sustancias fácilmente volátiles. Sus efectos sobre la salud suelen ser Irritabilidad en la piel, ojos y mucosas (80%) y posibilidad de convertirse por exposición prolongada a niveles elevados en carcinogénicos y cancerígenos (25%).
3. Plaguicidas y compuestos químicos tóxicos. Utilizados para limitar la existencia de otros organismos en el interior (doméstico o no) son tóxicos en niveles elevados para el ser humano y las mascotas. Sus efectos suelen ser desde irritación de mucosas hasta enfermedades sistémicas y crónicas. Los compuestos semivolátiles son más difícilmente diluidos por ventilación.
4. Partículas y fibras en suspensión. Asimismo nos encontramos con la materia particulada (partículas de muy pequeño tamaño, 1 μ , 2,5 μ , 10 μ) Según su tamaño se denominan partículas o fibras y pueden penetrar en los tejidos y permanecer en el organismo

⁷⁶ Laura Ruiz Ruiz. María Peñahora García Sanz, 2010. "Calidad Del Ambiente Interior". Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.

⁷⁷ Kang, D.H. et al., 2012. Household materials as emission sources of naphthalene in Canadian homes and their contribution to indoor air. Atmospheric Environment, 50, pp.79–87. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.060>.

⁷⁸ Spengler, John D., Jonathan M.S., 2000. Indoor air quality handbook,

⁷⁹ ECA (European Collaborative Action), 2000. "Risk Assessment in relation to indoor air quality", Report No 22.

⁸⁰ Jurvelin, J.A. et al., 2003. Residential indoor, outdoor, and workplace concentrations of carbonyl compounds: Relationships with personal exposure concentrations and correlation with sources. Journal of the Air and Waste Management Association, 53(5), pp.560–573. Available at: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0038170455&partnerID=tZOTx3y1>.

introduciéndose a través de las vías respiratorias o producir efectos de irritación en los órganos externos. Algunas fibras como las de amianto, son cancerígenas y se han empleado hasta hace relativamente poco tiempo en la construcción (2001 en España). La fibra de vidrio se ha empleado y tiene consecuencias a medio plazo en el aparato respiratorio. Produce irritación en piel, ojos, y resto de mucosas en efecto directo. La lana de vidrio, al ser de mayor tamaño su fibra, no permanece en el organismo, reduciéndose los efectos sobre el organismo.

5. Agentes biológicos. Esta categoría engloba a los microorganismos, fragmentos orgánicos, toxinas y en general, partículas de desecho cuyo origen es biológico. Virus, bacterias, hongos, protozoos, polen, pelos, caspa, ácaros, fragmentos de insectos y de piel forman parte de este amplio grupo. Pueden producir enfermedades infecciosas, alérgicas y tóxicas. Los Bioefluentes, los olores y compuestos relacionados con los ocupantes también entran dentro de esta categoría. Pese a no ser necesariamente peligrosos algunos de ellos para la salud, afectan de manera sensible al confort de los ocupantes, repercutiendo en necesidad de ventilación añadida al caudal requerido por dilución de otros contaminantes y por necesidades respiratorias de los ocupantes

Podemos resumir los compuestos encontrados en el aire exterior y en el interior por los más comúnmente encontrados:

Dióxido de Azufre	SO₂
Dióxido de Nitrógeno	NO₂
Materia particulada	PM 1,0/PM2,5/PM10
Ozono	O₃
Monóxido de Carbono	CO
Metales	Pb, Ni, Cd y As
benceno, tolueno, xileno y resto de compuestos orgánicos volátiles	VOCs
Polen	
Microbios	

Tabla 4.6. Listado de parámetros contaminantes encontrados en el exterior (UNE 177130-1. Ruiz et al. 2010)

Los contaminantes interiores más comúnmente encontrados, ordenados de mayor a menor con respecto a presencia en espacios interiores residenciales, son:

Dióxido de Carbono	CO₂
Monóxido de Carbono	CO
Compuestos orgánicos volátiles totales	TVOCs
formaldehído	HCHO
Ozono	O₃
Materia particulada (μ)	PM 1,0/PM2,5/PM10
Microbios	
Bacterias	
Hongos	

Tabla 4.7. Listado de parámetros contaminantes encontrados en espacios interiores. (UNE 177130-1. Ruiz et al. 2010)

En la tabla 4.7 se señalan los contaminantes encontrados en los espacios residenciales que se van a considerar en simulación y observación experimental. Dado que parte de la ventilación requerida en edificación tiene por objeto “limpiar” o diluir los contaminantes generados o acumulados en el

interior, se convierte en una de las posibilidades más beneficiosas para alcanzar el doble objetivo energía-calidad ambiental, el reducir la emisividad de las fuentes de contaminantes interiores.

4.3.3 FORMALDEHÍDO (HCHO)

El formaldehído es un alérgeno muy extendido ya que se encuentra presente en múltiples productos y se incorpora a otros muchos en los procesos de fabricación incluyendo plásticos, fluidos de corte, medicamentos, telas, cosméticos y detergentes⁸¹, así como multitud de materiales de acabado interior de construcción, mobiliario, combustión de motores sin catalizador, humo del tabaco, combustión del gas natural, madera y subproductos de la madera como el aglomerado y el contrachapado,... Es un compuesto orgánico volátil pero su notoriedad por sus efectos y su frecuencia en compuestos en ambientes interiores hace que se trate de manera individual. Es el más simple del grupo de los aldehídos y se caracteriza por un olor acre muy característico. El formaldehído es también un sub-producto del metabolismo humano, aunque en proporciones que no suponen riesgo para la salud. Aunque el formaldehído es soluble en agua, su ingestión no representa un problema sanitario. Su consideración como contaminante se realiza casi en su totalidad como partícula en el aire de respiración. **En áreas rurales, las concentraciones base pueden rondar las 0,2 ppb (partículas por billón) mientras que en las zonas urbanas con tráfico llegan a representar 20 ppb.**⁸²

Fuentes de emisión de este compuesto pueden ser el tabaco, la calefacción, la cocina o la combustión de velas o incienso. Sin embargo, las mayores fuentes en entornos sin humo parecen estar relacionadas con los materiales de construcción, y productos de consumo que emiten la sustancia. La pervivencia de la emisión en materiales de construcción o de acabado interior puede ser de muchos meses, particularmente en entornos de altas temperaturas interiores y humedad relativa elevada.

Fuentes comunes son:

- El mobiliario de Madera
- Contrachapados, aglomerados y subproductos de madera (p.e. tarimas) que utilizan resinas con base de formaldehído.
- Materiales de aislamiento térmico con resina de urea-formaldehído (en los años 80, la mayor fuente interior de formaldehído).
- Textiles
- Pinturas, barnices, lacas, adhesivos, pegamentos...
- Productos de limpieza, cosméticos, jabones...
- Productos electrónicos
- Insecticidas
- Productos en base de papel.
- Reacciones interiores entre Ozono y terpenos

El mayor problema del formaldehído es que resulta irritante en proporciones relativamente bajas. Concentraciones de 0,36 mg/m³ han sido identificadas en experimentos como causantes de irritación

⁸¹ WHO Regional Office for Europe, 2010. WHO guidelines for indoor air quality,

⁸² Edwards, Rodger. 2005. Handbook of domestic ventilation. Cap. "Indoor Issues and Health Implications (and Ventilation Requirements)."

sensorial los ojos. Conjuntivitis y aumento del parpadeo aparecen a concentraciones de $0,6 \text{ mg/m}^3$. Se ha identificado el comienzo de síntomas como sequedad en las vías nasales en $0,12 \text{ mg/m}^3$, redondeado a $0,1 \text{ mg/m}^3$. No se considera que estos niveles puedan repercutir en aumento de sensibilización al compuesto tanto en adultos como en niños. **La recomendación es de no sobrepasar este límite de periodos no prolongados (30 minutos por día) de $0,1 \text{ mg/m}^3$ para prevenir irritación en la población general. Esta concentración corresponde con 0,08 ppm (partículas por millón).**

La evaluación de efectos a largo plazo, incluyendo el cáncer, se considera en concentraciones a partir de $0,2 \text{ mg/m}^3$, por lo que se recomienda también el límite previo como límite de concentración a largo plazo, por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2010).

Las características principales de este compuesto son:

- Tiene un rápido proceso de foto oxidación en el aire ambiente, convirtiéndose en dióxido de Carbono. También reacciona fácilmente con radicales hidroxilos dando lugar a ácido fórmico. La vida de estas reacciones es de aproximadamente una hora.
- Características físicas y químicas:
 - Masa molecular 30.03 g/mol ;
 - Densidad de vapor relativa: $1.03\text{--}1.07$ (aire =1);
 - Punto de fusión: $92 \text{ }^\circ\text{C}$;
 - Punto de evaporación: $-19.1 \text{ }^\circ\text{C}$.
 - Es soluble en:
 - Agua (400 g/l at $20 \text{ }^\circ\text{C}$),
 - Etanol y Cloroformo y admite mezcla con Acetona, Benceno y Dietileter.
 - Factores de conversión:
 - A 760 mm-Hg y $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \text{ ppm} = 1.249 \text{ mg/m}^3$ and $1 \text{ mg/m}^3 = 0.801 \text{ ppm}$;
 - A $25 \text{ }^\circ\text{C}$, $1 \text{ ppm} = 1.228 \text{ mg/m}^3$ and $1 \text{ mg/m}^3 = 0.814 \text{ ppm}$.

4.3.4 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES (TVOC)

El término “compuestos orgánicos volátiles” (VOCs) se refiere a un rango de productos químicos con puntos de evaporación de alrededor de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ o menos (en la práctica el término cubre compuestos de hasta $-80 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura de evaporación). Se refiere a compuestos que se volatilizan a temperatura ambiente en los interiores. En los espacios interiores esto supone que conviven cientos de compuestos distintos. Su concentración es mayor en el interior que en el exterior. El origen de estos compuestos es variado y va de materiales fabricados por el hombre, decoración, mobiliario, equipos como fotocopiadoras y equipos informáticos, fuentes exteriores como el tráfico, subproductos metabólicos de humanos, animales y hongos, combustión y humo de tabaco, incluso el propio subsuelo puede ser fuente de estos compuestos (Edwards, 2005).

Los niveles de emisión y concentración no son constantes, por tanto y el caudal de renovación tiene influencia en la emisividad (a mayor caudal, menor periodo de emisividad y concentración). Estos compuestos pueden ser, también adsorbidos por las superficies interiores y liberados de nuevo por las mismas, alargando su permanencia en el interior.

Su presencia no suele tener consecuencias en la salud, pero si en olores y discomfort causado por el mismo. La OMS (2010) recomienda que en ambientes no industriales, los límites de concentración

deberán permanecer por debajo del percentil 50 de los niveles de percepción por humanos (olor). Normalmente, se asume que el **disconfort** está causado por la suma de efectos de distintos compuestos, es por eso que se toma como base para esta investigación el término de **compuestos orgánicos volátiles totales (TVOCs)**. Dentro de estos se descarta el **formaldehído (HCHO)** y otros **VOC** considerados **carcinogénicos**, por considerarse de manera independiente en la mayoría de las guías.

TVOC concentration (mg/m ³)	Likely effects
<0.2	None
0.2–3.0	Irritation or discomfort if exposures interact
3.0–25.0	Irritation and headache if exposures interact
>25.0	Neurotoxic effects other than headache

Tabla. 4.8. Concentración de TVOCs y consecuencias en el confort y la salud de los ocupantes.

En la tabla 4.8 observamos que en concentraciones habituales en espacios interiores no suele producirse un efecto adverso para la salud significado en síntomas. En este sentido, tenemos dos métodos de limitación de la concentración de TVOCs:

En el primero se calibra la detección de los TVOCs con respecto al Tolueno. Se usa una escala de alrededor de 0,20 mg/m³⁸³, aunque la OMS considera que es en un rango de 3 a 25 mg/m³⁸⁴ en el que se comienzan a apreciar síntomas evidentes.

En el segundo, se analizan todos los compuestos, divididos en 7 categorías y se disponen los siguientes límites:

- 0,3 mg/m³ para el conjunto
- No superar el percentil 50 de límite de concentración de ninguno de los compuestos individuales.

Al no poder caracterizarse todos los compuestos en nuestra investigación, se toma como límite conservador 0,30 mg/m³ que equivalen a 0,13 ppm, establecido por Seifert⁸⁵ como límite umbral de corto plazo.

4.3.5 EMISIVIDAD PROVENIENTE DE MATERIALES INTERIORES DE CONSTRUCCIÓN

En diversos estudios, a diferentes niveles, ya están estudiados los procesos que determinan la emisividad y la curva de emisiones de los distintos materiales desde su colocación en obra hasta que años después la emisión es mínima (curva de deposición). En un estudio del centro de investigación estatal de Finlandia⁸⁶ (VTT) se hace un repaso exhaustivo por el estado del arte en cuanto a estos aspectos y se recopila la información de estos estudios experimentales. Asimismo se realizan medidas en un conjunto de viviendas de nueva planta, para determinar los valores estadísticamente,

⁸³ L Molhave. 1990, Volatile organic compounds, indoor air quality and health. 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Toronto, Vol. 5; pp. 15-33.

⁸⁴ World Health Organisation Regional Office for Europe, 2000. Indoor Air Quality Guidelines for Europe, 2nd Edition (Available on CD, and also downloadable from <http://www.euro.who.int/eprise/main/who/progs/aiq/activities/200206201>)

⁸⁵ Seifert B. (1990): Regulating indoor air. In: Walkinshaw D. (Ed.): Proceedings "Indoor Air '90", Toronto: 35-49.

⁸⁶ Järnström, H., 2007. Reference values for building material emissions and indoor air quality in residential buildings, Espoo 2007. VTT Publications 672. 73 p. + app. 63 p.

de los distintos contaminantes que mayormente se deben a la emisividad de los acabados frecuentes en la construcción. La siguiente tabla resume sus concentraciones habituales a los 12 meses de la finalización de la obra.

Emisividad habitual de materiales en Ed. Residencial (*pasados 12 meses de su construcción)	Valor normal		Valor anormal	
	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)	TVOC ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^2\text{h}$)
PVC	120	5	170	10
Parquet	30	5	45	10
Pared pintada	40	10	50	15
Falso techo (yeso)	180	30	230	40

Tabla 4.8. Resumen de emisividad en acabados de construcción. Järnström, Helena, 2007

Como respuesta a esta necesidad han surgido de unos años a esta parte, regulaciones y normativas exigentes en cuanto a la emisividad de estos materiales, para conseguir obtener ambientes interiores más saludables, y cuya ventilación pueda reducirse con el objetivo de reducir la demanda energética asociada⁸⁷.

Normativa de baja emisividad de materiales de acabados en construcción (2013-)

Finlandia	M1
Dinamarca	ICL
Noruega	ICL
Alemania	AGBB, EMICODE, Blue Angel
Suecia	Swedish Allergy and Asthma Association
Francia	AFFSET
California	CDPH Section 01350

Tabla 4.9. Resumen de normativa regulatoria de emisividad en acabados de construcción. ISIAQ – CIB. Task Group 42. 2004"Performance criteria of buildings for health and comfort"

4.3.6 SELECCIÓN DE CO₂ COMO MARCADOR DE LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR

No hay evidencia científica de que el CO₂ puro y su concentración pueda ser causa de afección en la salud de las personas en concentraciones habituales, por debajo de 5000 ppm, como media de concentración establecida en recomendaciones de la Occupational Safety and Health Act (OSHA, 29 CFR 1910), o 30000 ppm como concentración en cortos periodos de tiempo (STEL) ni de molestias o intoxicación de ningún tipo en si mismo. Sin embargo, varios estudios lo han relacionado con efectos de falta de concentración, somnolencia y perdida de rapidez mental y reflejos, de los ocupantes, sobre todo en niños, y en ambientes de trabajo (Wargocki et al. 2013⁸⁸, Bako-Biro et al. 2012⁸⁹). Es

⁸⁷ Säteri, J., 2004. Performance Criteria of Buildings for Health and Comfort, (292), pp.1–68.

Available at:

http://cibworld.xs4all.nl/pebbu_dl/resources/literature/downloads/05AdditionalThemes/02Pub292.pdf

⁸⁸ Wargocki, P., Wyon, D. (2013) Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. Build. Environ., 59, 581-589.

por ello, y por su relación con olores y malestar o discomfort causado en los ocupantes, que tradicionalmente se ha establecido una limitación estándar de 1000 ppm para los espacios de trabajo⁹⁰, dejando tradicionalmente de lado las limitaciones en edificación residencial, hasta el momento en que la necesidad de mejorar la eficiencia energética de estos espacios residenciales, los convierte en un posible escenario de baja calidad del aire debido a medidas erróneas de racionalización del caudal de renovación de aire y de reducción de la estanquidad de la envolvente al aire.

Fig. 4.24. Relación entre el caudal de renovación de aire por alumno y el rendimiento en tareas intelectuales. Wargocki et al. 2013

Fig. 4.25. Tiempo requerido para la misma actividad con distintas concentraciones de CO₂ metabólico. Bako-Biro et al. 2012

Aparte de todo ello, el dióxido de Carbono es un gas que cumple todas las condiciones para servir como gas trazador (gas que permite su utilización como referencia en cuanto al cálculo experimental del caudal de renovación en un espacio o edificio) para establecer caudales y fugas en la envolvente (Persily and Axley, 1990⁹¹), así como para determinar la calidad ambiental interior dada su probada presencia habitual junto con los bioefluentes y otros olores y sustancias que deterioran la percepción del ambiente interior y si producen molestias y/o intoxicación en cierto grado. (Wolkoff 2006⁹², Wargocki 2015⁹³, Persily, 1993⁹⁴).

⁸⁹ Bakó-Biró Z., Clements-Croome, D.J., Kochhar, N., Awbi, H.B., Williams, M.J. (2012) Ventilation rates in schools and pupils' performance. *Build. Environ.* 48, 215–223.

⁹⁰ Spengler, John D., Jonathan M.S., 2000. *Indoor air quality handbook*, Chapter 51. pp 1-5

⁹¹ Persily, A. K., and J. Axley. 1990. Measuring Airflow Rates with Pulse Tracer Techniques. In *Air Change Rate and Airtightness in Buildings*, STP 1067, M. H. Sherman (Ed.). ASTM, Philadelphia, pp. 31–51.

⁹² Wolkoff, P. et al., 2006. Organic compounds in office environments - Sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry. *Indoor Air*, 16, pp.7–19.

⁹³ Gao, J., Wargocki, P. & Wang, Y., 2014. Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils' perceptions and symptoms. *Building and Environment*, 75, pp.46–57. Available at:

Así, se ha establecido en las distintas normas y guías de referencia el CO₂ como el indicador de referencia para establecer los parámetros de calidad de aire interior en entornos donde las emisiones de los ocupantes sean las principales fuentes de contaminación de cara al confort de los mismos.

En el trabajo realizado se ha optado por la asunción del CO₂ como el indicador simplificado de la calidad ambiental, dado el conocimiento extenso de los mecanismos que determinan su emisión (fuentes fácilmente determinadas en los entornos residenciales) así como la viabilidad de establecer una red de sensores en un sistema que determine la ocupación de los espacios y a partir de esta, la renovación de aire para mantener los contaminantes en niveles óptimos, al tiempo que permite un ahorro de energía durante el periodo de no-ocupación.

<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84894102761&partnerID=tZOtx3y1> [Accessed January 30, 2015].

⁹⁴Persily, A. K. 1993. Ventilation, Carbon Dioxide and ASHRAE Standard 62-1989. ASHRAE Journal, 35(7): 40–44..

4.4 NORMATIVA

Las renovaciones de aire interior que se han establecido como normativas a lo largo de los siglos XIX y XX se han basado en distintos aspectos y han desembocado en el marco normativo que tenemos hoy día en el que los distintos países existen distintos parámetros obligatorios u orientativos, adaptados a su climatología y parámetros constructivos de su construcción, en cuanto a permeabilidad al aire en su mayoría. En la fig. 11 se observa la evolución en cuanto al caudal requerido en la normativa de Estados Unidos de América.⁹⁵

Fig. 4.26. Evolución durante los siglos XIX y XX de la normativa en cuanto a requerimiento de caudal de ventilación por persona (l/s-persona)

En general, hoy en día, las normativas de diseño y prescripción de ventilación y calidad de aire interior en edificación residencial, tanto en obra nueva como en rehabilitación, (CTE-DB-HS3⁹⁶) contemplan de manera resumida las características del interior de los inmuebles, y prescriben el dimensionamiento de los sistemas de ventilación (natural, mixta o mecánica) parametrizando el caudal necesario de aire de renovación en función de los contaminantes emitidos por los ocupantes (se establece el caudal en función de los ocupantes, lo que está orientado a mantener la concentración de CO₂ dentro de unos límites no establecidos, pero razonables⁹⁷).

Estas reglamentaciones no tienen en cuenta aspectos como son los contaminantes presentes en muchos de los espacios interiores residenciales, como son el formaldehído (HCHO), el monóxido de carbono (CO), los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), la materia particulada (PM2.5 y PM 10) y Ozono (O3) entre otros. Algunas de las fuentes emisoras de estos contaminantes se encuentran en la actividad humana, como el humo del tabaco, que está restringido en espacios públicos y de especial riesgo pero no así en espacios residenciales. También los materiales de construcción y acabados

⁹⁵ Awbi, H.B., 1998. Chapter 7—Ventilation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2(1-2), pp.157–188. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403219800015X> [Accessed November 10, 2015].

⁹⁶ “Documento Básico de condiciones de salubridad, Código Técnico de la Edificación: Parte 1”. 2006.Ministerio de Vivienda de España, “Real Decreto 315/2006 de 17 de marzo:

⁹⁷ Tenorio, J.A: Jiménez, C, Linares, P., 2015 Indoor Air Quality regulations. The Spanish case. Proceedings 36th AIVC congress.

interiores tienen una repercusión importante en la calidad interior de aire (Wolkoff, Schleibinger, Bluysen, Järnström entre otros). Existen ya clasificaciones de emisividad de materiales (ver tabla 2) como son AgBB, RAL UZ blue angel, GUT, Emicode, ICL, Finnish Classification of Indoor Air Climate, EPA, y materiales que “limpian” de ciertos contaminantes el ambiente interior (Wang et al. 2009⁹⁸, Sekine et al. 2001⁹⁹, Ncube et al. 2012¹⁰⁰ entre otros). El mobiliario y los productos de limpieza y acondicionamiento ambiental emiten igualmente, partículas cuyos límites aceptados, según distintas fuentes son sobrepasados en momentos puntuales e incluso de manera continuada (Udhe et al. 2015¹⁰¹).

4.4.1 NORMATIVA CONCERNIENTE A VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL. UNIÓN EUROPEA

En cuanto a la regulación en materia de eficiencia energética, la ventilación como garante de la calidad ambiental interior en edificación residencial se menciona como un requerimiento sucinto en **el artículo 4 , punto 1, párrafo 4 de la EPBD, en cuanto a la influencia que tiene en el ámbito de demanda energética y los riesgos de mala calidad de aire asociada. Se nombran unos requisitos mínimos de cara al establecimiento de un marco mínimo de calidad de aire respecto a la eficiencia energética**¹⁰²

«Estos requisitos deberán tener en cuenta las condiciones ambientales generales interiores, para evitar posibles efectos negativos, como una ventilación inadecuada, así como las particularidades locales, el uso a que se destine el edificio y su antigüedad».

Desde la publicación de esta directiva se ha producido una intensa actividad regulatoria en los estándares europeos respecto a los sistemas y elementos constructivos en la edificación que demandan o repercuten en la demanda energética de los edificios. Así ocurre, como no podía ser de otra manera, con la ventilación y sus sistemas.

Se establece en algunas de las normas EN, la obligatoriedad de la implantación y adaptación a los marcos normativos y reguladores nacionales. Así ocurre con la norma UNE EN 15241, UNE EN 15242 y UNE EN 15251. Otras sin embargo tienen carácter informativo y han de tomarse como sugerencia a los estados miembros, hasta la aparición de otra directiva que las nombre explícitamente, o se publiquen como norma completa en el Boletín Oficial del Estado o se haga referencia explícita en la normativa obligatoria (p.e. revisión de CTE). En la fig.4.27 se observa la evolución de las normativas y normas estándar europeas (EN) en relación a la temática de la ventilación y la eficiencia energética y

⁹⁸ Wang, L., Sakurai, M. & Kameyama, H., 2009. Study of catalytic decomposition of formaldehyde on Pt/TiO₂ alumite catalyst at ambient temperature. Journal of Hazardous Materials, 167(1-3), pp.399–405.

⁹⁹ Sekine, Y. & Nishimura, A., 2001. Removal of formaldehyde from indoor air by passive type air-cleaning materials. Atmospheric Environment, 35(11), pp.2001–2007.

¹⁰⁰ Ncube, M. & Su, Y., 2012. The removal of volatile organic compounds from supply air using a desiccant column – A theoretical study. International Journal of Sustainable Built Environment, 1(2), pp.259–268. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212609013000058> [Accessed January 28, 2014].

¹⁰¹ Uhde, E. & Schulz, N., 2015. Impact of room fragrance products on indoor air quality. Atmospheric Environment, 106, pp.492–502. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014008796> [Accessed April 6, 2015].

¹⁰² Directive 2002/91/EC Of The European Parliament And Of The Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings. Official Journal of the European Communities, 4.1.2003, pp L1/65 - L1/71.

su implementación en Europa, desde la publicación de la EPBD, En la tabla 3 se presenta la temática de las mismas

Fig.4.27. Evolución del marco normativo europeo en referencia a la ventilación residencial. Fuente, el autor.

En el informe técnico CEN/TR 15615 Explicación de la relación general entre varias normas europeas y la Directiva de Eficiencia Energética de los Edificios¹⁰³ (EPBD)- (“Documento paraguas”) se proporciona una visión general del conjunto completo de las normas.

En ella se realiza una categorización respecto a los aspectos contemplados en la EPBD para establecer las bases de la metodología de cálculo y ayudar a la implementación de la misma. Los aspectos energéticos priman sobre los referidos a la salud y confort de los usuarios, pero en algunas de las normas (p.e. EN 15251:2007, EN 15665:2009...) se establecen los parámetros cruzados de calidad ambiental y de eficiencia energética para edificios, tanto residenciales como aquellos que tienen otros usos principales.

Las normas con repercusión en la ventilación y su eficiencia energética se detallan en la tabla 4.10. En ella se especifica el aspecto de la ventilación de los edificios a que se refiere y la tipología edificatoria a la que se aplica.

El objetivo perseguido, que no ha de olvidarse, es el de la consecución de la reducción de los niveles de GEI que se han fijado a este efecto para los distintas etapas (2020, 2030 y 2050). Así, en el campo de la edificación, para el 2020 los objetivos principales están fijados en la definición de los edificios de energía casi nula (EECN) que serán de obligado cumplimiento para toda edificación de nueva planta. En el año 2030 los objetivos se fijan en un 40% en cuanto a reducción de emisiones tomando como referencia las del año 1990 y la integración de las energías renovables, consiguiendo un porcentaje de 27% en el total del conjunto energético de la producción eléctrica a nivel europeo. En cuanto al año 2050, de momento los objetivos se han detallado en cuanto a la reducción de GEI de un 80% respecto a los niveles de 1990 y un 90% para el sector de la edificación.

¹⁰³ UNE-CEN/TR 15615:2012 IN Explicación de la relación general entre diversas normas europeas y la Directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPBD). Documento paraguas.

Normativa relacionada con ventilación y EPBD. Europa	Residencial	No residencial
Criterios de calidad de ambientes interiores	EN 15251:2007	
Diseño y dimensionamiento de sistemas de ventilación	CEN/TR/14788:2006	EN 13779:2007
Criterios de rendimiento de sistemas de ventilación residencial	EN 15665:2009	
Cálculo de caudales de ventilación	EN 15242:2007 EN 13645:2004	
Cálculo de energía en ventilación	EN 15241:2007	
Clasificación de rendimiento de sistemas y elementos	Pr EN 13142 Rev V7	EN 13053:2006 (AHU)
Inspección de sistemas	EN 14134	EN 12599:2000 en revisión

Tabla 4.10. Resumen de normativa regulatoria en relación a la temática de la ventilación y la eficiencia energética.
Elaborada por el autor con distintas fuentes.

4.4.2 EVOLUCIÓN DE LA NORMATIVA EN MATERIA DE VENTILACIÓN EN MARCO REGULATORIO ESPAÑOL

La evolución de la normativa española en materia de ventilación ha estado condicionada por el desarrollo de la técnica tanto en Europa como en España. En España la primera regulación que establece condiciones, aunque no de obligado cumplimiento, en este campo, forma parte de las Normas Tecnológicas de la Edificación, concretamente la NTE ISV 1975. Las Normas Tecnológicas de la Edificación son un conjunto de 155 normas establecidas por el Decreto 3565/1972, de 22 de diciembre, del Ministerio de la Vivienda (BOE 15/01/1973), y a las que el Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, que establece las Normas Básicas de la Edificación (BOE 09/07/1977), da la categoría de soluciones técnicas recomendables para los casos prácticos normales en edificación. Estas normas son de aplicación voluntaria, al poderse adoptar otras reglas y condiciones que cumplan igualmente las disposiciones básicas.

Por tanto las NTE traducen operativamente los conceptos generales contenidos en las normas básicas, cuando estas existen, desglosando el proceso constructivo en seis actuaciones: Diseño, Cálculo, Construcción, Control, Valoración y Mantenimiento. Estas seis fases pueden ser realizadas por técnicos distintos.

Las NTE tienen el carácter de soluciones y criterios técnicos homologados por la administración. Son por tanto una guía o instrucción técnica que complementa el marco normativo exigido en la normas NBE.

En el caso de las condiciones interiores la norma NBE CT 1979 (Norma Básica de la Edificación. Condiciones Térmicas, aprobada en 1979). En ella no se mencionan las condiciones exigibles en cuanto a caudales de ventilación o condiciones exigibles para garantizar la salubridad del mismo¹⁰⁴. Es por ello, que la NTE ISV 75 tiene un carácter reforzado en cuanto a ser la única referencia para la

¹⁰⁴ Norma Básica de la edificación “NBE-CT-79” sobre Condiciones Térmicas de los Edificios R.D. 2429/1979, de 6-jul, de la Presidencia del Gobierno B.O.E.: 22-OCT-79

edificación residencial para establecer las condiciones para una adecuada ventilación dentro de este tipo de edificación.

Por tanto, con anterioridad a la norma NTE ISV 75, al no haber regulación, la ventilación se basaba en el caudal de aire que se introducía y salía de la edificación por los huecos establecidos, en fachada habitualmente. Por tanto, estaba limitada a la infiltración provocada por el gradiente térmico interior-exterior, la diferencia de presión por altura, (nivel de presión neutral), y la diferencia de presiones de viento incidente y de presión-succión en las fachadas. Todo ello sin marco regulatorio que definiera de qué manera se producían los movimientos de caudal.

Asimismo, aunque no regulado, existía una tendencia ya a generar la extracción de los humos de cocina mediante tiro natural a cubierta, existiendo esos tiros pero sin extracción forzada de apoyo, que surgirían más adelante.

La cronología de la aparición de las normas regulatorias en cuanto a ventilación se refleja en la fig. 4.28 bajo estas líneas.

CONTEXTO EN ESPAÑA

Fig.4.28. Evolución del marco normativo español en referencia a la ventilación residencial. Fuente, el autor.

En la actualidad se está realizando una revisión en cuanto a la adaptación de los criterios de establecimiento de los parámetros a tener en cuenta (contaminantes) y caudales de ventilación (niveles de calidad) para el CTE DB HS3¹⁰⁵. Se está barajando la idea de establecer una limitación de 900 ppm de CO₂ de valor medio anual así como un nivel de 50000 ppm de superación de umbrales de 1200 ppm (norma EN 15251) anual. Esta aproximación no es utilizada en ningún otro país del mundo, y deberá ser estudiada en cuanto a las repercusiones posibles de cara tanto al aspecto energético como a la salubridad de los espacios interiores.

La equivalencia de la tabla 4.10 a nivel nacional se encuentra en la tabla 4.11, bajo estas líneas. Se observa que en cuanto a edificación residencial la normativa que tiene vigencia es el CTE DB

¹⁰⁵ Tenorio, J.A: Jiménez, C, Linares, P., sept. 2015. Indoor Air Quality regulations. The Spanish case. Proceedings 36th AIVC congress.

HS3:2009, y a nivel edificación no residencial es el RITE 2013 y sus instrucciones técnicas. Se introducen en la tabla las normas estándar EN que podrían incorporarse, o cuyo contenido es complementario.

Normativa relacionada con ventilación. España	Residencial	No residencial
Criterios de calidad de ambientes interiores	CTE DB HS3:2009	RITE 2013:IT 1.2.4.3.3 Anexo IT 02. 4 sobre condiciones interiores
Diseño y dimensionamiento de sistemas de ventilación	CTE DB HS3:2009	RITE 2013
Criterios de rendimiento de sistemas de ventilación residencial	EN 15665:2009	-
Cálculo de caudales de ventilación	CTE DB HS3:2009	RITE 2013 UNE EN 15242:2007
Cálculo de energía en ventilación	CTE DB HE 2013/EN 15241:2007	RITE 2013 UNE EN 15241:2007
Clasificación de rendimiento de sistemas y elementos	Pr EN 13142 Rev V7	EN 13053:2006 (AHU)
Inspección de sistemas	EN 14134	EN 12599:2000 en revisión

*Tabla 4.11. Resumen de normativa regulatoria española en relación a la temática de la ventilación y la eficiencia energética.
Elaborada por el autor con distintas fuentes.*

4.4.3 NTE ISV 75

Instalaciones de Salubridad
Ventilación
Ventilation. Design

Esta Norma Técnica define por vez primera opciones los sistemas de ventilación. En la tabla 5 se extraen los aspectos más destacables de la norma y su anterior ámbito, sin regulación.

PRE NTE ISV 75	...-1975	NTE ISV 75	1975-2006
Ámbito	Sin ámbito	Ámbito	Edificios residenciales de hasta 20 plantas
Diseño y dimensionamiento de sistemas de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> •Entrada de aire por huecos en fachada. •Extracción para cocinas •Infiltración y apertura de ventanas 	Diseño y dimensionamiento de sistemas de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> •Entrada de aire por huecos en fachada exterior o patio. •Se introduce tiro natural y forzado en baños y cocinas. •Infiltración y apertura de ventanas
Criterios de rendimiento de sistemas de ventilación residencial	-	Cálculo de caudales de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> •1/30 de la superficie útil de la estancia = superficie de ventilación practicable. •Tiro natural por chimenea de piezas prefabricadas en baño y cocinas. •En baños entrada por rejilla y salida por tiro natural o forzado. 200x200 mm². •Ventilación en escaleras Un solo colector no podrá servir a más de siete plantas •Ultima planta independiente. •Todos los conductos deberán ser verticales
Cálculo de caudales de ventilación	-		
Cálculo de energía en ventilación	-		
Clasificación de rendimiento de sistemas y elementos	-		
Inspección de sistemas	-	Cálculo de energía en ventilación	No. Se introduce control de mecanismos
		Inspección de sistemas	si

Tabla 4.12. Resumen de aspectos destacables de la normativa NTE ISV 75 y el estadio previo. Elaborada por el autor con distintas fuentes.

La norma establece ciertas condiciones mínimas para garantizar la ventilación y la salubridad en los espacios residenciales. No se especifica un caudal requerido, ni por m² construido ni por ocupante o estancia pero se especifica que la ventilación ha de producirse desde las estancias vivideras, con huecos al exterior o espacio suficientemente ventilado. La extracción se produce por tiro natural o forzado hasta cubierta en baños y cocinas. Se establece las dimensiones mínimas de huecos, tiro vertical y servidumbre de cada tiro o chimenea, definiendo las opciones de manera técnica (elementos prefabricados de hormigón, denominados comúnmente *Shunt*) y apuntando las posibilidades de ventilación forzada, aunque primordialmente para garajes. Asimismo se definen las dimensiones mínimas de colector y máximo de colectores por ramal. La norma define el sistema valido hasta para 20 alturas. El espacio común de escaleras ha de estar asimismo ventilado.

Esta norma también define las unidades de obra, el precio por unidad, y el mantenimiento necesario. Su aplicación fue bastante extendida en todo el parque edificatorio, dado que lo usual era diseñar conforme a estas normas técnicas, aun no siendo de obligado cumplimiento.

Su vigencia hasta el establecimiento del Código Técnico de la Edificación (CTE DB HS3) ha resultado problemática, debido al cambio conceptual establecido en el mismo, y la inercia en el sector de la construcción, que encontraba de difícil cumplimiento y poca aplicabilidad la siguiente norma. La falta de entendimiento de la norma CTE en este ámbito, ha llevado a entender que a aplicación normativa del DB HS3 lleva a sobredimensionar la instalación y la poco rigurosa manera de pensar que supone un “gasto” energético innecesario, sin valorar la calidad de aire interior.

4.4.4 CTE DB HS3:2006:2009

En el Artículo 13 del Código Técnico de la Edificación, se hace referencia a las Exigencias básicas de salubridad (HS), entre las que se destaca la «Exigencia básica HS 3: Calidad del aire interior». **En ella se dispone que en los edificios de viviendas, trasteros y garajes, se deba poder ventilar adecuadamente eliminando los contaminantes.** Cuantifica los caudales de ventilación y se establecen los criterios de diseño, dimensionado, construcción y mantenimiento.

Esta norma es de aplicación en edificios de viviendas, el interior de las mismas, los almacenes de residuos, los trasteros, los aparcamientos y garajes y en los edificios de cualquier otro uso, a los aparcamientos y los garajes. Se considera que forman parte de los aparcamientos y garajes las zonas de circulación de vehículos. En resumen, esta norma regula la ventilación para espacios predominantemente residenciales, trasteros y almacenes, y aparcamientos en edificios. Su objetivo es aportar la renovación de aire suficiente para garantizar la salubridad de este tipo de espacios. En la norma se observan tres tipos de ventilación para estos espacios:

Ventilación mecánica: Ventilación en la que la renovación del aire se produce por el funcionamiento de aparatos electro-mecánicos dispuestos al efecto. Puede ser con admisión mecánica, con extracción mecánica o equilibrada.

Ventilación híbrida: ventilación en la que, cuando las condiciones de presión y temperatura ambientales son favorables, la renovación del aire se produce como en la ventilación natural y, cuando son desfavorables, como en la ventilación con extracción mecánica.

Ventilación natural: ventilación en la que la renovación del aire se produce exclusivamente por la acción del viento o por la existencia de un gradiente de temperaturas entre el punto de entrada y el de salida.

En la tabla 6 se resumen las características, desarrolladas en el siguiente apartado, en cuanto a exigencia y desarrollo de la normativa.

CTE DB HS3:2009	2006-2013
Ámbito	El establecido en CTE. Edificios residenciales
Diseño y dimensionamiento de sistemas de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> •Se prescribe la ventilación natural, híbrida y mecánica. •Se determinan caudales de impulsión y extracción específicos por ocupante y por estancia. •Consideración del espacio multizona. Aberturas de paso •Se establecen condiciones de extracción de aire. •No se puede ventilar estancias desde otra estancias, salvo trasteros. •Estancias con admisión (secas) y con extracción (húmedas) •Se limita la infiltración por carpinterías según UNE EN 12207:2000 •Aireadores por encima de 1,80 del suelo.
Cálculo de caudales de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> •Ventanas practicables serán de superficie al menos 1/20 de la superficie útil. •Se limita la infiltración por carpinterías según UNE EN 12207:2000 •Tiro natural o forzado por conducto •Dimensionamiento de chimeneas depende de zona climática y nº de alturas de edificación •En baños entrada por rejilla y salida por tiro natural o forzado. 200x200 mm² •Ventilación en escaleras Un solo colector no podrá servir a más de siete plantas •Última planta independiente. •Todos los conductos deberán ser verticales •Se equilibran caudales de impulsión y extracción.
Cálculo de energía en ventilación	Se introduce control de mecanismos
Inspección de sistemas	Si, cada 1 y 5 años

Tabla 4.13. Resumen de aspectos destacables de la normativa CTE DB HS3:2009. Elaborada por el autor con distintas fuentes.

El Documento Básico desarrolla la ventilación residencial, pero no establece niveles máximos interiores de contaminantes, sino que define el caudal mínimo requerido por el sistema por ocupante (estancias vivideras), estancia (trasteros, baños o cocinas) o m² de estancia (trasteros, baños o cocinas, plazas de garaje...). Para el resto de edificación se han de aplicar otras normas específicas, en general el Reglamento de Instalaciones Térmicas y de Energía, conocido como RITE cuya última versión corresponde a 2013.

El CTE define el método simplificado de cálculo. El carácter prescriptivo del CTE hace que sea posible adoptar otras medidas de diseño y cálculo siempre que cumplan con la exigencia marcada en la norma, pero en la realidad cotidiana, la tendencia es a justificar el cumplimiento según el método marcado en ella. En la tabla 7 y fig 5 se esquematiza el diseño y caudal mínimo exigido en la norma.

Caudal mínimo exigido		En función de otros	
		Por ocupante	Por m ² útil parámetros
Locales	Dormitorios	5	
	Salas de estar y comedores	3	
	Aseos y cuartos de baño		15 por local
	Cocinas	2	50 por local
	Trasteros y zonas comunes	0,7	
	Aparcamientos y garajes		120 por plaza
	Almacenes de residuos	10	

Tabla 4.14. Caudal de ventilación mínimo exigido (dm³/s)

Fig 4.29. Esquema ejemplos de ventilación residencial (impulsión-extracción) siguiendo normativa CTE-DB-HS3.

4.4.5 UNE EN 15251:2008

La norma de título «Parámetros del ambiente interior para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido» define en su globalidad los parámetros mínimos a cumplir en las distintas tipologías edificatorias, para distintos usuarios y con distintos parámetros de calidad. No dimensiona los sistemas, pero establece niveles de calidad en función del uso o la exigencia del uso u ocupante.

Esta norma se ha realizado con el objetivo de conciliar la búsqueda de espacios interiores saludables y el cumplimiento de la EPDB, que determina la necesidad de mejorar de manera drástica la eficiencia energética de la edificación nueva y ya existente. Para ello se establecen niveles de aceptación de condiciones ambientales interiores para el cálculo posterior de la eficiencia energética requerida para mantener estos niveles. En el desarrollo de la norma, se dan los valores recomendados para cada una de las diferentes categorías. Se muestra una breve descripción de las categorías:

- Categoría I** Alto nivel de expectativa, recomendado para espacios ocupados por personas débiles y sensibles con requisitos especiales, como disminuidos, enfermos, niños muy pequeños y ancianos.
- Categoría II** Nivel normal de expectativa. Debería utilizarse para edificios nuevos y renovados.
- Categoría III** Nivel aceptable y moderado nivel de expectativa. Utilización para edificios existentes.
- Categoría IV** Valores fuera de los criterios de las categorías anteriores. Esta categoría solo debería aceptarse durante una parte limitada del año.

CLASIFICACIÓN DE AMBIENTES Y EXPECTATIVA

Categoría	Explicación
I	Alto nivel de expectativa. Niños muy pequeños, ancianos y enfermos
II	Edificios de nueva construcción y renovados
III	Aceptable y moderado nivel de expectativa. Edificios existentes
IV	No aceptable salvo periodos de tiempo específicos

Tabla

4.15. Caudal de ventilación mínimo exigido (dm^3/s)

Criterios de exigencia de caudal para edificios no residenciales

Para edificios no residenciales se toma en consideración para el establecimiento del caudal necesario como factores determinantes la ocupación y la emisividad del edificio.

$$q_{tot} = n * q_p + A * q_B$$

Donde:

- N el número de ocupantes en el recinto
- q_p el caudal por persona establecido en l/s
- A el área de suelo del recinto, en m^2
- q_b es el caudal requerido por emisiones del recinto

Se establecen las categorías teniendo en cuenta el nivel de insatisfacción esperado

Categoría	Porcentaje de insatisfacción esperado	Caudal de aire por persona en l/s/pers
I	15	10
II	20	7
III	30	$4 < x < 7$
IV	> 30	< 4

Tabla 4.16. Caudal de ventilación mínimo exigido por persona (l/s-pers) respecto a la calidad ambiental exigida por tipo de uso de la edificación

En cuanto a las emisiones del edificio, se establecen, para las categorías I, II y III caudales de referencia (q_B):

Categoría	Edificio muy poco contaminado	Edificio poco contaminado	Edificio no poco contaminado
I	0,5 l/s/ m^2	1,0 l/s/ m^2	2,0 l/s/ m^2
II	0,35 l/s/ m^2	0,7 l/s/ m^2	1,4 l/s/ m^2
III	0,3 l/s/ m^2	0,4 l/s/ m^2	0,8 l/s/ m^2

Tabla 4.17. Caudales de ventilación mínimo exigido (l/s/ m^2) respecto a la calidad ambiental requerida y carga de contaminación debida a la propia edificación y sus elementos de acabado y mobiliario

La siguiente tabla muestra las concentraciones recomendadas de CO₂ sobre la concentración exterior (usualmente 400 ppm) para cálculos energéticos y control de demanda.

Categoría	CO ₂ sobre la concentración exterior para cálculos energéticos y control de demanda
I	350
II	500
III	800
IV	>800

Tabla 4.18. Concentraciones máximas permitidas en CO₂(ppm) respecto a los niveles de calidad ambiental, por encima del nivel en el ambiente exterior (usualmente ≈400 ppm en entorno urbano)

Este criterio de tomar en consideración los contaminantes y emisiones que se han comprobado como significativos en diversos estudios, no se realiza sin embargo para edificios residenciales.

Criterios de exigencia de caudal para edificios residenciales

La calidad ambiental se determina principalmente por tres criterios:

- La extracción de contaminantes en los recintos húmedos (baños, cocinas, aseos)
- Ventilación general de todos los recintos de la vivienda
- Ventilación general de todos los recintos en la vivienda con criterios de aire fresco en el recinto principal (dormitorios y salas de estar).

Los caudales de aire de ventilación de dormitorios y cuartos de estar para la ventilación general de la vivienda se expresan como:

- Caudal de aire por hora para cada recinto, y/o de aire de impulsión exterior para conseguir un requisito en los recintos principales. Cuando se selecciona esta opción, generalmente se requiere conseguir también uno de los siguientes criterios para tratar la contaminación en los recintos húmedos.
- Caudales de extracción requeridos (baños, aseos y cocinas)

categoría	Índice de cambio de aire		Sala de estar y dormitorios, principalmente caudal de aire exterior		Caudal de aire de extracción, l/s		
	l/s/m ² (1)	ACH	l/s/pers (2)	l/s/m ² (3)	Cocina (4a)	Baño (4B)	Aseos (4)
I	0,49	0,7	10	1,4	28	20	14
II	0,42	0,6	7	1,0	20	15	10
III	0,35	0,5	4	0,6	14	10	7

Tabla 4.19. Caudal de ventilación mínimo exigido (l/s-pers y l/s·m²) y caudal de extracción para viviendas.

Se calcula de la siguiente manera:

1- se calcula el índice de ventilación total de la residencia basado en:

a) área de suelo, (1)

b) Número de ocupantes o número de dormitorios, (2) y (3)

2.- se selecciona el valor más alto de los anteriores (a o b) para el caudal total de la residencia.

3.- Se ajusta el caudal de extracción de la cocina, baños y aseos, teniendo en cuenta que:

En residencias con áreas de suelo pequeñas los caudales de aire de extracción llegan a ser pequeños

En grandes residencias se hacen mayores

4.- El aire exterior debería proporcionarse en primer término del cuarto de estar a los dormitorios.

Este esquema presupone la mezcla completa en el recinto, escenario de ventilación de mezcla, con un buen nivel de eficacia, de valor 1 (ver apartado de edad del aire en *Estado de la cuestión*).

4.4.6 COMPARACIÓN ENTRE LOS DISTINTOS ESCENARIOS NORMATIVOS QUE SE CONTEMPLAN EN LA TESIS EN CUANTO A VENTILACIÓN EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL

Las normativas que se han detallado, tanto a nivel estatal: 1) situación pre-normativa (PRE NTE ISV 75), 2) primer escenario normativo aunque no obligatorio (NTE ISV 75), 3) primer escenario normativo de obligado cumplimiento (CTE DB HS3:2009) y 4) la norma estándar europea que define los parámetros que relacionan la calidad ambiental con la eficiencia energética en la edificación (EN 15251 o UNE EN 15251:2008 en su versión española) se van a convertir en los escenarios contemplados para desarrollar la investigación en el marco de la tesis doctoral. A continuación se resaltan las diferencias fundamentales extractadas del análisis realizado de estas normas en la tabla 4.20.

	Norma de obligado cumplimiento	Admisión de aire	Extracción de aire	Cálculo y dimensionamiento	Nivel máximo de contaminantes	Caudal mínimo de ventilación	Espacio multizona
PRE NTE ISV 75	No	Ventanas (Ventilación + infiltración)	Ventanas	Ninguno	No	No	No
NTE ISV 75	No	Ventanas (Ventilación + infiltración)	Tiro Pasivo (T.P.) o mecánico (T.M.)	Aproximado. Por superficie y estancias y extracción	No	No	Si
CTE DB HS3	Si	Ventanas+aberturas (se reduce infiltración)	T.P. T.M. o híbrido. Caudal mínimo de extracción	Detallado. Por estancias y ocupantes. Caudal equilibrado	No	Si	Si
EN 15251	Si*	Ventanas+aberturas (se reduce infiltración)	T.P. T.M. o híbrido. Caudal mínimo de extracción	Detallado. Por superficie y ocupantes. Infiltración	Si, por niveles de calidad ambiental	Si, por niveles de calidad ambiental	Si

Tabla 4.20. Comparativa de normativas seleccionadas como representativas para el establecimiento de los escenarios de estudio y análisis.

4.5 INFILTRACIÓN Y PERMEABILIDAD AL AIRE DE LA EDIFICACIÓN

La infiltración de aire es una de las principales causas de pérdidas energéticas en edificación residencial (Sherman y Grimsrud, 1980¹⁰⁶). El conocimiento de cómo y en qué medida se produce es de vital importancia para poder cuantificarla y proponer soluciones viables a este problema, sobre todo en la edificación existente. La infiltración de aire en edificación se define como la interacción de la envolvente con el aire exterior produciendo intercambios inesperados debidos a factores externos como son; la diferencia de temperaturas entre el exterior e interior de la edificación; el viento; y la diferencia de presiones entre el interior y el exterior (Sherman et al, 1998). La infiltración depende de la diferencia de presiones entre el interior y el exterior, y sin embargo no es directamente proporcional a esta, pues interviene también la presión del viento. Prácticamente todo el conocimiento de la estanqueidad al aire y las infiltraciones se conoce a partir de las pruebas de presurización con la utilización del *Blower Door Test*, que comenzaron en los años 70 en Suecia (Blomsterberg 1977¹⁰⁷) y llegaron a Estados Unidos más tarde con un estudio en Princeton, donde comenzó su nomenclatura como *Blower Door Test*. La medida de la infiltración se utiliza en la actualidad con diferentes fines, tanto cualitativos (como control de calidad en la construcción) como cuantitativos (estanqueidad al aire de las fachadas y ventanas, auditorías energéticas, etc.). Otra definición de la infiltración en ventilación comúnmente utilizada, la establece como la entrada involuntaria e incontrolada de aire del exterior que penetra en el edificio debido a la presión dinámica del viento u otros elementos causantes (IDAE 2012¹⁰⁸). La modelización de la infiltración con propósitos de predicción de su incidencia en las cargas térmicas del edificio ha sido, en la mayor parte de los casos, insuficientemente descrita.

Los métodos de cálculo y definición obedecen a la caracterización empírica de modelos que representen de manera ajustada el fenómeno que se produce al aplicar una sobrepresión en la vivienda (*blower door test*), por lo que la aparición de modelos teóricos continúan o siguen al desarrollo obtenido desde el campo experimental.

Métodos de cálculo y definición de las infiltraciones en la edificación

Desde los años 80 se han definido diferentes aproximaciones al cálculo del caudal de aire introducido en un edificio, teniendo en cuenta distintos aspectos como la estanqueidad al aire, el uso, concepción de espacios como unizionales o multizionales, consideraciones climáticas y de entorno circundante (presión de viento, diferencia de presión y temperaturas entre exterior e interior)... A continuación se enumeran las asunciones y métodos habituales de predicción utilizados:

¹⁰⁶ M.S. Sherman and D.T. Grimsrud, Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data, Lawrence Berkeley Laboratory, UCA, 1980.

¹⁰⁷ A. Blomsterberg, "Air Leakage in Dwellings", Dept. Bldg. Constr. Report No. 15, Swedish Royal Institute of Technology, 1977.

¹⁰⁸ Guía IDAE: Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3, IDAE, julio 2012.

MÉTODOS EXPERIMENTALES.

Consisten en la presurización del edificio o vivienda a una sobrepresión de 50 a 100 Pa (en función de la normativa utilizada) para la obtención de la permeabilidad de la envolvente. Es conocido como *Blower door test*, o *Minneapolis blower door*.

4.5.1 MÉTODO DE PRESURIZACIÓN O BLOWER DOOR TEST

La medida de la infiltración se ha evaluado de distintas formas, siendo la más comúnmente referenciada el método “*Blower Door*”, consistente en un proceso de presurización continua, a través de la puerta, del interior a fin de cuantificar, a una determinada presión (50 o 100 Pa dependiendo de la normativa de referencia utilizada). Como resultados tenemos la pérdida producida de caudal y la obtención de esta manera con el caudal de renovación en una hora (ACH). Estos sistemas, aplicados en un número representativo de testigos, han permitido evaluar de una manera empírica la infiltración esperada en edificaciones de distinto tipo (ASHRAE Fundamentals)¹⁰⁹. Edificaciones con menor estanquidad o mayor infiltración, requerirán un mayor caudal para mantener la presión interior diferencial de 50 Pa o 100 Pa (EEUU o Canadá respectivamente).

Fig 4.30. Determinación experimental en viviendas de EEUU(1), Europa (2) y Canadá (3), de la infiltración (ACH) medida a 50 Pa mediante proceso de ensayo de presurización. Distribución estadística de resultados. 2009 ASHRAE Handbook— Fundamentals

Proceso de presurización del método de blower door test.

El proceso se inicia desde la abertura o hueco de una puerta. Se sellan las aberturas de admisión y extracción y se coloca en la puerta el ventilador, que introducirá el caudal de aire que provocará la presión diferencial con el exterior.

$$\Delta P = P_{ia} - P_{oa} = 50 \text{ Pa} \quad (36)$$

El caudal para mantener la presión interior a 50 Pa se denomina V50. Para obtener el número equivalente de renovaciones/hora o ACH (N50) se utiliza la expresión:

$$N50 = V50 \cdot \frac{1}{V_{edificacion}} \cdot \frac{1}{h} \quad (37)$$

La equivalencia con el número de renovaciones a presión normal se establece de dos maneras:

- El método de Princeton atribuido a Persily y Kronwall¹¹⁰

$$ACH \approx \frac{ACH_{50}}{20} \quad (38)$$

¹⁰⁹ ASHRAE Handbook 2009— Fundamentals. Section 16.16.

¹¹⁰ M.H. Sherman “Estimation of Infiltration from Leakage and Climate Indicators”, Energy and Buildings, 1987

- El método de Sherman, explicado en el apartado 4.5.2.2.

4.5.2 METODOS DE CÁLCULO NUMÉRICO Y FÍSICO.

Todos ellos tienen una base física de mecánica de fluidos, pero basan el cálculo en tabulaciones experimentales para simplificar el método de cálculo y hacerlo asequible para los ingenieros y diseñadores de sistemas.

4.5.2.1 MÉTODO SIMPLIFICADO DE ASHRAE (1989)

En el documento “ASHRAE Fundamentals 1989” se presenta un método, de carácter experimental para el cálculo estacional de la infiltración. Este método se basa en la estanqueidad al aire de la edificación, dependiendo de la velocidad del viento, la variación estacional y el gradiente térmico entre interior y exterior.

$$N = a + b \cdot |T_i - T_e| \quad (35)$$

Siendo los valores de a y b distintos en función de la estación del año y el tipo de construcción.

Estación	Tipo de construcción	a	b
Invierno	Estanca	0,280	0,00630
	Media	0,408	0,00873
	Poco estanca	0,483	0,01224
verano	Estanca	0,210	0,00720
	Media	0,310	0,00840
	Poco estanca	0,310	0,01400

Tabla 4.21. Parámetros de cálculo para estimar la infiltración según el método del ASHRAE publicado en 1989

Por este método se pueden estimar la infiltración en renovaciones/h. Este método, aplicado de manera directa, permite establecer unos rangos de infiltración en edificación que pueden servir como referencia 1, [ASHRAE Fundamentals, 2005]. Aplicados en un número representativo de testigos, han permitido evaluar de una manera empírica la infiltración esperada en edificaciones de distinto tipo. A continuación se muestran las gráficas cuantitativas del caudal de infiltración de aire en función del gradiente térmico y tipo de envolvente, en condiciones de invierno y de verano. Las siguientes graficas (fig. 4.31. y fig. 4.32.) muestran la influencia del gradiente térmico en la infiltración según el método simplificado. Este puede ser usado con las medias de temperatura de cada mes para obtención de un valor medio de infiltración de aire.

fig. 4.31. Condiciones de invierno. Modelado de infiltración en ACH para distinto tipo de edificación.
Tabla realizada por el autor

fig.4.32. Condiciones de verano. Modelado de infiltración en ACH para distinto tipo de edificación.
Tabla realizada por el autor

4.5.2.2 MÉTODO DE SHERMAN Y RICKERHOFF. ASHRAE (2005)

El método de cálculo, utilizado por esta prestigiosa asociación de referencia en EEUU, calcula, para edificaciones de poca altura (hasta 3 alturas) el área efectiva de infiltración mediante la fórmula (42) a 4Pa obtenido de un ensayo de presurización de la vivienda. El método desarrollado por Sherman para estimar la N media partiendo de N_{50}

$$N = ACH = \frac{N_{50}}{C \cdot H \cdot S \cdot L} \quad (39)$$

Donde las variables se establecen de manera estadística experimental para las condiciones constructivas de EEUU. Siendo estas:

C ratio de infiltración: 26 (clima cálido) < C < 14 (clima frío)

- H Factor de corrección de altura de la edificación
- S Factor de corrección de protección al viento
- L Factor de corrección de permeabilidad

Fig. 4.33. Coeficientes para la conversión de valores de la fórmula de Sherman. "Estimation of Infiltration from Leakage and Climate Indicators", 1987

Posteriormente estudios tanto efectuados por el ASHRAE como por los organismos reguladores a nivel europeo (CEN) han determinado las equivalencias de renovaciones/hora en distintas condiciones de presión causadas por la infiltración (ver apartado del mismo capítulo en el que se expresan dichos valores, dentro de la norma UNE EN 15242:2008). El área efectiva de infiltración (del inglés ELA, Effective Leakage Area), consiste en asimilar al edificio a una única fisura de área equivalente al sumatorio de todas las fisuras. Mucho del trabajo realizado ha estado basado en esta asunción.

$$ELA = K \cdot P_{\tau}^{n-1/2} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2}} \quad (40)$$

Lo que lleva al establecimiento del caudal efectivo de infiltración a una presión de referencia dada.

$$Q_f = ELA \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{\tau}}{\rho}} \cdot \left(\frac{P_f}{P_{\tau}}\right)^n \quad (41)$$

La presión de referencia utilizada en los estándares es 4 Pa.

4.5.2.3 MÉTODO DE CÁLCULO DEL ÁREA EFECTIVA DE INFILTRACIÓN DEL LAWRENCE BERKLEY NATIONAL LABORATORY (LBNL)

EL método de cálculo utilizado por este prestigioso laboratorio de referencia en EEUU para edificaciones de poca altura (hasta 3 alturas) calcula el área efectiva de infiltración mediante la fórmula (42) a 4Pa obtenido de un ensayo de presurización de la vivienda. Posteriormente fue adoptado también por ASHRAE.

$$Q = ALEAK * (Cs (Tia - Toa) + Cw U^2) * 0,5 \quad (42)$$

Donde, y tomados de la figura x.x. bajo estas líneas:

Cs es el coeficiente del efecto chimenea

Cw es el coeficiente de viento

U es la velocidad del viento

Table 4 Local Shelter Classes

Shelter Class	Description
1	No obstructions or local shielding
2	Typical shelter for an isolated rural house
3	Typical shelter caused by other buildings across the street from the building under study
4	Typical shelter for urban buildings on larger lots where sheltering obstacles are more than one building height away
5	Typical shelter produced by buildings or other structures that are immediately adjacent (closer than one house height): e.g., neighboring houses on the same side of the street, trees, bushes, etc.

Table 5 Basic Model Stack Coefficient C_s

	House Height (Stories)		
	One	Two	Three
Stack coefficient	0.0150	0.0299	0.0449

Table 6 Basic Model Wind Coefficient C_w

Shelter Class	House Height (Stories)		
	One	Two	Three
1	0.0119	0.0157	0.0184
2	0.0092	0.0121	0.0143
3	0.0065	0.0086	0.0101
4	0.0039	0.0051	0.0060
5	0.0012	0.0016	0.0018

Fig.4.34. Coeficientes para aplicación de la fórmula del caudal de infiltración equivalente del método del LBNL.

4.5.2.4 MÉTODO ESTABLECIDO EN LA NORMA UNE EN 13645:2004

La norma UNE-EN 13645:2004 proporciona un método de cálculo para la obtención de los caudales de aire en viviendas. En este documento analizaremos dicho método de cálculo para deducir a partir de él el valor de las infiltraciones en un edificio. La norma anterior propone un balance unizonal en el

cual se determina la presión interior; una vez obtenida dicha presión es posible evaluar los caudales de aire que entran y salen de la vivienda. Dichos caudales pueden ser de dos tipos:

- Ventilación: provocados de forma voluntaria por el usuario de la vivienda para mantener un buen nivel de calidad de aire interior.
- Infiltración: caudales de aire involuntarios.

La infiltración de aire a través del edificio (fugas de aire) se incrementa cuando la temperatura exterior es baja (aumentando la fuerza motriz por efecto chimenea) y con altas velocidades de viento (efecto de presión de viento) y una combinación de ambos.

Esto puede conllevar una elevada pérdida de energía con un limitado impacto en la calidad del aire interior (por ejemplo para edificios no residenciales, el caudal debido a la temperatura exterior se incrementará por la noche cuando el edificio no está ocupado). Por este motivo la infiltración debe reducirse lo máximo posible.

Cuando un local renueva o introduce aire exterior por las infiltraciones que se producen a través de su piel exterior, ventanas o puertas cerradas, se producen determinados problemas.

En conclusión, la elevada permeabilidad en la envolvente exterior puede causar:

- **Pérdidas energéticas con un consumo extra que redundará en el aumento de las emisiones de CO₂ debidas a la utilización innecesaria de los sistemas de acondicionamiento térmico.**
- **Patologías constructivas asociadas a la aparición de condensaciones por condensación.**
- **Mal funcionamiento de la construcción en verano**
- **Empeoramiento del comportamiento del edificio frente a ruido.**

Cuando no hay viento, el reparto de presiones depende únicamente de la temperatura (diferencia entre interior y exterior). La experiencia demuestra que esta diferencia de presión es suficiente en invierno, cuando el gradiente térmico es elevado y genera una depresión en el interior, aun no siendo una manera controlada y eficiente.

Método de cálculo de las infiltraciones según normativa UNE EN 13465:2004

La norma UNE-EN 13465:2004 proporciona un método de cálculo para la obtención de los caudales de aire en viviendas, tanto unifamiliares como en bloque. Dicha norma propone un balance unizonal en el cual se determina la presión interior del edificio o pieza del edificio; una vez obtenida dicha presión es posible evaluar los caudales de aire que entran y salen de la vivienda. En este caso, se determina que se va a efectuar el cálculo asumiendo el volumen como unizonal.

Pasos necesarios en el cálculo:

1- se calcula el caudal de ventilación de la vivienda asumiendo, para suponer una ventilación adecuada a normativa (CTE DB H3) y hacer los cálculos comparables, que:

- La permeabilidad de las ventanas es equivalente al tipo A1 (50 m³/h a 100 Pa).
- la velocidad del viento exterior será igual a 0 m/s.

2- Posteriormente se calculará la ventilación real con la permeabilidad real de las ventanas y velocidad exterior de viento 0 m/s. Se calculan las rejillas necesarias para que la vivienda tenga la misma ventilación que la calculada anteriormente.

De esta forma quedarán definidas las rejillas.

El caudal de fugas quedará definido por:

$$q_{vleak\ i} = C_{leak\ i} \cdot \left[\frac{|\Delta P_{leaki}|}{4} \right] \cdot \text{signo} \Delta P_{leaki}$$

Siendo

$$\Delta P_{leaki} = C_{pi} \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot v^2 - \rho_{int}$$

$C_{leak\ i}$ Caudal de infiltraciones por la fachada “i” para un salto de presiones de 4 Pa

C_{pi} el coeficiente de presión en la fachada i

v la velocidad del viento

Para la situación inicial, el componente de viento de ΔP_{leaki} es 0 por lo que el factor determinante se convierte en $C_{leak\ i}$, tomado de los valores de la tabla x

Bloques de viviendas	
Año de construcción	$C_{leak\ i}$ (m ³ /h)
Anterior a 1960	5,5 • V
1961-1975	3,6 • V
1976-	2,2 • V

Tabla 4.22. Valores tabulados del Coeficiente de infiltración $C_{leak\ i}$ (m³/h) para distinta época constructiva. EN 13465:2004

Siendo V el volumen acondicionado del edificio.

Caso de conocerse los datos de permeabilidad de las ventanas, se utilizaría la siguiente fórmula:

$$C_{leak} = (P_{edif} + P_{ventanas} \cdot 0,116 \cdot S_{acristalada})$$

Donde

P_{edif} es la permeabilidad de la parte opaca del edificio

$P_{ventanas}$ es la permeabilidad de la superficie acristalada, en m³/hm² a 100 Pa.

$S_{acristalada}$ es la superficie acristalada total.

Bloques de viviendas	
Año de construcción	P_{edif} (m ³ /h)
Anterior a 1960	4,1 • V
1961-1975	2,7 • V
1976-	1,7 • V

Tabla 4.23. Valores tabulados de la permeabilidad del edificio P_{edif} (m³/h) para distinta época constructiva. EN 13465:2004

Siendo V el volumen acondicionado del edificio.

Bloques de viviendas	
Año de construcción	Valor por defecto: $P_{ventanas}$ m ³ /h·m ² a 100 Pa
Anterior a 1960	200
1961-1975	130
1976-	80

Tabla 4.24. Valores tabulados de la permeabilidad del edificio $P_{ventanas}$ (m³/h) para distinta época constructiva. IDEA y EN 13465:2004

4.5.2.5 MÉTODO ESTABLECIDO EN UNE EN 15242:2007

Método de cálculo de las infiltraciones según la normativa UNE EN 15242:2007

Es esta la normativa actualmente en vigor para el cálculo de la ventilación e infiltración en la Comunidad Europea. En muchos aspectos, recoge lo anteriormente establecido en la norma UNE EN 13645:2004 pero introduce modificaciones en la manera de calcular las diferencias de presión en las aberturas y entradas de aire. En este caso, se determina que no se va a efectuar el cálculo asumiendo el volumen como unizional.

Ventilación híbrida y pasiva

Elementos

- 1- Entradas de aire
- 2- Extractor
- 3- Conducto
- 4- Salidas de aire

El objetivo del cálculo es determinar el caudal de aire en el sistema teniendo en cuenta las condiciones exteriores e interiores.

Caudal de aire del extractor

Se determina según la norma EN 13141-5

- ζ El coeficiente de pérdida de presión por el conducto
- El efecto de succión del viento depende de la velocidad del viento y de la velocidad del aire en el conducto. Se expresa en función de la diferencia de presión y de la succión causada por el viento.

$$C(V_{windref}, V_{duct}) = dP/p_d$$

Siendo

$$p_d = 0,5 \cdot \rho \cdot V_{windref}^2$$

$V_{windref}$ Es la velocidad del viento de referencia

V_{duct} Es la velocidad de aire en el conducto

La diferencia de presión depende del efecto chimenea (altura) y de la pérdida de presión a través del extractor y la salida.

$$dP_{cowl}(V_{wind}, V_{duct}) = 0,5\rho\zeta V_{duct}^2$$

El viento de referencia es usualmente $V_{wind}=8\text{m/s}$

$$dP_{cowl}(V_{wind}, V_{duct}) = 0,5C(V_{windref}, V_{duct})\rho V_{windref}^2$$

Caudal de aire debido a las ventanas

Para el cálculo lateral único, el caudal de aire se calcula mediante:

$$q_{vairing} = 3,6 * 500 * A_{ow} * V^{0,5}$$

$$V = C_t + C_W \cdot V_{met}^2 + C_{st} \cdot H_{window} \cdot \text{abs}(\theta_i - \theta_e)$$

Donde:

Q_v caudal de aire (m^3/h)

A_{ow} área de apertura de la ventana

$C_t=0,01$ Coeficiente que tiene en cuenta la turbulencia del viento

$C_w=0,001$ Coeficiente que tiene en cuenta la velocidad del viento

$C_{st}=0,0035$ Coeficiente que tiene en cuenta el efecto chimenea

H_{window} Altura libre de ventana (m)

V_{met} Velocidad meteorológica del viento a 10 m de altura (m/s)

T_e Temperatura exterior

T_i Temperatura del recinto

Para ventanas oscilantes interiores, el cociente del caudal a través del área de apertura y de la ventana abierta en su totalidad se considera solo dependiente del ángulo de apertura e independiente del cociente de la altura con la anchura de la ventana.

$$A_{ow} = C_k(\alpha)A_w$$

Donde C_k modifica el área total de apertura A_w dependiendo del ángulo de apertura según la fórmula:

$$C_k(\alpha) = 2.60 \cdot 10^{-7} \cdot \alpha^3 - 1.19 \cdot 10^{-4} \cdot \alpha^2 + 1.86 \cdot 10^{-2} \cdot \alpha$$

Cálculo del caudal de aire a través de la envolvente debido al impacto del efecto chimenea y el impacto del viento sin considerar los caudales de aire mecánicos o de combustión.

$$q_{v-stack} = 0.0146 \cdot Q_{4Pa} \cdot (h_{stack} \cdot \text{abs}(\theta_e - \theta_i))^{0.667}$$

El valor convencional de h_{stack} es el 70% de la altura de la zona H_z

$$q_{v-wind} = 0.0769 \cdot Q_{4Pa} \cdot (d_{cp} \cdot v_{site}^2)^{0.667}$$

El valor d_{cp} (CP diferencia entre los lados a barlovento y sotavento) es 0,75

Cálculo del caudal resultante

$$qv - sw = \max(q_{v-stack}, q_{v-wind}) + 0.14 q_{v-stack} \cdot q_{v-wind} / Q_{4Pa}$$

Como primera aproximación, la parte infiltrada se iguala a la parte equivalente de stack y wind y la diferencia entre caudales de impulsión y descarga (calculados sin viento o efecto chimenea). Los valores de Q_{4Pa} se pueden obtener bien de manera experimental, a través de medición con Blower door test (test de presurización de la vivienda o edificio) o bien tomar como referencia los datos por la norma en la tabla B-1 de la norma

Tabla B.1 – Ejemplos de las características de las fugas

		m³/h por m² de envolvente exterior (exp n = 0,667)		
	Nivel de fugas	Q4Pa	Q10Pa	Q50Pa
Unifamiliar	bajo	0,5	1	2,5
	medio	1	2	5
	alto	2	3,5	10
Multifamiliar, no residencial excepto industrial	bajo	0,5	1	2,5
	medio	1	2	5
	alto	2	3,5	10
Industrial	bajo	1	2	5
	medio	2	3,5	10
	alto	4	7	20

		n (vol. h) (exp n = 0,667)			área exterior
	Nivel de fugas	n4Pa	n10Pa	n50Pa	vol l/m
Unifamiliar	bajo	0,4	0,8	1,9	0,75
	medio	0,8	1,5	3,8	0,75
	alto	1,5	2,6	7,5	0,75
Multifamiliar, no residencial excepto industrial	bajo	0,2	0,4	1,0	0,4
	medio	0,4	0,8	2,0	0,4
	alto	0,8	1,4	4,0	0,4
Industrial	bajo	0,3	0,6	1,5	0,3
	medio	0,6	1,1	3,0	0,3
	alto	1,2	2,1	6,0	0,3

		m³/h por m² de área de suelo (exp n = 0,667)			área exterior/área de suelo
	Nivel de fugas	Q4Pa	Q10Pa	Q50Pa	l/m
Unifamiliar	bajo	0,9	1,8	4,5	1,8
	medio	1,8	3,6	9,0	1,8
	alto	3,6	6,3	18,0	1,8
Multifamiliar no residencial excepto industrial	bajo	0,6	1,1	2,8	1,1
	medio	1,1	2,2	5,5	1,1
	alto	2,2	3,9	11,0	1,1
Industrial	bajo	1,5	3,0	7,5	1,5
	medio	3,0	5,3	15,0	1,5
	alto	6,0	10,5	30,0	1,5

Tabla 4.25. Valores tabulados del nivel global de fugas para distinto tipo de edificio y distintas presiones de cálculo.
Coeficientes de paso para estimación de los valores de fugas globales. EN15242:2007

Para las entradas de aire`

$$C_{vent i} = 1000 * A_{vent} * \left(\frac{2}{\rho}\right)^{0,5} * \left(\frac{1}{\Delta p_{ref}}\right) * C_D \text{ (a 1Pa)}$$

Donde:

A_{vent} es el área de fuga o respiradero

- ρ es la densidad del aire, exterior si es de entrada, interior si es de salida
- Δp_{ref} es la diferencia de presión de referencia para A (por ejemplo 4 Pa)
- C_D es el coeficiente de descarga (normalmente 0,6)
- n es el exponente por caudal con un valor por defecto de 0,5

Cálculo de coeficientes de presión en fachada (C_p)

- 1- Se calcula la velocidad del viento a 10 m de altura en el lugar
- 2- Se determina si del uso de la protección de las fachadas se divide en 3 partes (baja, media, alta).
 - a. La parte baja se establece entre 0 y 15 m.
 - b. La parte media se establece de 15 m a 50 m.
 - c. La parte alta se establece para alturas mayores de 50 m.

Una parte de la fachada puede ser protegida si $H_{obst} \geq 0,5 \cdot (\min(\text{construido } H; 15))$ la parte inferior puede protegerse. Si $H_{obst} - 15 \geq 0,5 \cdot (\min(35; (\text{construido } H - 15)))$ la parte mas baja de la fachada y la parte media se consideran protegidas. La parte alta se considera siempre desprotegida.

Ver figura A-1 de la norma, donde,

H_{obst} es la altura del obstáculo más cercano

B_{obst} es la anchura del obstáculo más cercano

B_{built} es la anchura del edificio

D_{ob} es la distancia entre el obstáculo más cercano y el edificio.

- 3- Se hallan los valores C_p para las tres partes de la fachada, que variarán si la situación es abierta, normal o protegida

Tabla A.2 – Clases de protección dependiendo de la altura del obstáculo y distancia relativa

Clase de protección	Distancia relativa $D_0/H_{0,wt}$
Abierta	> 4
Normal	$1,5 - 4$
Protegida	$< 1,5$

- 4- Se determinan los valores C_p de la zona con la ayuda de la tabla A.3. de la norma. Si la altura media de la zona de fachada es inferior a 15 m, el C_p de la zona se considera igual al de las partes bajas de fachada. Si esta entre 15 y 50 m, el C_p de la zona se considera igual al de las partes medias de fachada. Si la altura media es mayor que 50 m, el C_p de la zona se considera igual al de las partes altas de fachada, tal como se ejemplifica en la figura A-2 de la norma.

Leyenda

- 1 viento
- 2 zona 3
- 3 zona 2
- 4 zona 1

Figura A.2 – Ejemplo de aplicación

Tabla A.3 – Presiones del viento dimensionales

Parte de la fachada	Protección	C_p presiones del viento dimensionales				
		Barlovento C_{p1}	Sotavento C_{p2}	Tejado (dependiendo de la inclinación) C_{p3}		
				$< 10^\circ$	$10^\circ - 30^\circ$	$> 30^\circ$
Baja	abierta	+ 0,50	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
	normal	+ 0,25	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
	protegida	+ 0,05	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
Media	abierta	+ 0,65	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20
	normal	+ 0,45	- 0,50	- 0,60	- 0,50	- 0,20
	protegida	+ 0,25	- 0,30	- 0,50	- 0,40	- 0,20
alta	abierta	+ 0,80	- 0,70	- 0,70	- 0,60	- 0,20

NOTA. Los coeficientes de presión del viento dados sólo son válidos para un sector del viento de aproximadamente $\pm 60^\circ$ al eje de la fachada. La dirección del viento no se considera más específicamente.

Velocidad del viento en el sitio. Donde la velocidad del viento es V_{meteo} .

Se aporta corrección para la velocidad del viento debido a las diferencias en la aspereza del terreno entre el sitio a considerar y el sitio meteorológico.

Se consideran tres clases de terreno:

- Terreno abierto,
- Campo
- Urbano/ciudad

La regla logarítmica para la corrección a partir de la altura es:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

Los factores de corrección para distintos tipos de dureza del terreno se determinarán con ayuda de la tabla A.1 . de la norma.

Tabla A.1 – Factores de corrección para $v_{\text{site}}/v_{\text{meteo}}$ a 10 m de altura

Clase de terreno	Parámetro de dureza z_0 en el sitio [m]	$v_{\text{site}}/v_{\text{meteo}}$
Terreno abierto	0,03	1,0
Campo	0,25	0,9
Urbano/ciudad	0,5	0,8

Metodo de las “rendijas”

Es un procedimiento normativo ya anulado, en el que se determina la interacción conjunta de todas las fisuras, o “rendijas” en el efecto de la infiltración con el objetivo de evaluar su incidencia en cargas térmicas de acondicionamiento de aire.

Se determina el Volumen de infiltración:

$$Vi = (\sum i \cdot fi \cdot Li) \cdot R \cdot H$$

Siendo:

f	Coeficiente de infiltración de puertas y ventanas exteriores sometidas a la acción del viento, a barlovento (m ³ /h·m).
L	Longitud de rendijas de puertas y ventanas exteriores sometidas a la acción del viento, a barlovento (m).
R	Coeficiente característico del local. Según Rietschel y Raiss viene dado por:
$R = 1 / [1 + (\sum j \cdot fj \cdot Lj / \sum n \cdot fn \cdot Ln)]$	
$\sum j \cdot fj \cdot Lj$	Caudal de aire infiltrado por puertas y ventanas exteriores sometidas a la acción del viento, a barlovento (m ³ /h).
$\sum n \cdot fn \cdot Ln$	Caudal de aire exfiltrado a través de huecos exteriores situados a sotavento o bien a través de huecos interiores del local (m ³ /h).
H	Coeficiente característico del edificio. Se obtiene en función del viento dominante, el tipo y la situación del edificio.

Para determinar las pérdidas de calor provocadas por el efecto de infiltración, se utiliza la siguiente fórmula:

$$Qv = 0,3 \times I \times R \times (Ti - Te)$$

En donde:

Qv	Pérdidas de calor en Kcal/h
1,3	Calor específico del aire en Kcal/m ³ ·°C
R	Longitud en metros, de las rendijas de las puertas y ventanas, en la fachada que más tenga.
Ti, Te	Temperaturas de cálculo interior y exterior respectivamente.
I	Infiltración de aire en m ³ /h por m de rendija. Depende de la permeabilidad del aire, según la calidad de la carpintería y la velocidad del viento en la puerta o ventana considerada. Puede tomarse desde 2,5 como valor normal, hasta 4 en los casos de carpintería más deficiente o con mucho viento.

Infiltración en ventanas

Las pérdidas debido a las infiltraciones de aire en forma habitual a través de una ventana, es el resultado de la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior y la presión inducida por el viento. Las pérdidas por infiltración se pueden estimar a partir de mediciones efectuadas a un diseño de carpintería que es sometida a distintas diferencias de presión entre ambos lados de la misma.

Las actuaciones más efectivas para reducir la infiltración son:

- Sellado de grietas y rendijas en ventanas y puertas.
- Sellado de grietas y rendijas de la fachada.
- Colocación de burletes de estanqueidad en ventanas practicables y en puertas.
- Sustitución completa de la ventana, incluyendo la carpintería.

Los dispositivos de sombra exterior del tipo salientes laterales, contraventanas o celosías pueden actuar como deflectores del viento y, por tanto, pueden contribuir a reducir las infiltraciones. La rehabilitación de la fachada mediante aislamiento colocado por la cara exterior de esta reduce la permeabilidad de la misma debido a que se sellan las grietas que eventualmente pudieran aparecer.

4.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE ESTADO DE LA CUESTIÓN

Del estado de la cuestión se puede concluir:

- E.C.1. La ventilación en edificación residencial es fundamental para la reducción de la demanda energética de la misma.
- E.C.2. A su vez, la calidad del aire interior incide directamente sobre la salud y el confort de los usuarios, por lo que cualquier actuación orientada a reducir la demanda energética, con repercusión en los aspectos relacionados con la ventilación residencial ha de ser analizado en ambos términos: Repercusión energética y repercusión en calidad de aire interior.
- E.C.3. Las concentraciones de los contaminantes interiores son un indicador fiable de la calidad del aire interior, pero han de seleccionarse los más representativos para analizar la calidad del aire interior. En el caso que nos ocupa, de edificación residencial, los más adecuados son:
 - En términos de ocupación, y por tanto, más relacionados con el confort, es pertinente estudiar la concentración del CO₂. También este parámetro permite obtener datos relevantes en cuanto a caudal de renovación de aire al ser un gas trazador.
 - En términos de contaminantes de fuentes de acabados interiores, más relacionados con la salud, es pertinente analizar el formaldehído, muy presente como emisión de mobiliario y algunos materiales de la construcción de acabados interiores y los compuestos orgánicos volátiles totales, que son un indicador muy amplio, pero que empieza a tener lugar en la normativa en cuanto a limitaciones de contaminantes en espacios residenciales.
- E.C.4. Los aspectos que más determinan tanto la calidad del aire interior como el consumo energético asociado son:
 - La infiltración de la envolvente, sobre todo las carpinterías exteriores.
 - El sistema de ventilación con que se realice la renovación del aire interior, en su mayoría:
 - natural, dependiendo únicamente de las fuerzas naturales para realizar la renovación del aire interior.
 - Mecánica con extracción, formando diferencia de presión negativa en el interior.
 - Equilibrada, ecualizando los caudales de admisión y extracción.
 - El caudal de renovación que se prescriba para ventilar el espacio.
- E.C.5. Las normativas que han tenido incidencia en España en cuanto a la ventilación en edificación residencial española (NTE ISV 75 y CTE DB HS3) tienen un nivel de exigencia en cuanto a la calidad del aire interior que no contempla explícitamente las concentraciones de contaminantes interiores. Estas situaciones normativas pueden servir como base para un análisis de las condiciones de calidad de aire interior y la demanda energética asociada.

5 CARACTERIZACIÓN DE ASPECTOS RELEVANTES EN CUANTO A VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EN ESPAÑA

La edificación residencial existente en España tiene unas características que difieren según los distintos periodos de su construcción en cuanto a los sistemas que influyen en la ventilación y la calidad del aire interior. Se han dado periodos con mayor profusión en la edificación residencial, que se podrían dividir en 3: el periodo de la recuperación tras la guerra desde los años 50 hasta la aparición de las primeras normativas obligatorias en la edificación residencial en distintos aspectos (estructuras, transmitancia térmica, salubridad e instalaciones...) en 1979 ; el periodo posterior a la implantación a estas normativas de los años 80 hasta la aparición de la actual normativa y el periodo posterior a la implantación de la normativa actual, el Código Técnico de la Edificación hasta la actualidad. Se van a establecer en este capítulo las diferencias y puntos en común de la ventilación en edificación residencial.

Los objetivos de este capítulo son:

1. Caracterizar en la edificación residencial existente los aspectos relevantes con influencia en la eficiencia y calidad de la ventilación en los distintos periodos.
2. La selección de una tipología edificatoria y un edificio de referencia demostrador, que permitan realizar un examen exhaustivo de las condiciones de calidad de aire interior y la demanda energética asociada al acondicionamiento térmico y ventilación que nos permita obtener datos extrapolables.

5.1 INTRODUCCIÓN

Según datos publicados por el Ministerio de Vivienda, en 2010 el parque inmobiliario de nuestro país constaba de 25.837.108 viviendas, de las cuales 17.782.862 son viviendas principales y 8.074.246 son viviendas no principales (aproximadamente un 68% son viviendas principales y el 32% viviendas no principales). Este dato comparado con la población española (48.351.532 habitantes en 2010 según el INE) supone una proporción aproximada de 1,9 personas por vivienda, la mayor tasa de la UE y una de las mayores del mundo lo que da una idea del tamaño del parque de viviendas existente.

La proporción entre edificación residencial y no residencial es claramente tendente a la primera, en general. En Europa, el 75% de la edificación es residencial y el 25% no residencial (BPIE, 2011)¹¹¹. En España, la situación es aún más extrema. El 85% de la edificación es residencial, y solo el 15% son edificios de otros usos. (BPIE y DG Energy, 2014)¹¹². De estos el 66% son viviendas en bloque y tan solo el 34% son viviendas unifamiliares (aisladas o en hilera).

Fig. 5.1 y 5.2. Porcentajes de tipo de edificación en España y clasificación de vivienda en bloque o unifamiliar. Año 2014. BPIE y DG Energy

Observando la distribución geográfica de la edificación residencial (fig.5.3. y 5.4.) concluimos que la mayor concentración de viviendas se da a nivel litoral, salvo el punto de concentración mayor en el interior de la meseta correspondiente a la Comunidad autónoma de Madrid. Como casos aislados, el entorno metropolitano de Zaragoza y Sevilla, se establecen como importantes concentraciones de edificación residencial.

Fig. 5.3. Distribución por comunidades autónomas del Parque edificatorio residencial español. Elaboración propia a partir de datos de INE y el MVIV. año 2010

¹¹¹ Economidou, M. et al., 2011. Europe's buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings BPIE.

¹¹² DG Energy, E., 2014. EU Energy in figures. Statistical Pocketbook 2014

Fig. 5.4. Distribución geográfica del Parque edificatorio residencial español. Elaboración propia a partir de datos de INE y el MVIV. Año 2010. Proyecto SIREIN+

5.2 SELECCIÓN DE LOS PERIODOS DE RELEVANCIA PARA EL ANÁLISIS

Las características constructivas de la edificación residencial han sufrido variaciones conforme la técnica avanzaba, los acontecimientos socio-políticos se sucedían y las normativas se iban implementando. La diferenciación realizada en este trabajo se ha producido a expensas de los acontecimientos que han modificado la manera de construir. A continuación se muestran los diferentes tejidos urbanos en que se ha desarrollado la vivienda en España en gran medida se muestran en la fig. 5.5.

Fig. 5.5. tejido urbano residencial en los distintos periodos

5.2.1 EDAD MEDIA DEL PARQUE EDIFICATORIO RESIDENCIAL ESPAÑOL

Según el Ministerio de Fomento (secretaría de Vivienda) y el Instituto Nacional de Estadística, las viviendas en España son aproximadamente 25 millones en la actualidad. La edad de este conjunto de viviendas está básicamente referenciada a los periodos establecidos en el apartado previo. La distribución en cuanto a porcentaje se muestra en las figuras 5.6. y 5.7 bajo estas líneas. Se observa, caracterizado por comunidades autónomas, la antigüedad de la edificación residencial. Un gran porcentaje (alrededor del 70%) del parque edificatorio residencial corresponde a edificación

realizada desde 1960 hasta el año 2005. Asimismo el periodo de mayor profusión en número de viviendas se encuentra de 1961 a 1980, representando aproximadamente el 30% del total. Este stock posee en general unas características técnicas predominantes, incluyendo las referentes a la ventilación y a los aspectos que influyen en su desarrollo. No ocurre así en el resto las instalaciones, y las de acondicionamiento térmico, que han sufrido a lo largo de los años una mayor renovación.

Fig. 5.6y 5.7. Frecuencia por fecha de construcción de la edificación residencial en España y por comunidades autónomas. Elaborado por el autor con datos de INE y MVIV. (2015)

5.2.2 PERIODO DESDE 1900 A 1939.

Durante este periodo, en el que se comienzan a conocer las propiedades higrotérmicas de la envolvente de la edificación. Se construye en manzana cerrada de los ensanches del siglo XIX y se recurre a tipologías constructivas de entramado masivo, huyendo de soluciones tecnológicamente desarrolladas y de propiedades más eficientes. Es a partir del periodo de posguerra con la escasez de material, cuando se comenzará a economizar en los sistemas constructivos. La implantación del movimiento moderno y del racionalismo en España es tardía y no consigue implantarse a nivel tipológico en la edificación residencial. La inclusión de aislamiento térmico es testimonial y en general la aparición de la cámara y doble hoja de cerramiento exterior es todavía muy poco frecuente¹¹³.

¹¹³ Ros García, Juan 2004. "Origen e influencia constructiva del sistema de muro de doble hoja en la historia y composición de obras de fábrica de cerramientos en la arquitectura contemporánea residencial madrileña entre los años 1910 a 1958". Tesis doctoral. ETS de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.

5.2.3 PERIODO DESDE 1939 A 1960.

Periodo de posguerra, en el que tiene lugar la aparición de primeras normativas de construcción. Tras la guerra se produce un gran volumen de construcción de vivienda, edificación de escasa calidad, para restaurar el parque dañado o destruido durante la guerra. En 1939 se crea la “Dirección de regiones devastadas”, La “Dirección General de Arquitectura” y el “Instituto nacional de la vivienda”. En 1954 aparece la Ley de Viviendas de Renta limitada, complementada en 1955 con el “Reglamento de Ordenanzas técnicas y Normas Constructivas”.

En este periodo, según Azpilicueta¹¹⁴, se produce en un primer momento un proceso de reconstrucción con cierto carácter de urgencia. A lo largo de los años 50 se recuperan paulatinamente las técnicas constructivas con hormigón armado y acero, volviendo finalmente a la arquitectura racionalista y moderna. De 1955 a 1962 la construcción de vivienda social, o al amparo de esta condición fue predominante gracias a las bonificaciones en tributación por construcción (de iniciativa privada o pública).

Fig. 5.8. Viviendas construidas en los años de este periodo

Las características comunes en algunas de las actuaciones promovidas de la construcción de estos edificios de viviendas son las siguientes:

TIPOLOGÍA DE BLOQUES	Bloques <4 plantas (1939-1955)	Bloques de 4 a 8 plantas	Bloques de 8 a 15 plantas
Medios de elevación	Sin ascensor	Con ascensor	Con ascensor
Estructura principal	Estructura vertical de muros de carga	Estructura en retícula de hormigón armado	Estructura en retícula de hormigón armado
Fachada	Fachada de ladrillo visto o	Fachada de ladrillo visto, cámara de aire y tabique	Fachada de ladrillo visto, cámara de aire y tabique
Aislamiento térmico	Aislamiento térmico no comúnmente utilizado	Aislamiento térmico no comúnmente utilizado	Aislamiento térmico no comúnmente utilizado
Carpintería exterior	Acero muy simples, (tipo Mondragón o similar)	Acero muy simples, (tipo Mondragón o similar)	Acero muy simples, (tipo Mondragón o similar)
Forjados	Forjados cerámicos autárquicos a base de vigueta y bovedilla	Forjados cerámicos autárquicos a base de vigueta y bovedilla	Forjados cerámicos autárquicos a base de vigueta y bovedilla
Instalaciones	Raramente instalación	Raramente instalación	Raramente instalación

¹¹⁴ Azpilicueta, Enrique. 2004. La construcción de la arquitectura de postguerra en España (1939-1962). Tesis doctoral. ETS de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid.

térmicas	de calefacción	de calefacción	de calefacción
----------	----------------	----------------	----------------

Tabla 5.1 El autor basado en el estudio tipológico documental de Azpilicueta

Del análisis de propiedades higrotérmicas de los cerramientos realizados en estudios específicos, sobre histogramas de cerramientos de este periodo y el que sigue, se desprenden, entre otras, las siguientes características según Ros García:

- Un 44% de los cerramientos posee riesgo de condensaciones interiores.
- De los cerramientos con posibilidad de condensaciones interiores un 59 constaba de aislamiento térmico y un 78 de doble hoja de cerramiento.
- Se concluyen en estos estudios, que la utilización de la doble hoja no se realizaba en unos primeros momentos, de una manera eficiente. De esta manera no solo no garantizaba el balance térmico de manera eficiente, sino que daba lugar a la aparición de patologías debidas a la condensación.

5.2.4 PERIODO DESDE 1960 A 1979.

A este periodo corresponde la mejora paulatina de la situación económica y de los medios materiales en todos los sentidos, incluyendo la construcción de viviendas. Continua siendo la promoción de vivienda social el motor incentivador de las actuaciones, así como la fuerte migración a las ciudades desde el ámbito rural.

Las características constructivas de los bloques asientan las tipologías desarrolladas en la tabla X.x. del apartado previo, consolidando la tipología de más de 4 alturas, continuándose la construcción de los barrios de nueva planta en el extrarradio de las grandes ciudades. La promoción va poco a poco pasando a manos privadas, incentivada por la aparición de una tipo social que comienza a comprar su vivienda, y se consolida una tenue todavía clase media-baja obrera.

		Bloques de 4 a 8 plantas	Bloques de 8 a 15 plantas
Medios de elevación	de	Con ascensor	Con ascensor
Estructura principal		Estructura en retícula de hormigón armado	Estructura en retícula de hormigón armado
Fachada		Fachada de ladrillo visto, cámara de aire y tabique	Fachada de ladrillo visto, cámara de aire y tabique
Aislamiento térmico		Aislamiento térmico no comúnmente utilizado	Aislamiento térmico no comúnmente utilizado
Carpintería exterior		Acero muy simples, (tipo Mondragón o similar)	Acero muy simples, (tipo Mondragón o similar)
Forjados		Forjados cerámicos autárquicos a base de vigueta y bovedilla	Forjados cerámicos autárquicos a base de vigueta y bovedilla
Instalaciones térmicas		Raramente instalación de calefacción	Raramente instalación de calefacción

Tabla 5.2. El autor basado en el estudio tipológico documental de Azpilicueta

5.2.5 PERIODO DE 1979 AL AÑO 2005.

Este periodo comienza con un episodio de relevancia, **la implantación de las Normas Tecnológicas de la Edificación (NTE)**. Son un conjunto de 155 normas establecidas por el Decreto 3565/1972, de 22 de diciembre por el Ministerio de la Vivienda (BOE 15/01/1973), y a las que el Real Decreto 1650/1977, de 10 de junio, que establece **las Normas Básicas de la Edificación (BOE 09/07/1977)**, da

la categoría de soluciones técnicas recomendables para los casos prácticos normales en edificación. Estas normas son de aplicación voluntaria, al poderse adoptar otras reglas y condiciones que cumplan igualmente las disposiciones básicas.

Por tanto las NTE traducen operativamente los conceptos generales contenidos en las Normas Básicas de la Edificación, cuando estas existen, desglosando el proceso constructivo en seis actuaciones: **diseño, cálculo, construcción, control, valoración y mantenimiento**. Estas seis fases pueden ser realizadas por técnicos distintos.

Las NTE tienen el carácter de soluciones y criterios técnicos homologados por la administración. Las normas tecnológicas se han agrupado en familias, subfamilias y tecnologías, asignando a cada una la letra inicial de su nombre para facilitar su memorización. El conjunto de las tecnologías quedó clasificado en las 8 familias siguientes:

- Acondicionamiento del terreno
- Cimentaciones
- Estructuras
- Fachadas
- Instalaciones (dentro de la cual se encuentra la subfamilia de salubridad y la tecnología de Ventilación, denominada como ISV)
- Particiones
- Cubiertas
- Revestimientos

En esta época comienza la transformación del recurso de la cámara de aire interpuesta, reduciendo su espesor, y complementándola con el inicio de incorporación de aislamiento térmico, predominando el poliestireno expandido. Los puentes térmicos no tienen protección y normalmente el comportamiento térmico de los cerramientos está únicamente comprobado en fase de proyecto, sin una preocupación excesiva en la ejecución.

En el año 1998 se aprueba la ley del Suelo¹¹⁵, que modifica la tendencia de la edificación y supone una proliferación de promoción de suelo para edificios residenciales en entornos programados, conocidos por PAUs¹¹⁶. La modificación fundamental que contempla esta nueva ley del suelo es que se puede convertir en suelo urbano cualquier suelo que no sea específicamente declarado como no urbanizable, agilizando la transformación del suelo urbanizable en urbano. Esto provocó un auge renovado en la construcción de viviendas en todo el territorio, que fue perdiendo fuerza con la aplicación del Código Técnico de la Edificación a partir del año 2006 y la modificación de la ley del suelo en el año 2007.

5.2.6 PERIODO DE 2005 A LA ACTUALIDAD.

En este periodo el aspecto más relevante es la introducción y aplicación del Código Técnico de la Edificación (CTE)¹¹⁷, de carácter obligatorio a la edificación residencial. La aparición de esta normativa ha supuesto una mejora en las garantías para el usuario en cuanto al comportamiento de la edificación en cuanto a los distintos aspectos que trata específicamente el Código Técnico

¹¹⁵ Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones, Publicado en BOE núm. 89 de 14 de abril de 1998

¹¹⁶ Programa de Actuación Urbanística (PAU) es, en España, el marco legal de desarrollo urbanístico de barrios completos definido en el Real Decreto 2159/1978 de 23 de junio

¹¹⁷ REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.

(seguridad estructural, seguridad en caso de incendio, seguridad de utilización y accesibilidad, ahorro de energía, protección frente al ruido, salubridad).

El CTE contempla los aspectos relacionados con edificios de uso principal residencial, con garajes y otros usos compatibles, espacios comunes y de instalaciones.

Estas dos normativas (CTE y RITE) modifican en gran medida la manera de construir y acondicionar los edificios), aunque su representatividad en número de viviendas no supone un cambio del parque edificatorio a nivel global.

5.2.7 NORMATIVA ESPECÍFICA PARA LA REHABILITACIÓN ENERGÉTICA.

Con anterioridad a la aparición del Código Técnico, las exigencias en cuanto a rehabilitación de viviendas no estaban contempladas en las Normas Básicas de la Edificación. El primer documento normativo que incluye la rehabilitación de edificios de vivienda es el CTE (2006) que incluye en su ámbito de aplicación (artículo 2 de la Parte I) la rehabilitación y remodelación como aspectos en los que será de aplicación esta normativa. Sin embargo, es a raíz de la introducción de modificaciones sucesivas, ya no solo se refiere a rehabilitación integral, sino cualquier modificación que se realice en el edificio, de cierta relevancia (CTE, 2013)¹¹⁸

En el caso de la ventilación y condiciones de salubridad, es el Documento Básico DB HS3 el que hace referencia a las condiciones necesarias que han de establecerse para cumplir con las necesidades mínimas. Este documento ha sufrido modificaciones mínimas desde su aparición y se está trabajando en su modificación para ajustarse en términos de calidad ambiental interior (niveles de contaminantes) a las directivas de eficiencia energética en los edificios, en su texto consolidado (EPBD, 2010/31/UE¹¹⁹). En cuanto a la eficiencia energética y el comportamiento de la envolvente térmica de las viviendas y el edificio, es el DB HE el apartado que establece las condiciones

¹¹⁸ Artículos 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 modificados por la disposición final undécima de la Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbana (B.O.E. 27 junio 2013). Vigencia 28 junio.

¹¹⁹ Parlamento Europeo, 2010. DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Diario Oficial de la Unión Europea, pp.13–35. Available at: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2010.153.01.0013.01.SPA.

5.3 DETERMINACIÓN DE VALORES TIPOLOGICOS Y CONSTRUCTIVOS MEDIOS DE VIVIENDA EN LOS DISTINTOS PERIODOS

Como se ha apuntado anteriormente, las características del parque edificatorio, han ido evolucionando con el avance de las soluciones técnicas disponibles, y la disponibilidad de medios económicos en niveles de clase media, dado que el parque residencial en bloque en España se compone en su mayoría de viviendas de protección pública de algún tipo. En todas las épocas desde el fin de la guerra civil, la promoción de vivienda social ha sido determinante en cuanto a la definición técnica de soluciones constructivas, y el referente general en cuanto a los tipos constructivos.

En cuanto a los aspectos constructivos de la edificación residencial en España, las modificaciones se ven relacionadas también a la existencia o no y a la aparición de las distintas normativas en cuanto a ellos. Así, se podría establecer una relación entre los periodos normativos según la clasificación realizada en el estado de la cuestión y el número de viviendas realizadas durante los mismos.

Normativa	Periodo de referencia	Número de viviendas	Porcentaje
Situación previa a la NTE ISV 75	1951-1979	7.487.167	29,59%
NTE ISV 75	1980-2005	10.650.825	42,10%
CTE DB HS3	2006-2015	2.513.924	9,94%

Tabla 5.3. Relación entre construcción de la edificación residencial en España y normativa vigente. Elaborado por el autor con datos de INE y MVIV. (2015)

5.3.1 ASPECTOS TIPOLOGICOS DE LOS EDIFICIOS RESIDENCIALES

A continuación se muestra un análisis de los aspectos tipológicos para establecer un edificio de referencia medio.

5.3.1.1 ALTURA MEDIA DE LOS BLOQUES DE VIVIENDAS EN ESPAÑA

La altura media de los bloques de edificación residencial en España ha variado con respecto a la técnica y las normativas en cuanto a seguridad estructural, seguridad en caso de incendios y accesibilidad (ascensores). Se puede observar en la figura 5.9. que el número de plantas media, **si restamos las alturas asociadas a viviendas unifamiliares (1 y 2 alturas)** es de 5 a 8 alturas. Siendo de 5 alturas el bloque más frecuente.

Número total de viviendas por número de plantas en edificio. Parque edificatorio residencial. España. Año 2013.

Fig. 5.9. Frecuencia por fecha de número de alturas de la edificación residencial en España Elaborado por el autor con datos de INE y MVIV. (2015)

5.3.1.2 NÚMERO DE OCUPANTES Y NÚMERO DE HABITACIONES POR VIVIENDAS

En cuanto al número de habitaciones por vivienda, considerando cocina y salón comedor en este conteo, este factor ha ido variando, sobre todo por las características sociológicas de las familias que ha ido variando, dándose sobre todo viviendas de 3 y 4 dormitorios en la época previa a la NTE, y durante el periodo reciente desde el año 2006.

Número total de viviendas por número de habitaciones. Parque edificatorio residencial. España. Año 2011.

Número total de viviendas por número de habitaciones. Parque edificatorio residencial. Edificación construida en el periodo desde 1961 a 2011. España.

Fig 5.10 y 5.11. Frecuencia por fecha de número de habitaciones por vivienda en edificación residencial en España Elaborado por el autor con datos de INE y MVIV. (2015)

5.3.1.3 SUPERFICIE MEDIA

La superficie media de las viviendas en España y su número de ocupantes está situado en una baja ocupación media, siendo de 2 a 3 la media de ocupación. En cuanto a la superficie útil media de las viviendas esta se sitúa entre los 61 y 90 m² de superficie útil.

Fig. 5.12. Frecuencia por fecha de número de ocupantes por vivienda y superficie útil de las mismas en edificación residencial en España Elaborado por el autor con datos de INE y MVIV. (2015)

5.3.2 ZONAS CLIMÁTICAS A CONSIDERAR

Las zonas climáticas suponen variación en cuanto a aspectos constructivos y condiciones de contorno para la ventilación de las viviendas como se ha observado en el estado de la cuestión, por la manera en que se desarrolla la ventilación en las viviendas, que depende en gran medida de la diferencia de temperatura y presión de viento en la fachada de la edificación, así como con sucede con la infiltración y exfiltración de aire en el interior de las viviendas. Estos factores afectan tanto a la calidad del aire interior como a la demanda energética que supone acondicionar este aire del interior de las viviendas. Es por ello, que a la hora de seleccionar un edificio de referencia no se establezca en una única zona climática de España, sino que se seleccione un abanico de ciudades representativas de todas las zonas climáticas de relevancia en el territorio.

En la actualidad las zonas climáticas establecidas en la normativa vigente, el Código Técnico de la Edificación, en cuanto a consideraciones energéticas se detallan en su Documento Básico de Ahorro de energía (DB HE1). En él se definen en cuanto a la severidad climática invernal y estival, mediante los valores climatológicos medios¹²⁰. Se han seleccionado un grupo de ciudades representativas dentro de estas características. Las ciudades estudiadas para la normativa de CTE DB HE1 (según tabla 5.4.) y que tomaremos como correlativas al CTE DB HS3 son:

Almería	Zona climática A4
Sevilla	Zona climática B4
Barcelona	Zona climática C2
Bilbao	Zona climática C1
Coruña	Zona climática C1
Madrid	Zona climática D3
Soria	Zona climática E1

SC (verano)	A4	B4	C4		E1
	A3	B3	C3	D3	
			C2	D2	
			C1	D1	
SC (invierno)					

Tabla.5.4. zonas climáticas según CTE DB HE1

¹²⁰ UNE 100.001-85.

5.3.3 ASPECTOS CONSTRUCTIVOS Y SISTEMAS EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EXISTENTE

Los aspectos constructivos que se han analizado en cuanto a su influencia en la ventilación en edificación residencial son:

1. Fachada y envolvente opaca
2. Huecos y carpinterías
3. Instalaciones de admisión y extracción de aire.
4. Instalaciones de acondicionamiento térmico

5.3.3.1 FACHADA Y ENVOLVENTE OPACA

Las fachadas construidas en España a lo largo del siglo XX se hicieron, en su mayoría, en fábrica de ladrillo de doble hoja. La amplia variedad de climas no exime en el resultado de ciertas coincidencias entre ciudades de zonas climáticas diferentes y disparidades dentro de los grupos climáticos establecidos en las distintas clasificaciones normativas. Esto, combinado con los periodos económicos y la evolución en la normativa constructiva, ha resultado en soluciones constructivas que se agrupan cronológicamente.

1900 – 1939: Durante este periodo se llevan todavía a cabo prácticas heredadas del siglo anterior basadas en la ley de masas. La eficacia de las envolventes y sus propiedades higrotérmicas, radicaban en su espesor, puesto que una sola capa debía solucionar los problemas mecánicos, térmicos y de estanqueidad. Las diferentes condiciones climáticas de las ciudades se resolvían entonces de la misma manera: el muro que en Barcelona tenía gran espesor para ser capaz de absorber una gran cantidad de agua antes de que el nivel de ésta alcanzara la cara interior, servía en Sevilla como masa de gran inercia para hacer frente a la alta radiación solar, de manera que la temperatura iba avanzando en la sección del muro, lo suficientemente ancha para impedir que el calor llegase al interior antes de la noche, periodo en el que se enfriaba al desaparecer la radiación.

En cualquier caso, las soluciones pertenecientes a esta época constituyen tan sólo un 12% del parque total de viviendas actual en España, siendo una tasa que alcanza el 20% en ciudades frías de interior como Soria, Huesca, Orense, Teruel y Zamora. Por tanto, las intervenciones diseñadas para la rehabilitación energética de estos casos se enfocan, fundamentalmente, hacia el aislamiento térmico. Cabe suponer que las deficiencias proyectuales de edificios de principios de siglo XX supongan problemas de otra índole como la ventilación insuficiente del interior o instalaciones inadecuadas, cuya modificación puede tener efectos muy positivos en el confort de las viviendas.

1940 – 1979: Algunos informes afirman la existencia de la cámara de aire en envolventes verticales con anterioridad a este periodo; sin embargo, no es hasta después de la guerra cuando se puede hablar de esta solución como un procedimiento estándar. La necesidad de economía de medios materiales acelera el tránsito de modelo constructivo de la envolvente de una capa con espesor considerable, a la realización de doble hoja y la introducción de elementos de cerramiento no macizos (perforados, huecos, etc...).

Los antecedentes se encuentran en el tabique pluvial mediterráneo, cuyo objetivo era impedir la entrada del agua en el interior al estar ventilada la cámara para la evaporación; o el conocido como

cavity wall inglés, que buscaba el ahorro de material a base de la reducción de espesores. (Ignacio Paricio¹²¹)

El acabado exterior es diferente según las zonas climáticas, consistiendo en una capa de mortero de cemento en las zonas de mayores precipitaciones y encalados en las más secas. En las ciudades costeras con elevados registros de humedad y pluviometría, se recubre la fachada con materiales con cierta capacidad impermeabilizante como placas de piedra, chapas continuas o azulejos.

Se trata de una solución que presenta problemas de estanqueidad al agua y al aire provocados por la unión rígida de las dos hojas, que no permite el movimiento y termina resultando en grietas y filtraciones.

En algunos casos figuraba ya el aislamiento térmico en el interior del muro, pero su eficacia y colocación en obra eran de dudosa validez y carecía de continuidad. **Esta solución constructiva, con las correspondientes variaciones de espesor en la hoja interior, se encuentra presente en el 45% de los edificios residenciales actuales en toda la extensión del país, por lo que será objeto de la elaboración de estrategias específicas de rehabilitación energética con aplicación sistemática y con garantías de funcionamiento.**

Sin embargo, a la hora de identificar las razones que justifican la repetición masiva de esta solución en toda la extensión del país, se encuentran (aparte de las históricas y económicas), básicamente a:

1. que responden y se adaptan a las distintas necesidades que se dan en las climatologías más predominantes.
2. sus características fundamentales como son la buena capacidad de evaporación de condensaciones
3. la respuesta a posibles filtraciones de agua inducidas por el empuje del viento o el contacto permanente.
4. la reflexión sin conducción excesiva de la radiación solar directa por parte de la envolvente al interior de la vivienda.

1980 – 2005: La entrada en vigor de la NBE-CT/79 aceleró el cambio a la inclusión del aislamiento térmico en la cámara de aire como solución extendida. Solución que ya se llevaba a cabo en algunas ciudades como Barcelona. El aislamiento térmico en fachada se generalizó como solución constructiva en toda la Península, exceptuando las ciudades costeras de la cuenca mediterránea y el sur, como Andalucía, Murcia y Comunidad Valenciana, donde las temperaturas suavizadas por el mar permitían cumplir con los valores de transmitancia térmica nominal (K_g) establecidos por la nueva normativa sin necesidad de incluir un material aislante. La escasa calidad de estos materiales y su defectuosa puesta en obra, hacen que muchas soluciones de este periodo no alcancen en su puesta en obra los parámetros normativos con que se realizaron y los mínimos estipulados en el presente Código Técnico o constituyan una calificación energética E, G o F. **Sin embargo, esta tipología de fachada permite mejoras constructivas, por lo que sigue siendo objeto y oportunidad de rehabilitación energética, pudiendo alcanzar una mayor eficiencia.**

A partir de esta época se inicia la inclusión de una capa de mortero interior a la capa exterior de fábrica de ladrillo es utilizada, sobre todo en climas con cierto grado de lluvia y humedad. Junto con la capa exterior de mortero, ha sido la solución más utilizada para regularizar la humedad en la

¹²¹ Paricio ,I, 2006. La fachada Ventilada y ligera: Bisagra.

fachada de ladrillo con cámara de aire interior. Tiene un doble efecto beneficioso de cara a la ventilación:

1. Regula la humedad que penetra en la cámara, absorbiendo gran parte de la misma y permitiendo su evaporación gradual. Al mismo tiempo que permite la salida de vapor de agua desde el interior, posibilitando que no quede fijo en el interior de la cámara, lo que es fuente de multitud de patologías, desde la aparición de mohos y microorganismos a la reducción de la capacidad de aislamiento térmico del aislante, que se da en muchos de los materiales utilizados.
2. Impide gran parte de la infiltración de aire¹²² producida en la parte opaca de la fachada al regularizar las grietas y huecos sin macizar del llagueado.

Como conclusiones de este periodo, se destacan las siguientes características de los cerramientos:

1. Prácticamente el 45% del parque nacional de viviendas actual pertenece a este periodo, por lo que una solución válida y eficaz a este tipo de secciones constructivas, aumentaría la calidad edificatoria de la mitad del volumen edificatorio residencial.
2. Al encontrarse aproximadamente el 80% del total de viviendas construidas en los dos periodos anteriores, las soluciones constructivas de doble hoja de fábrica de ladrillo (con o sin aislamiento) van a constituir el objeto principal de desarrollo de estrategias de rehabilitación energética, pudiendo suponer la estandarización de un sistema válido, eficaz y de fácil implantación, una subida radical en la calificación energética media de las viviendas españolas, y una bajada notable en las tasas de consumo de calefacción.

2006-2015: La tendencia a partir de la publicación del Código Técnico de la Edificación es a continuar con las técnicas constructivas que se llevaban a cabo a comienzos del año 2000 en materia de fachadas. Doble hoja de fábrica de ladrillo, e inicio de cambio al trasdosado interior con yeso laminado y aislamiento térmico interpuesto entre las dos hojas en la cámara de aire. Se comienza a producir un cambio de tendencia, en cuanto al tipo de aislamiento térmico, yendo de productos espumados y proyectados (p.e. Poliuretano proyectado) a productos rígidos (p.e. poliuretano extruido) de célula cerrada y aislamiento de fibra (p.e. lana de fibra mineral o de vidrio) para mejorar las cualidades acústicas a la par que las térmicas de la fachada¹²³.

En la página siguiente se muestra un resumen de las tipologías de fachada opaca más frecuentemente utilizadas en la arquitectura residencial española durante las distintas épocas. Las características se van a tener en cuenta de cara a la definición de los escenarios de simulación, tanto a nivel energético como en simulación de ventilación y flujo de caudal (medida de infiltración de aire).

¹²² Straube, J.F., Ueno, K. & Schumacher, C.J., 2012. Measure guideline: internal insulation of masonry walls, (July), pp.1–112.

¹²³ Ministerio de Fomento. Gobierno de España, 2010. Catálogo de elementos constructivos del CTE. , 3, p.141. Available at: http://www.codigotecnico.org/web/recursos/aplicaciones/contenido/texto_0012.html.

5.3.3.2 HUECOS Y CARPINTERÍAS

Las características del tratamiento de huecos en fachada dependen tanto de la carpintería como del vidrio. Ambos elementos se han desarrollado en gran medida a lo largo de la segunda mitad de siglo, alcanzando hoy en día valores impensables anteriormente, pero que necesitan de un desarrollo tecnológico que encarece enormemente los huecos en relación a la superficie opaca. En cuanto a los periodos de estudio se dan las siguientes características dentro de ellos:

1900 – 1939: Las carpinterías que se colocaban en las primeras décadas del siglo XX consistían en perfiles de madera de alta densidad con unos valores de transmitancia térmica óptimos, pero que no aseguraban la estanqueidad total al aire en las uniones.

1940 – 1979: A partir de los años 40 se empiezan a colocar carpinterías metálicas sin rotura de puente térmico que duplicaban la transmitancia pero garantizaban un sellado mucho más eficaz que las anteriores. Estos sistemas se han colocado hasta la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación, lo que permite asumir que el 80% de las viviendas españolas tienen este tipo de carpinterías.

1980 – 2005:: A partir de los años 80 se desvió la línea de desarrollo hacia los vidrios, que hasta entonces seguían consistiendo, fundamentalmente, en el monolítico de 6 milímetros de sección. **Podemos asimilar que aproximadamente la mitad de las ventanas del parque de viviendas español tiene vidrios dobles 4/6/4 con una transmitancia térmica de 3,3 W/m² °C, superando por primera vez y por 2 puntos la eficiencia de las carpinterías.** Para estos momentos las **soluciones más habituales de hueco** corresponden a la siguiente tabla:

	Vidrio	Carpintería	Protección. Solar
1940-1979	monolítico de 6 mm	metálica sin rotura de puente térmico	Persiana enrollable
	transmitancia térmica 5,7 W/m ² K; factor solar 0,85	transmitancia térmica 5,90 W/m ² K	
1980-2005	Doble de 4/6 /4mm	metálica sin rotura de puente térmico	Persiana enrollable
	transmitancia térmica 3,3 W/m ² K factor solar 0,75	transmitancia térmica 5,90 W/m ² K	

Tabla 5.5. Clasificaciones de ventanas en cuanto a características térmicas y de material durante los periodos de 1940 a 1980 y desde 1980 a 2006.

2006-2015: Código Técnico de la Edificación. El tratamiento de la carpintería en edificios existentes a partir de la implantación del CTE cumplen los siguientes límites de **transmitancia térmica** de huecos para las distintas zonas climáticas. Se han considerado los **valores límite del Código Técnico de la Edificación** en su modificación del año 2013, del DB HE1.

Valores máximos de transmitancias medias en W/m²K (CTE)

Zona Climática	α	A	B	C	D	E
Hueco a N/NE/NO	5,7	4,1	3,3	2,9	2,5	2,6
Hueco a S/E/O/SE/SO	5,7	5,5	4,3	3,3	2,9	3

Como contraste, resaltar que los valores máximos en la normativa **alemana** en referencia a los mismos elementos rondan **1,3 W/m²K**. Las opciones disponibles en el mercado nos ha dado una

visión sobre la cantidad de productos de alta calidad a precios razonables existentes. Los estándares de aislamiento que barajamos son de **2,7 W/m²K para el vidrio** y por debajo de **2 W/m²K para el marco**. De esta manera, se cumplen las exigencias de todas las zonas climáticas y se sitúa al edificio en unos estándares de aislamiento en lo referente al hueco acorde al siglo en que vivimos.

Permeabilidad al aire de las ventanas

La normativa que establece la clasificación en cuanto a la permeabilidad al aire de la ventana en la actualidad es la norma UNE EN 12207:2000. Esta norma permite caracterizar a las ventanas por unas curvas representadas en un gráfico de coordenadas logarítmicas, que expresan la fuga de aire en metros cúbicos por hora y metro cuadrado de superficie practicable (m³/h·m²) en función de la presión diferencial en pascals (Pa)¹²⁴. Se establecen en ella 4 categorías:

- Clase 1 hasta 50 m³/h·m² a 100 Pa
- Clase 2 hasta 27 m³/h·m² a 100 Pa
- Clase 3 hasta 9 m³/h·m² a 100 Pa
- Clase 4 hasta 3 m³/h·m² a 100 Pa.

Con anterioridad, en 1981 nos encontramos con la normativa previa que establecía la clasificación de las ventanas UNE EN 85208:81¹²⁵. En las figuras 5.13 y 5.14. se muestra la diferencia entre las 2 normas gráficamente. Se aprecia un aumento del requerimiento en cuanto a la clasificación, que pasa de 50, 20 y 7 m³/h·m² a 100 Pa en la UNE EN 85208:1981, a 50, 27, 9 y 3 m³/h·m² a 100 Pa en la UNE EN 12207:2000.

Fig. 5.14 Clasificación según UNE EN 85208:1981

Fig. 5.15. Clasificación según UNE EN 12207:2000

Gráfica x.x. clasificaciones de permeabilidad al aire durante los periodos de 1980 a 2005 y de 2006 en adelante.

Al no existir en esta clasificación la clase 0, podemos presuponer o estimar una cierta infiltración o permeabilidad basada en las características de las carpinterías anteriores a la época anterior a la normativa obligatoria. El IDAE en su documento de fundamentos técnicos para la calificación

¹²⁴ AENOR. Puertas y ventanas. Permeabilidad al aire. Clasificación. UNE EN 12207. Madrid. 2000.

¹²⁵ AENOR. Puertas y ventanas. Permeabilidad al aire. Clasificación. UNE EN 85208. Madrid. 1981.

energética de edificios existentes CE3¹²⁶ establece unos valores de permeabilidad para las ventanas existentes fabricadas con anterioridad a los periodos: anterior a 1960, de 1961 a 1975 y de 1976 a 1981. En la tabla X.x. se resumen la permeabilidad al aire de las ventanas considerada en la tesis, para ventanas de dimensiones 1,5x1,5 m².

Clase	Periodo normativo	Ancho de ventana	Alto de ventana	Permeabilidad a 100 Pa (m ³ /h·m ²)	Presión usual	Caudal de cálculo a 4 Pa (m ³ /h·m ²)	Caudal por ventana a 4 Pa (m ³ /h·m ²)
Previo a NTE ISV 75							
Clase 0	Anterior a 1960	1,5	1,5	200	4	0,11	0,24
	1961-1975	1,5	1,5	130	4	0,07	0,156
	1976-	1,5	1,5	80	4	0,04	0,096
Clase 0	NTE ISV 75 no prescrito	1,5	1,5	80	4	0,05	0,12
CTE DB HE1.							
CLASE 1	zonas A y B	1,5	1,5	50	4	0,03	0,06
CLASE 2	zonas C, D y E	1,5	1,5	27	4	0,01	0,032
CLASE 3	no prescrito	1,5	1,5	9	4	0,00	0,011
CLASE 4	no prescrito	1,5	1,5	3	4	0,00	0,004

Tabla 5.6. Permeabilidad al aire de las ventanas y puertas durante los distintos periodos normativos considerados. Elaborada por el autor.

La primera norma que establece una prescripción en cuanto a la permeabilidad al aire de las ventanas en edificación residencial es el CTE. En su documento CTE DB HE1, esta norma establece que la permeabilidad del aire de las carpinterías, medida con una sobrepresión de 100 Pa y referida a la superficie útil de la ventana, tendrá unos valores inferiores a los siguientes en relación con las zonas climáticas respecto a severidad climática de invierno del CTE:

- Para zonas climáticas A y B: 50 m³/h·m²; es decir, clase 1 como mínimo.
- Para zonas climáticas C, D y E: 27 m³/h·m²; es decir, clase 2 como mínimo.

¹²⁶ IDAE, unidad de Eficiencia energética de APPLUS, grupo Termotecnia de AICIA-Universidad de Sevilla, Instituto I. Cerdá, IETCC, U. de edificación y ordenación del territorio de L.., 2012. Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3,

Según Arranz¹²⁷, para permeabilidades al aire inferiores a 9 m³/h.m² debe preverse un sistema de renovación de aire independiente de las ventanas, y se debe informar a los usuarios de las necesidades mínimas de ventilación para evitar condensaciones en la cara interna de los cerramientos. Las bajas permeabilidades al aire están relacionadas con altos índices de atenuación al ruido aéreo, y viceversa.

Es decir, para bajas permeabilidades de aire se requiere sistema de admisión de aire adicional a las juntas de las ventanas. En España no es obligatorio el uso de este tipo de carpinterías tan estancas, y sin embargo, nos daremos cuenta de que con la permeabilidad establecida máxima (clase 1 y 2) no se cubre en situaciones de presión habituales la renovación de aire necesaria en ventilación residencial, debiéndose en su mayoría no al viento como se podría suponer sino a la diferencia de presión provocada por la temperatura y densidad del aire (efecto Bernoulli, ver *Estado de la cuestión*).

5.3.3.3 INSTALACIONES DE ADMISIÓN Y EXTRACCIÓN DE AIRE.

En este caso, nos encontramos con la circunstancia de que las instalaciones de ventilación no son usualmente consideradas como tales, y se contemplan a menudo sin darles la importancia necesaria (no aparecen a nivel estadístico, ya que no son “accionadas” y no producen un consumo energético directo). Podemos considerar las instalaciones de ventilación aquellas que posibilitan la entrada y salida de aire en la edificación. En el análisis normativo y de periodos que se ha realizado en el estado de la cuestión, podemos destacar la existencia de 3 periodos diferenciados en cuanto al aspecto de admisión y extracción de aire:

¹²⁷ Arranz, B., 2013. Optimización de la composición del hueco de fachada en materia de eficiencia energética. Propuesta de indicador como herramienta para el análisis integral del elemento acristalado, Tesis doctoral. UPM

Periodo anterior a 1979; anteriormente a la publicación de la NTE ISV 75 la admisión y extracción de aire en la edificación residencial estaba condicionada por la falta de sistemas específicos de extracción de aire y se produce tanto la admisión como la extracción por los huecos de fachada exteriores (ventanas y balcones) e interiores (puertas al descansillo de escaleras que hacen efecto chimenea).

Fig. 5.16. Periodo previo a la implantación de la NTE ISV 75. Esquema de ventilación por ventana, sin tiro natural vertical, salvo en ocasiones en cocinas para combustión y el tiro provocado por el hueco de escaleras. Elaborado por el autor

Periodo de 1979 a 2005; se implementa la NTE ISV 75 que condiciona en gran medida los modos constructivos en cuanto a ventilación, siguiéndose sus guías en la práctica con bastante frecuencia (cubre la edificación en bloque de hasta 20 plantas). Se establece en este momento una diferenciación entre estancias con admisión de aire y estancias con extracción de aire. Se establecen superficies mínimas de ventana ($1/30$ de la superficie útil) para la admisión de aire. Se establecen dimensiones mínimas de conductos de extracción de aire en baños y cocinas así como los modos constructivos que deben seguirse para no producir corrientes en sentido contrario en la última planta por ejemplo No se establecen caudales mínimos ni condiciones de ocupación.

Fig. 5.17. Periodo posterior a la implantación de la NTE ISV 75. Esquema de ventilación por ventanas, tiro natural o mecánico en baño y cocinas, de dimensionado estándar. Elaborado por el autor

En la siguiente tabla se resumen las características principales de los sistemas de ventilación en este periodo.

NTE ISV 75	1979 a 2006
Ámbito	Edificios residenciales de hasta 20 plantas
Diseño y dimensionamiento de sistemas de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> Entrada de aire por huecos en fachada exterior o patio. Se introduce tiro natural y forzado en baños y cocinas. Infiltración y apertura de ventanas
Cálculo de caudales de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> 1/30 de sup. Útil como ventilación practicable. Tiro natural por chimenea de piezas prefabricadas En baños entrada por rejilla y salida por tiro natural o forzado. 200x200 mm Ventilación en escaleras Un solo colector no podrá servir a más de siete plantas Ultima planta independiente. Todos los conductos deberán ser verticales
Cálculo de energía en ventilación	Se introduce control de mecanismos
Inspección de sistemas	si

Tabla 5.7. Periodo posterior a la implantación de la NTE ISV 75

Periodo de 2006 a la actualidad; a partir de la obligatoriedad de cumplimiento del CTE DB HS3, que establece las condiciones en las que se tiene que producir la ventilación en la vivienda, se desarrolla un cambio constructivo, que contempla los siguientes aspectos:

1. Se mantiene el esquema de estancias para la admisión (estancias vivideras como son el salón y los dormitorios) y las estancias en las que se produce la extracción de aire (estancias húmedas y con mayor producción de contaminantes, baños y cocinas).
2. Los conductos de extracción están obligados a tener un apoyo de extracción mecánica si no se pueden garantizar las condiciones de extracción (caudal) en todo momento, por lo que se generaliza el uso de extracción en cubierta.
3. Las aberturas para admisión de aire varían en función de los ocupantes medios de la estancia.
4. La ocupación se establece en términos del número y tamaño de los dormitorios.
5. No se diferencia el horario de ocupación en cuanto a la estancia en que se produzca esta.
6. No se contempla un nivel máximo de contaminantes.
7. Se establecen caudales mínimos de admisión y extracción, escogiéndose el mayor de ellos, asumiendo la existencia de infiltración, para que el sistema se considere equilibrado.
8. Se establece la infiltración únicamente en función de la permeabilidad al aire de las ventanas, que se supone suficiente para las zonas climáticas A y B (carpintería de clase 1) pero que requiere de aireadores de admisión de aire en el resto de las zonas climáticas (C, D y E).

CTE DB HS3:2009	2006-2013
Ámbito	El establecido en CTE. Edificios residenciales
Diseño y dimensionamiento de sistemas de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> • Se prescribe la ventilación natural, híbrida y mecánica. • Se determinan caudales de impulsión y extracción específicos por ocupante y por estancia. • Consideración del espacio multizona. Aberturas de paso • Se establecen condiciones de extracción de aire. • No se puede ventilar estancias desde otra estancias, salvo trasteros. • Estancias con admisión (secas) y con extracción (húmedas) • Se limita la infiltración por carpinterías según UNE EN 12207:2000 • Aireadores por encima de 1,80 del suelo.
Cálculo de caudales de ventilación	<ul style="list-style-type: none"> • Ventanas practicables serán de superficie al menos 1/20 de la superficie útil. • Se limita la infiltración por carpinterías según UNE EN 12207:2000 • Tiro natural o forzado por conducto • Dimensionamiento de chimeneas depende de zona climática y nº de alturas de edificación • En baños entrada por rejilla y salida por tiro natural o forzado. 200x200 mm • Ventilación en escaleras • Un solo colector no podrá servir a más de siete plantas • Última planta independiente. • Todos los conductos deberán ser verticales • Se equilibran caudales de impulsión y extracción.

Cálculo de energía en ventilación	<ul style="list-style-type: none"> Se introduce control de mecanismos
Inspección de sistemas	<ul style="list-style-type: none"> Si, cada 1 y 5 años

Tabla 5.8. Periodo posterior a la implantación del CTE (DB HS3)

Fig. 5.18. Periodo posterior a la implantación del CTE (DB HS3). Esquema de ventilación por aireadores, ventanas y extracción por conducto vertical de extracción en baño y cocina, con extracción en la salida del tiro. Elaborado por el autor.

En la siguiente tabla se muestran las principales diferencias en cuanto a ventilación y calidad de aire interior que nos encontramos entre los distintos escenarios, ya adelantado en el estado de la cuestión.

	Norma de obligado cumplimiento	Admisión de aire	Extracción de aire	Cálculo y dimensionamiento	Nivel máximo de contaminantes	Caudal mínimo de ventilación	Espacio multizona
PRE NTE ISV 75	No	Ventanas (Ventilación + infiltración)	Ventanas	Ninguno	No	No	No
NTE ISV 75	No	Ventanas (Ventilación + infiltración)	Tiro Pasivo (T.P.) o mecánico (T.M.)	Aproximado. Por superficie y estancias y extracción	No	No	Si
CTE DB HS3	Si	Ventanas+a berturas (se reduce infiltración)	T.P. T.M. o híbrido. Caudal mínimo de extracción	Detallado. Por estancias y ocupantes. Caudal equilibrado	No	Si	Si
EN 15251	Si*	Ventanas+a berturas (se reduce infiltración)	T.P. T.M. o híbrido. Caudal mínimo de extracción	Detallado. Por superficie y ocupantes. Infiltración	Si, por niveles de calidad ambiental	Si, por niveles de calidad ambiental	Si

Tabla 5.9. Comparativa de normativas seleccionadas como representativas para el establecimiento de los escenarios de estudio y análisis.

En los siguientes esquemas se muestra la diferencia en cuanto a infiltración, admisión y extracción en los distintos escenarios normativos, según el autor (escenario pre normativo) y . Holsteijn, R en .2012¹²⁸.

Fig. 5.19. Holsteijn, R. 2012 y el autor. Esquemas de admisión y extracción de aire en edificación residencial en bloque

5.3.3.4 INSTALACIONES DE ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

Las instalaciones térmicas se han ido cambiando y modificando con mayor frecuencia que las fachadas y carpinterías. Basando el análisis en datos del INE, Eurostat, el informe SPAHOUSEC¹²⁹ de IDAE y el informe del proyecto europeo TABULA¹³⁰, podemos establecer las siguientes consideraciones en cuanto a valores medios.

La mayor parte de las viviendas en las zonas C, D y E (representadas en las ciudades seleccionadas anteriormente por Bilbao, Coruña, Barcelona, Madrid y Soria) tienen calefacción individual en España el 38,55% de las viviendas, calefacción colectiva el 9,44% e instalación de refrigeración el 15,52% de las viviendas. Las viviendas con instalación de calefacción se concentran en las zonas climáticas C, D y E de severidad climática de invierno, mientras que las instalaciones de refrigeración se localizan sobre todo en las zonas 3 y 4 de severidad climática de verano. La figura 5.20. bajo estas líneas muestra las ciudades seleccionadas y el porcentaje de viviendas con instalaciones de acondicionamiento térmico.

¹²⁸ Holsteijn, Rob van et al., 2012. Final Report Task 3 User Requirements , Infrastructure Ventilation Systems. Sustainable Industrial Policy –Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems Contract No. ENTR / 2009/ 035/ LOT6/ SI2.549494 , pp.1–88.

¹²⁹ Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final. IDAE. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. 16 de julio de 2011.

¹³⁰ IEE Project TABULA (2009 - 2012)"Typology Approach for Building Stock Energy Assessment", Information about the international research project , performed from 2009 to 2012 with the support of Intelligent Energy Europe

Fig.5.20. Distribución de viviendas por tipo de instalación de acondicionamiento térmico. Parque edificatorio de ciudades escogidas por zona climática. España. 2011. INE, IDAE, EUROSTAT

Dentro de las viviendas con calefacción, en cuanto al tipo de energía final utilizada podemos establecer la siguiente conclusión. En las zonas con severidad climática invernal se tiende a gas natural y petróleo mientras que en las zonas A y B de baja severidad climática invernal, se utilizan fuentes menos eficientes de energía final, como calefacción eléctrica y de combustión poco recomendadas, como braseros y estufas portátiles.

Fig. 5.21. Distribución de viviendas principales por tipo de combustible en instalación de calefacción. Parque edificatorio de ciudades escogidas por zona climática. España. 2011. INE, IDAE, EUROSTAT

5.4 SELECCIÓN DEL PERIODOS NORMATIVOS PARA EL ANÁLISIS

En el análisis de la ventilación, en sus aspectos de calidad de aire interior y demanda energética asociada se ha detectado la oportunidad de realizar el análisis respecto a 3 escenarios normativos existentes en el edificio de referencia que se va a definir.

Estos escenarios normativos son:

- **Situación previa a la NTE ISV 75 (PRE NTE ISV 75)**
- **NTE ISV 75**
- **CTE DB HS3**

Además de estos, se incluirá el escenario al que tiende la edificación en la actualidad por la necesidad de avanzar hacia el cumplimiento de las directivas europeas de eficiencia energética en la edificación:

- **EN 15251**

En ellos se modificarán aspectos relevantes en cuanto a ventilación:

- La infiltración por la fachada se reducirá notablemente desde el primer escenario a los siguientes.

Fig.5.22. infiltración por m^2 de fachada y caudal medio por superficie de fachada. Elaborado por el autor.

En la gráfica sobre estas líneas se han establecido valores de permeabilidad al aire y superficie equivalente de infiltración basado en el tipo de construcción y los caudales de ventilación requerida según cada normativa. En el escenario del CTE se consideran 4, 5 y 6 ocupantes. En el escenario de EN 15251 las diferentes calidades (I, II y III).

- El caudal de admisión por las ventanas a partir de la NTE ISV 75 y con aireadores a partir de CTE DB HS3 y EN 15251. Como se puede observar en la figura 5.22. el caudal medio sufre variaciones según el escenario contemplado.
- La introducción de conductos verticales de extracción a partir de la NTE ISV 75 y con extracción mecánica a partir de CTE DB HS3 y EN 15251.

5.5 SELECCIÓN DEL ZONAS CLIMÁTICAS PARA EL ANÁLISIS

Para el escenario correspondiente al Código Técnico, en el que se diferencia por zonas climáticas, se ha introducido la variable de la localización respecto a la zonificación establecida en el documento básico de ahorro energético (DB HE1) en su anexo 1. Las ciudades que se han seleccionado para el análisis por las zonas climáticas contempladas son:

Almería	Zona climática A4
Sevilla	Zona climática B4
Barcelona	Zona climática C2
Bilbao	Zona climática C1
Coruña	Zona climática C1
Madrid	Zona climática D3
Soria	Zona climática E1

Tabla 5.10. Zonas climáticas seleccionadas para el análisis y ciudades de referencia.

Sobre el bloque de referencia se desarrollarán modelos de simulación en el software utilizado. En ellos se establecerán los distintos parámetros de simulación, los definidos para cada escenario, y las variables de simulación.

5.6 CARACTERÍSTICAS DEL EDIFICIO DE REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS

De la caracterización previa realizada en el capítulo, podemos extraer los aspectos de la edificación residencial media que nos servirá de base para realizar el análisis. Por periodos, la edificación media estaría situada entre el primer y segundo periodo normativo, (situación previa a la NTE y durante la vigencia de la NTE). Dentro de este periodo, es de especial importancia el número de edificios de viviendas que se produjeron como respuesta a la migración a las grandes ciudades que dio lugar a los desarrollos urbanísticos de vivienda social del tipo de “la Ciudad de los Ángeles”, “El poblado Virgen de Begoña”, “El poblado de Orcasitas”, “El poblado dirigido de Orcasitas”, “Proyecto de una ciudad verde en Alameda de Osuna”, “El poblado de Ciudad Pegaso”, “Almendrales”, “Caño Roto”, “Fuencarral”...¹³¹ Aunque estos desarrollos se comienzan en los años 50, su máximo desarrollo se alcanza en los años 60. Es en esta época cuando encontramos un mayor número de viviendas construidas, en 20 años alrededor del 30% del total del parque edificatorio residencial total. (Fortuny, 1974¹³², Jubert, 1974¹³³).

¹³¹ SAMBRICIO, C. (Ed), VV.AA., Un siglo de vivienda social (1903-2003), (Dos tomos), Catálogo de la exposición organizada por el Ministerio de Fomento, el Ayuntamiento de Madrid –EMV y el Consejo Económico y Social, Editorial Nerea, Madrid, 2003

¹³² Fortuny, J., 1974. La OSH y la ciudad : introducción a la política del suelo de la OSH. Cuadernos de arquitectura y urbanismo, (105), pp.48–51. Available at: <http://www.raco.cat/index.php/CuadernosArquitecturaUrbanismo/article/view/111827/139425> [Accessed November 24, 2015].

¹³³ Jubert, J., 1974. La OSH y la política de vivienda : la política de vivienda del estado y la OSH una cronología paralela. Cuadernos de arquitectura y urbanismo, (105), pp.42–47. Available at: <http://www.raco.cat/index.php/CuadernosArquitecturaUrbanismo/article/view/111826/139424> [Accessed November 24, 2015].

Fig. 5.23. Desarrollo de Can Badia durante 1971. Fortuny 1974.

Fig. 5.24. Desarrollo de San Cristóbal de los Ángeles Año 1964. Fuente: Comunidad de Madrid, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

Configuración constructiva

En la configuración constructiva de elementos con incidencia en el desarrollo de la ventilación encontramos las siguientes características:

1. Elementos de fachada: la construcción media corresponde a la fachada de **doble hoja de fábrica de ladrillo y cámara de aire, sin aislamiento térmico entre capas**. La infiltración por fachada es elevada, debido a la ocurrencia frecuente de grietas y fisuras en el llagueado de la capa de ladrillo y la falta de hermeticidad entre las carpinterías y la fachada.
2. Carpinterías: En cuanto a la configuración de las carpinterías y los huecos, por la edad del parque edificatorio, **la carpintería más frecuente**, al haberse sustituido muchas de las originales de acero, es la **de aluminio sin rotura de puente térmico. Corredera, y con una sola hoja**. En cuanto al vidrio, se considera la solución más extendida la de una o dos hojas, **tipo 4 mm o 4/6/4 mm de espesor con cámara de aire interpuesta** (a partir de los años 80).
3. La configuración media en cuanto a número de plantas de bloque es **de 5 a 8 alturas**.
4. La superficie media de la vivienda es de **entre 60 m² y 90 m²**.
5. **El número de estancias de la vivienda media, incluyendo el salón y la cocina, es de 5.**
6. Los sistemas de ventilación medios son:
 - a. Admisión de aire por ventanas
 - b. Extracción de aire por ventanas
 - c. Introducción de conductos verticales de extracción, tipo tiro natural, a partir del año 1975. De dimensionado según NTE ISV 75 (200x200 mm en tiros de hasta 7 alturas, que sirven a dos viviendas por planta, en una de las estancias de extracción, es decir, máximo 16 salidas por conducto vertical).
 - d. Infiltración de carpinterías elevada, (Permeabilidad al aire a 100 Pa de entre 200 y 130 m³/h•m²).

5.7 SELECCIÓN DEL EDIFICIO DEMOSTRADOR PARA EL ANÁLISIS Y LA TOMA DE DATOS EXPERIMENTAL

Se ha escogido el edificio de referencia para la realización de las simulaciones. Este edificio se ha determinado teniendo en cuenta la ocurrencia en cuanto a la tipología, el número de alturas, la distribución por plantas de viviendas, los ocupantes y la aplicabilidad de las conclusiones referidas al mismo. La utilidad de contar con un modelo que sea representativo del parque edificatorio a rehabilitar en España en los próximos años permite extraer conclusiones con cierta fiabilidad de resultados para un porcentaje representativo del mismo, teniendo siempre en cuenta que cada caso particular habrá de ser tratado de manera individualizada.

Tras el estudio tipológico efectuado en el capítulo se ha encontrado como representativo para el objeto de la presente discusión, un bloque de viviendas construido entre los años 60 y 80, de entre 5 y 8 alturas, de 2 a 4 viviendas por planta. Gran parte de la edificación de este periodo, previa a la reglamentación de la NTE ISV 75, se realiza sin aislamiento térmico y con carpinterías metálicas o de madera con alta permeabilidad al aire (clase 0 según norma UNE EN 12207:2000). En cuanto a los aspectos de ventilación y sus elementos, en este periodo, encontramos sobre todo viviendas cuya ventilación se consigue por medios de ventilación natural (diferencia de presión y viento como fuerzas motrices para el movimiento del aire), sin tiro natural ni forzado. En este tipo de ventilación, la impulsión del aire de renovación se realiza a través de las carpinterías, mediante sus juntas y la infiltración producida entre sus elementos, y la extracción del aire se produce de la misma manera. Se suele dar la extracción de los gases de combustión de la cocina a través de un conducto a cubierta. A finales del periodo se comienza a diseñar y realizar la ventilación contando con extracción por tiro natural y/o forzado, anticipando la aparición de la NTE ISV 75 (ver el capítulo de *Estado de la cuestión*). En este esquema marcado por la NTE se realiza la impulsión del aire de renovación a través de los *huecos en fachada* (carpinterías), mediante sus juntas y la infiltración producida entre los distintos elementos. Estos huecos practicables se dimensionan en torno a 1/3 de la superficie de iluminación y no menos de 1/30 de la superficie útil de la estancia. La extracción del aire se produce por conductos de extracción, por tiro natural, mediante chimenea a cubierta mediante conductos de elementos prefabricados. Las cocinas y gases de combustión se complementarán con extracción forzada por conducto hasta cubierta.

El edificio demostrador ha formado parte del proyecto SIREIN+, proyecto que surge ante el escenario de crisis en el sector de la construcción y la necesidad de facilitar la rehabilitación energética profunda de la edificación existente en España, siguiendo las Directivas Europeas 2002/91/EC, 2010/31/EU y 2012/27/EU de eficiencia energética. Con él se pretende hacer del problema una oportunidad: la rehabilitación energética de la edificación existente como solución a la necesaria reconversión en términos de innovación tecnológica y de creación de empleo, que mejore la situación de estancamiento actual del sector.

El proyecto SIREIN+ se propone **posibilitar la rehabilitación energética desde un punto de vista integrador, aportando sistemas de soluciones técnicas efectivas dirigidas a obtener el grado óptimo de mejora en eficiencia energética al mínimo coste, con unas condiciones financieras atractivas para el usuario, promotor o propietario final.**

Como parte de la investigación realizada por el autor y dentro del proyecto SIREIN+¹³⁴ se ha escogido un edificio dentro del ARI (Área de rehabilitación integral) de Ciudad de los Ángeles, distrito de Villaverde, Madrid. Este distrito fue construido entre finales de los años 50 y principio de los años 60, cuenta con unas 8000 viviendas en 485 edificios de similar tipología a la descrita en el párrafo anterior y tiene una población aproximada de 24.250 habitantes. El barrio y el edificio son de protección pública, y el poder adquisitivo de los habitantes es correspondiente a clase media baja, y que formó parte de las intervenciones urbanísticas de finales de los 50 y principios de los años 60 como respuesta a la migración hacia las grandes urbes y el abandono del ámbito rural. En este edificio se ha realizado una intervención de rehabilitación de envolvente mediante insuflado de borra de lana de vidrio. Se han realizado los estudios previos, toma de datos, simulaciones, además de la monitorización de manera previa y posterior a la intervención en este edificio. La definición de la toma de datos y la monitorización se describe en el capítulo de investigación experimental.

Fig. 5.25. Vista sur del edificio demostrador

¹³⁴ “SIREIN+: Sistema Integral de Rehabilitación Energética” (IPT-2011-1980-920000). Entidad financiadora: MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN dentro del programa INNPACTO 2011. Entidades participantes: SAINT GOBAIN, UPM, TECNALIA, EMVS, R7 CONSULTORES, KOMMERLING, ENERES-Fernández Molina.

Fig. 5.26. Plano del Área de Rehabilitación integral de Ciudad de los Ángeles, Madrid, y localización de edificio demostrador en Calle "La canción del olvido" nº28

Fig. 5.27: Alzado norte de edificio de referencia

Fig. 5.28. Planta tipo acotada de edificio de referencia

El edificio, construido en 1963, se distribuye en 2 viviendas por planta, en 8 alturas, con un total de 16 viviendas. Cuenta con ascensor y se han incorporado instalación de telefonía, el gas ciudad, instalación de electricidad, inexistentes en la edificación original. Durante anteriores rehabilitaciones no programadas, de carácter privado, se produjeron obras en la cimentación y se suplementó la estructura, de pilares y zapatas de hormigón armado. En cuanto a la configuración interior de las viviendas, en la mayoría de ellas se suprimió un dormitorio, dando ese espacio al salón, se cerraron los tendederos, incluyéndolos en la superficie de la cocina, y se cerró el acceso al baño a través del pasillo, dándole acceso a través de la cocina y convirtiéndolo en cuarto de lavado, o despensa. Solo dos de las viviendas del edificio no han realizado las intervenciones descritas. (1ª derecha y 4ª derecha). Asimismo, el resto de los pisos cuentan con instalación de gas ciudad y calefacción por radiadores modulares de aluminio extrusionado, y caldera estanca, salvo el piso 5ª izquierda, cuya calefacción es eléctrica por acumulación mediante aceite en radiadores modulares de acumulación.

En cuanto a la descripción del cerramiento opaco del edificio, se trata de un cerramiento cerámico de ladrillo de doble hoja con cámara de aire, correspondiente como cerramiento tipo B1 en las fichas desarrolladas en la parte previa de este capítulo (Figura 5.13.) Las capas y la resistencia y transmitancia térmica del cerramiento completo existente en el demostrador que componen dicho elemento así como sus propiedades físicas¹³⁵ se especifican a continuación en la Tabla 5.11. Dentro de la experimentación realizada en el proyecto SIREIN+, se ha realizado el aislamiento mediante inyección de borra de lana de vidrio en el interior de la cámara de aire entre las hojas de fábrica de ladrillo¹³⁶.

CAPAS		DENSIDAD ρ (kg/m³)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA λ (W/mK)	ESPESOR e (m)	RESISTENCIA TÉRMICA (m² K/W)
1	Capa de aire exterior.	--	--	--	0,040
2	Revestimiento mortero de cemento	1525,000	0,800	0,020	0,025
3	Fabrica ladrillo perforado (1/2 pie)	1140,000	0,694	0,120	0,173
4	Cámara de aire (no ventilada)	-	-	0,040	0,180
5	Tabique LH sencillo	1000,000	0,444	0,040	0,090
6	Enlucido de yeso	1150,000	0,570	0,015	0,026
7	Capa de aire interior.		--	--	0,130
				Rtotal	0,664
				U (W/m²K)	1,51

Tabla 5.11. Caracterización de capas de fachada y transmitancia del cerramiento opaco en edificio demostrador del proyecto SIREIN+

Se ha contrastado la transmitancia de la fachada opaca teórica, mediante medición en una de las viviendas. La medición ha consistido en la colocación de un sensor en el exterior de la vivienda y otro superficial en la cara interior del cerramiento para, mediante la comparativa de temperaturas interior-exterior, obtener el valor de la resistencia térmica que posee el muro. En lo relativo al sensor interior considerado como termómetro de contacto, siguiendo lo establecido en la norma UNE-EN ISO 7726:2002¹³⁷, se ha colocado el sensor en tres puntos aumentando el contacto entre los sensores de temperatura y la superficie mediante una pasta conductora del calor. El sensor utilizado ha sido

¹³⁵ Se han empleado los valores específicos de los materiales según lo especificado en el “Catálogo de Elementos Constructivos”, CTE, 2010.

¹³⁶ Sergio Rodríguez Trejo, Belén Hernández Fenoll, Cristóbal Contreras Pedraza, Sergio Vega Sánchez-. 2014 “Edificios de ECN mediante el sistema combinado de inyección en cámara y solución de puentes térmicos. Demostrador a escala real: edificio de viviendas”. Comunicación publicada en el II Congreso EECN, Edificios Energía Casi Nula.

¹³⁷ AENOR, 2002. UNE-EN ISO 7726:2002 “Ergonomía de los ambientes Térmicos. Instrumentos de Medida de las Magnitudes Físicas”. Anexo F, Medición de Temperatura Superficial (pag.55).

cordialmente cedido por el grupo ABIO del departamento de construcción y tecnología arquitectónicas.

El protocolo seguido ha sido el siguiente:

Pre- montaje:

- 1.1. Configuración de equipo, según el programa de medición:

Criterio de inicio: Inicio tecla en instrumento

Establecer intervalo de medición: 10 min.

Criterio de finalización: No (hasta completar memoria)

Situación: Asignar código a vivienda

Día de montaje:

- 1.2. Instalación del equipo, receptor interior en el muro (sonda triple con 3 puntos) y receptor exterior atado a barandilla o barra metálica. Poner protector solar.
- 1.3. Confirmación de la descripción del muro que fue facilitada
- 1.4. Toma de foto de la instalación interior
- 1.5. Comprobación de que el aparato está midiendo (toma de foto de que se ha iniciado la medición).

Recogida del equipo:

- 1.6. Toma de foto de la medición obtenida antes del desmontaje.
- 1.7. Desmontaje del equipo.

Se ha realizado este ensayo en dos viviendas, uno en la que se ha insuflado el aislamiento y otro en la vivienda sin intervenir, en ambas ocasiones en la fachada norte.

Fig.5.29. Aparato de medición TESTO 435

Fig.5.30. Colocación de sensores superficiales interiores

A continuación se muestran las gráficas de datos recogidos a los largo de las 24 horas de duración de los ensayos. En ellas se observa cómo los valores de transmitancia oscilan más en el caso de la vivienda sin insuflar con valores desde los 1,4 a los 2,5 W/m²K mientras que en la insuflada son datos más constantes entre los 0,24 y los 0,4 W/m²K. De este modo, se han obtenido las siguientes mediciones:

VIVIENDA ENSAYADA	MEDICIÓN DE TRANSMITANCIA (W/m²K)	REDUCCIÓN (%)
5ª Izda. (sin aislar)	1,67	-
4ª Dcha. (aislada)	0,31	81,4

Tabla 5.12: Reducción de transmitancia térmica de fachadas norte del demostrador

La caracterización del edificio demostrador se ha realizado de manera exhaustiva, analizando todos los aspectos constructivos y de instalaciones y medición de transmitancia térmica y análisis mediante termografía infrarroja. En este análisis se han realizado fichas individuales de todas las viviendas. En la página siguiente se muestra una de las fichas.

PROYECTO SIREIN +**PROYECTO DEMOSTRADOR DE INYECCIÓN EN CÁMARA**

CANCIÓN DEL OLVIDO nº 28, CIUDAD DE LOS ÁNGELES, MADRID

VIVIENDA: **2º IZDA.**

planta tipo_e: 1/75

ZONA SIN CÁMARA: R radiador A armario						
RADIADOR:		R1	R2	R3	R4	R5
	tipo:	AL extrus.	AL extrus.	AL extrus.	AL extrus.	AL extrus.
	caract.:	superficial	superficial	superficial	superficial	superficial
	dimen.:	80x58	80x58	65x58	80x58	80x58
LÍNEA DE CALEFACCIÓN						
CALDERA						
CONTADOR: tipo: BK4G4/nº 93510578/1993						
medida: 18101						
CAPITALIZADO						
DOBLE VENTANA						
PROTECCIÓN SOLAR: P persiana enrollable ext. E estor C cortina						
TERMÓGRAFA:	Identificación:	T1	T2	T3		
	Identificación:	T6	T7	T8		

PROYECTO SIREIN +**PROYECTO DEMOSTRADOR DE INYECCIÓN EN CÁMARA**

CANCIÓN DEL OLVIDO nº 28, CIUDAD DE LOS ÁNGELES, MADRID

DATOS DE LA VIVIENDA:

PISO: 2º Izda.
 VECINO: Manuel Berrocal (Presidente)
 TLF CONTACTO: 91.3170639

SISTEMA DE CALEFACCIÓN:

GENERACIÓN: Tipo: Caldera/ Vaillant/ Turbo Tec Classic
 Combustible: Gas natural
 Antigüedad: <5 años
 Estado: bueno

FACHADAS:

GENERAL: Doble ventana: no
 Carpintería exterior: metálica sin rpt
 Vidrio: simple
 Persiana: PVC
 Acabado interior: Gotelé blanco y crema

NORTE: Protección solar exterior: no
 Carpintería exterior: aluminio sin rpt
 Vidrio: doble (4.6.4)
 Persiana: aluminio lacado en blanco

SUR: Protección solar exterior: no

ESTE: Protección solar exterior: no

OESTE: Protección solar exterior: no

COMENTARIOS/NOTAS:

Bomba de calor empleada sólo como generador de frío

Fig 5.31. Fichas de vivienda individual (2º izqda.) de edificio demostrador utilizadas en el proyecto SIREIN+

Fig. 5.32. Reportaje de termografías tomadas del exterior del edificio demostrador utilizadas en el proyecto SIREIN+

En las termografías tomadas desde el exterior se puede observar como la estructura matricial de hormigón armado se muestra como puente térmico en la fachada de ladrillo enfoscado al exterior. Los puntos más fríos corresponden a la parte que está en contacto con la temperatura exterior. El edificio no consta de aislamiento térmico, salvo alguna actuación individual en el piso 3º y 4º izquierda.

Fig. 5.32. Detalle de termografía exterior en fachada sur: 13.Nov.2013

En la página siguiente podemos observar las termografías tomadas desde el interior. Se puede ver la incidencia de los puentes térmicos, la caracterización del llagueado de la pared de rasillas y los capialzados como puntos de pérdida de calor de la vivienda. Las ventanas son uno de los puntos más débiles en este edificio debido a la infiltración y a la elevada transmitancia de las carpinterías y el vidrio.

Fig. 5.33. Detalle de termografía interior en piso 8º dcha: Fachada sur-partición interior

6 ANÁLISIS NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DE LOS DISTINTOS ESCENARIOS DEFINIDOS EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL ESPAÑOLA

Una vez definidos los escenarios en los que se va a realizar el análisis y el edificio de referencia que vamos a tomar como base para las simulaciones y las mediciones continuas de calidad de aire interior (CAI) en este capítulo se desarrolla el análisis de la demanda energética asociada a la ventilación y acondicionamiento térmico y la calidad del aire interior, en los escenarios establecidos y respecto a las variables tomadas en consideración en cada uno de ellos, según la metodología de análisis establecida en el capítulo 2. Un aspecto importante a la hora de desarrollar un análisis numérico y de simulación es el establecimiento del modelo de referencia de manera que los resultados puedan ser contrastados. En el caso de la presente tesis las mediciones de CO₂ en el edificio demostrador ha posibilitado el contraste del modelo creado en el software utilizado (CONTAM) con la medición realizada en las viviendas monitorizadas. Los objetivos de este capítulo son:

1. Validar el modelo y la fiabilidad del software para analizar la calidad del aire interior.
2. Analizar los distintos escenarios con sus variables en cuanto a calidad de aire interior y demanda energética asociada a acondicionamiento térmico y ventilación.
3. Relacionar ambos análisis
4. Realizar un análisis de la calidad de aire real existente en una muestra representativa del parque edificatorio residencial español.

6.1 INTRODUCCIÓN

El propósito del capítulo consiste en analizar las condiciones de calidad de aire interior y demanda energética asociada a los sistemas de acondicionamiento térmico y ventilación en la vivienda en España, tanto desde el punto de vista de análisis numérico (modelización) como con toma de datos experimentales y monitorización en edificio de escala real. Con este objeto se han definido con anterioridad en la tesis:

1. **La metodología** a usar para el análisis con las condiciones de contorno y las variables establecidas en cada caso.
2. **Los periodos normativos de referencia**, que establecen condiciones de diseño y dimensionamiento de los sistemas de ventilación que se incorporarán al modelo para analizar las viviendas con los cambios técnicos producidos cronológicamente.
3. **Las zonas climáticas de referencia**, tomando como casos singulares ciudades representativas de las mismas, para la obtención de datos climáticos medios.
4. **El edificio de referencia, fruto de la caracterización de la edificación residencial española**, tomado como base para realizar el modelo informático para el análisis.
5. **El edificio demostrador a escala real**, que permitirá tanto ejecutar un análisis experimental con toma de datos (continua y puntual) de las condiciones de calidad del aire interior como contrastar y validar el modelo informático definido para el estudio de los casos.

Este análisis se va a realizar, como se ha comentado anteriormente, en dos vertientes:

1. **Análisis numérico mediante modelización en software** específicos de:
 - Calidad del aire interior, caracterizando distintos aspectos asociados a la misma mediante el software CONTAM v3.1.
 - Demanda energética asociada a la ventilación y acondicionamiento térmico mediante simulación en DesignBuilder 4.5 con motor de cálculo EnergyPlus v8.1.
2. **Análisis experimental, mediante toma de datos, de la calidad del aire interior del parque edificatorio residencial en España.** Este análisis se realiza en dos vertientes:
 - Análisis de medición puntual de las condiciones de calidad del aire en mediciones cortas en distintas viviendas. El objetivo de este análisis es caracterizar la presencia de contaminantes específicos (formaldehído y Compuestos Orgánicos Volátiles) en las viviendas características construidas durante los distintos periodos normativos definidos.
 - Análisis de medición continua en edificio demostrador. El objeto de este análisis es por un lado permitir el contraste de las simulaciones con los datos de un demostrador a escala real y por otro definir las condiciones de calidad del aire interior en un periodo prolongado de tiempo y observar su evolución en condiciones reales.

Este esquema se puede visualizar gráficamente en la figura(X) mostrada en la página siguiente. En ella se observa la importancia del elemento de validación. Este punto es importante al permitir la corroboración y la adecuación tanto de la herramienta como del modelo utilizado, para la obtención de los datos objeto de la investigación.

Fig. 6.1. Esquema metodológico del análisis dentro de la investigación de la tesis doctoral.

Como se explica en el informe de evaluación del software COMIS encargado y auspiciado por la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 1996¹³⁸) el ajuste y evaluación de los programas de simulación de flujos han de ser testados con respecto al modelo definido, y aún en estos casos, variaciones importantes entre la medida real y la simulación pueden producirse por la falta de control sobre alguna de las variables y en otros casos por errores en la simulación. Al mismo tiempo se asume en general en distintos software de simulación que las diferencias de la simulación con respecto a las mediciones reales pueden llegar al 25 y 30%, en muchas ocasiones por el comportamiento del usuario y la dificultad de la caracterización de sus hábitos, en muchas ocasiones cambiantes (CORDIS, 2010)¹³⁹. Se puede en determinadas circunstancias.

Como parte de la investigación realizada, dada la elevada incertidumbre y dificultad de caracterización con respecto al cálculo de flujo de aire en el interior de la edificación, se ha diseñado un esquema para verificar la adecuación del modelo a la realidad en un porcentaje aceptable, para desarrollar con el mismo el resto de los análisis.

El sistema, solución intermedia entre la verificación de todos los escenarios con el programa y la ausencia de verificación y confianza plena en la definición de las condiciones de contorno, pretende dar validez a la metodología de obtención de datos para los distintos escenarios que se van a analizar. El proceso definido es el siguiente:

1. Toma completa de datos de partida del demostrador de los factores identificados como relevantes en los resultados de calidad de aire interior.
2. Definición ajustada a la realidad del modelo de simulación definido en el software CONTAM v3.1.
3. Obtención de los datos climáticos medios.
4. Toma de datos de monitorización de CO₂ en el salón de las viviendas del edificio demostrador para comparación con el modelo.

¹³⁸ IEA. 1996. Annex 23: Multizone Air Flow Modelling. Evaluation of Comis. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne LESO. PB, Institute of Building Technology. Páginas VII y VIII.

¹³⁹ EeB.NMP.2013-4 Integrated control systems and methodologies to monitor and improve building energy performance

5. Ajuste de los parámetros variables, como número de usuarios y presencia en la estancia.
6. Comparación de los valores de CO₂ del modelo definido y calculado con los valores obtenidos en un periodo de tiempo establecido. (10 días).
7. Comparación de periodos de tiempo (horas) en concentraciones de CO₂ en el periodo establecido como contraste.

6.2 DEFINICIÓN DE LOS ESCENARIOS Y VARIABLES DEL ANÁLISIS

En el capítulo de metodología se ha descrito el software a utilizar y las mediciones realizadas así como el esquema del proceso y la definición del modelo. A continuación se va a describir los parámetros tenidos en cuenta para la validación en el edificio demostrador.

Proceso de simulaciones

Las simulaciones se han realizado con el **programa CONTAM 3.1** para la determinación de caudales de aire y concentraciones de contaminantes y el **programa designBuilder v3.4** con el motor de cálculo de simulación energética **EnergyPlus v8.1**, del Departamento de Energía de Estados Unidos de América, para la determinación del consumo y demanda energética asociada a los sistemas de ventilación y acondicionamiento térmico. Asimismo se han realizado mediciones en el edificio demostrador para llevar a un contraste con las simulaciones. Estos datos obtenidos en tiempo real durante el periodo de tiempo en que se produjeron las mediciones in situ se han utilizado para validar las simulaciones y ajustar los modelos en la manera más cercana a la realidad. Muchos factores, como son el usuario y la realidad constructiva del edificio real hacen que las simulaciones sean una aproximación al comportamiento en condiciones físicas reales pero su validación y ajuste fino permiten extractar conclusiones y realizar simulaciones en otras condiciones teniendo una confianza fundada en su verosimilitud.

En el proceso de simulación se han seguido por tanto las siguientes fases:

FASE 0- Definición del modelo y toma de datos de monitorización.

FASE 1.- Validación de modelo en el programa CONTAM con las mediciones in situ

FASE 2.- Determinación de resultados para las distintas normativas de referencia y parámetros asociados por medio del programa CONTAM v3.1.

FASE 3.- Determinación de resultados para las distintas normativas de referencia y parámetros asociados por medio del programa designBuilder v3.4

En el proceso de simulación se ha determinado realizar simulaciones condicionadas por los siguientes factores:

1- **Normativas de referencia.** Las normativas y sus condiciones vienen explicadas en el apartado correspondiente del capítulo **Estado de la cuestión.** Estas son las normativas seleccionadas para la simulación:

- Normativa previa a NTE-ISV-75
- Normativa NTE-ISV-75 y normativa UNE EN 13645:2004 para los cálculos de ventilación.
- Normativa CTE DB HS3 para dimensionamiento y diseño

- Normativa UNE EN 15251:2008 y normativa UNE EN15242:2007 para los cálculos de sistemas.
 - o Categoría de calidad I
 - o Categoría de calidad II
 - o Categoría de calidad III

En cuanto a las condiciones de cálculo de caudales, se han calculado las diferentes situaciones dadas en los distintos escenarios normativos en cuanto a la admisión, extracción y dimensionamiento de sistemas. Se muestran a continuación, las fichas de todos los escenarios normativos según el número de ocupantes (en la normativa CTE, en el resto no supone una variación de caudal total) y las variaciones por calidad de aire esperada (EN 15251:2007).

Las tablas que se muestran en las páginas siguientes corresponden al cálculo teórico según la normativa aplicada, de los caudales de ventilación, dimensionamiento de elementos y renovación de aire esperada teórica, que sufrirá modificaciones tras la simulación, en condiciones dinámicas.

Para los escenarios PRE NTE ISV 75 y NTE ISV 75 se ha calculado por infiltración y ventilación natural con tiro térmico el caudal teórico según la norma UNE EN 13465:2004(ver *Estado de la Cuestión*). En la página siguiente se muestra ejemplo de tabla de cálculo. Para CTE DB HS3 y UNE EN 15251 se muestran las tablas de cálculo y dimensionamiento, más intuitivas por la claridad de las normas en este aspecto.

Tipo de edificio	Edificio de 8 plantas, con dos viviendas por planta con escalera interior y puerta de entrada. Viviendas de tres dormitorios, salón, cocina y dos baños.		
Tipo de vivienda	Tipo 1. Tres fachadas expuestas al viento. Norte, sur y este Tipo 2. Tres fachadas expuestas al viento. Norte, sur y oeste		
Pendiente del tejado	0°		
Sistema de ventilación	Natural		
	Conducto extractor	0,04 m ²	Extractor en cocina y baños
	Extractor con funcionamiento normal		
	H _{extractor}	=24 m	
	Entradas de aire	=22 cm ²	Una en cada habitación, dos en la sala de estar
Geometría del edificio	H _{edificio}	=24 m	
	H _{apartamento}	=2,5 m	
	V _{apartamento}	=166 m ³	
Fuga global	Referencia de apartamento	N ₅₀ (h ⁻¹)=5,5 según	Exponente n=0,67
Distribución de fugas	Tejado 0%	Fachada 1 (sur) 29% Fachada 2 (norte) 32% Fachada 3 (oeste) 10% Fachada 4 (este) 10%	Interna 29%
Temperatura	Interior Θ _R =20°C	Exterior Θ _R =5,5°C	
Protección al viento	Normal		
Velocidad del viento	V=3 m/s	Procedente del norte	
Otros parámetros de entrada			
C _{vent1} =6,78	C _{vent2} =1,69	C _{vent 3} =1,69	C _{extractor} =30,70
Cp1=+0,25	Cp2=-0,50	Cp3=0	Cp4=0
Cp ^{roof} =-0,60	Pendiente del tejado < 10%, protección normal.		
Cp ^{corr} =-0,10	Extractor con funcionamiento normal.		
Cp ^{duct} =	Cp ^{roof} + Cp ^{corr} =-0,60-0,10=-0,70		

CTE DB HS3- 4 ocupantes

CTE DB HS3	Estancia	Superficie	Usuarios	Caudal exigido (l/s)	Horario de ocupación	Volumen de estancia	Ventanas (m ²)	Clase 1 de ventana Caudal a 4Pa (m ³ /h·m ²)	Aberturas de admisión/ext. ración (cm ²)	Abertura de paso (cm ²)	Q (l/s)	Q (m ³ /h)	Infiltración (m ³ /h)	Horario de ocupación	Ach
	salón	20	4	3	18h_22h 15h_16h	50	6,67	0,06	48	70	12	43	0,96	18h_22h 15h_16h	0,27
	dorm1	10	2	5	22h_8h	25	3,33	0,06	40		10	36		22h_8h	0,44
	dorm2	10	1	5		25	3,33	0,06	20		5	18			
	dorm3	8	1	5		20	2,67	0,06	20		5	18			
Impulsión										70					0,71
Extracción										70					0,01
	cocina	8		2	8h_9h 14h_15h 21h_22h	18,4	2,67		67	70	16,79	60,45		8h_9h 14h_15h 21h_22h	
	baño 2	4	1	15		9,2	1,33		63		15,74	56,67			
Caudal CTE DB HS3	0,48 l/s/m ²	68				166					32,5	117,12			0,71

CTE DB HS3- 5 ocupantes

CTE DB HS3	Estancia	Superficie	Usuarios	Caudal exigido (l/s)	Horario de ocupación	Volumen de estancia	Ventanas (m ²)	Clase 1 de ventana Caudal a 4Pa (m ³ /h·m ²)	Aberturas de admisión/ext. ración (cm ²)	Abertura de paso (cm ²)	Q (l/s)	Q (m ³ /h)	Infiltración (m ³ /h)	Horario de ocupación	Ach
	salón	20	5	3	18h_22h 15h_16h	50	6,67	0,06	60	70	15	54	0,96	18h_22h 15h_16h	0,33
	dorm1	10	2	5	22h_8h	25	3,33	0,06	40		10	36		22h_8h	0,55
	dorm2	10	2	5		25	3,33	0,06	40		10	36			
	dorm3	8	1	5		20	2,67	0,06	20		5	18			
Impulsión										70					0,88
Extracción										70					0,01
	cocina	8		2	8h_9h 14h_15h 21h_22h	18,4	2,67		84	70	20,92	75,31		8h_9h 14h_15h 21h_22h	
	baño 2	4	1	15		9,2	1,33		78		19,61	70,61			
Caudal CTE DB HS3	0,60 l/s/m ²	68				166					40,5	145,92			0,88

CTE DB HS3- 6 ocupantes

CTE DB HS3	Estancia	Superficie	Usuarios	Caudal exigido (l/s)	Horario de ocupación	Volumen de estancia	Ventanas (m ²)	Clase 1 de ventana Caudal a 4Pa (m ³ /h·m ²)	Aberturas de admisión/ext. ración (cm ²)	Abertura de paso (cm ²)	Q (l/s)	Q (m ³ /h)	Infiltración (m ³ /h)	Horario de ocupación	Ach
	salón	20	6	3	18h_22h 15h_16h	50	6,67	0,06	72	70	18	65	0,96	18h_22h 15h_16h	0,40
	dorm1	10	2	5	22h_8h	25	3,33	0,06	40		10	36		22h_8h	0,66
	dorm2	10	2	5		25	3,33	0,06	40		10	36			
	dorm3	8	2	5		20	2,67	0,06	40		10	36			
Impulsión										70					1,05
										70					0,01
	cocina	8		2	8h_9h 14h_15h 21h_22h	18,4	2,67		100	70	25,05	90,18		8h_9h 14h_15h 21h_22h	
	baño 2	4	1	15		9,2	1,33		94		23,48	84,54			
Extracción						166					48,5	174,72			1,05
Caudal CTE DB HS3	0,71 l/s/m ²	68													

UNE EN 15251:2008- 4 ocupantes. Calidad I

calidad I UNE EN 15251	estancia	superficie	usuarios	caudal por m ²	caudal por persona	volumen	abertura admisión/ extracción (cm ²)	abertura de paso (cm ²)	q (l/s) por superficie	q (l/s) por persona	q (m ³ /h) por superficie	q (m ³ /h) por persona	infiltración (m ³ /h)	horario de ocupación	ACH por superficie	ACH por persona
impulsión	salón	20	4	1,4	10	50	160	70	28	40	241,92	144,00	0,96	18h_22h 15h_16h	1,46	0,87
	dorm1	10	2	1,4		25	80	70	14					22h_8h		
	dorm2	10	1	1,4		25	40	70	14							
	dorm3	8	1	1,4		20	40	70	11							
extracción	pasillo	8				0									1,46	0,87
	cocina	8		28	8h_9h 14h_15h	18,4	83	70	35	21	125	74	0	8h_9h 14h_15h 21h_22h	1,46	0,87
	baño	4	1	20		9,2	77	70	33	19	117	70				
	caudal nivel I UNE EN 15251	0,99 l/s/m ²	68			166			67	40	243	145			1,46	0,87

UNE EN 15251:2008- 4 ocupantes. Calidad II

calidad II UNE EN 15251	estancia	superficie	usuarios	caudal por m ²	caudal por persona	volumen	abertura		abertura de paso (cm ²)	q (l/s) por superficie	q (l/s) por persona	q (m ³ /h) por superficie	q (m ³ /h) por persona	infiltración (m ³ /h)	horario de ocupación	ACH por superficie	ACH por persona
impulsión	salón	20	4	1	7	50	112	70	20	28	172,80	100,80	0,96	0,96	18h_22h 15h_16h	1,05	0,61
	dorm1	10	2	1		25	80	70	10						22h_8h		
	dorm2	10	1	1		25	40	70	10								
	dorm3	8	1	1		20	40	70	8								
extracción	pasillo	8				0										1,05	0,61
	cocina	8		28	8h_9h 14h_15h	18,4	58	70	25	14	89	52	0	8h_9h 14h_15h 21h_22h	1,04	0,61	
	baño	4	1	20		9,2	54	70	23	14	84	49					
	caudal nivel I UNE EN 15251	0,71 l/s/m ²	68			166			48	28	173,76	101,76				1,05	0,61

UNE EN 15251:2008- 4 ocupantes. Calidad III

calidad III UNE EN 15251	estancia	superficie	usuarios	caudal por m ²	caudal por persona	volumen	abertura admisión/ extracción (cm ²)		abertura de paso (cm ²)	q (l/s) por superficie	q (l/s) por persona	q (m ³ /h) por superficie	q (m ³ /h) por persona	infiltración (m ³ /h)	horario de ocupación	ACH por superficie	ACH por persona
impulsión	salón	20	4	0,7	4	50	64	70	14	16	120,96	57,60	0,96	0,96	18h_22h 15h_16h	0,73	0,35
	dorm1	10	2	0,7		25	80	70	7						22h_8h		
	dorm2	10	1	0,7		25	40	70	7								
	dorm3	8	1	0,7		20	40	70	6								
extracción	pasillo	8				0									8h_9h 14h_15h 21h_22h	0,73	0,35
	cocina	8		28	8h_9h 14h_15h	18,4	33	70	17	8	62	30	0				
	baño	4	1	20		9,2	31	70	16	8	59	28					
	caudal nivel I UNE EN 15251	0,50 l/s/m ²	68				166			34	16	122	59				

2-Ocupantes:

Número de ocupantes.

La cantidad de ocupantes determinará la emisión de contaminantes (bioefluentes) provenientes de estos. El CO₂, vapor de agua, olores y químicos provenientes de la transpiración y el entorno (asociados con la contaminación en los interiores).

Se establecen los parámetros de ocupación teniendo en cuenta en la simulación base la establecida por la normativa de referencia (CTE):

- Dormitorio doble- 2 personas
- Dormitorio individual- 1 persona.
- Salón-comedor y cocinas:
 - o Para viviendas de 3 dormitorios: 4, 5 y 6 personas

Se han tomado datos de simulación dentro de las normativas previas de los siguientes ocupantes:

- - 4 ocupantes
- - 5 ocupantes
- - 6 ocupantes

Se han seleccionado el número de ocupantes pensando en las situaciones más desfavorables (ocupación media y alta) respecto a la calidad del aire interior. Con ocupación baja, se espera obtener resultados aceptables de calidad de aire, en cuanto al indicador CO₂.

Perfil de los ocupantes.

Se ha establecido, el perfil de usuario tipo según la norma UNE EN ISO 7730:2006¹⁴⁰, se han establecido para la simulación los niveles de emisión de CO₂ metabólico y perfil de vestimenta y actividad.

- Emsión CO₂ en dormitorios:12l/h
- Emsión CO₂ en salón:19l/h
- Actividad: sedentario, 1,2 met¹⁴¹.

Para la validación de las simulaciones en el edificio de referencia se ha utilizado un perfil de usuario de distinto perfil que el que marcan las normativas de referencia (CTE DBHE1). En este caso, para adecuar en lo máximo posible la simulación y los resultados reales de monitorización, se han tomado usuarios de las siguientes características:

- -2 ocupantes de más de 80 años de edad.
- -horario de ocupación de la estancia de referencia adaptado a la situación real, que se refleja en el punto siguiente de “horarios de ocupación”.

Horarios de ocupación.

¹⁴⁰ Norma UNE EN ISO 7730:2006 (27, AENOR, 2006). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica de la interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.

¹⁴¹ ISO 8996:2004. Ergonomics. Determination of metabolic heat production. International Standards Organization.

Se establecen, para las distintas estancias, horarios de ocupación, y perfiles de uso de forma que el total de ocupantes en cada momento se encuentra discriminado tanto por horario como por situación en las distintas estancias. Este perfil de ocupación se basa en el indicado por el CTE DB HE1:2013(apéndice C)ⁱ. Aún así, dado que este perfil de uso se utiliza únicamente para efectos de cálculo de demanda energética, sin determinar cuáles de las estancias que están ocupadas en cada momento, se ha optado por realizar ciertos ajustes horarios y de ocupación, para determinar también los periodos de no ocupación que aparecen en las viviendas y como tratarlos.

Horario de ocupación de las estancias en simulaciones de 4, 5 y 6 ocupantes				
	Lunes a viernes	% ocupación	Sábados y festivos	% ocupación
Dormitorios	0:00 – 9:00	100	0:00 – 9:00	100
Salón (máxima ocupación)	15:00-16:00	50	10:00-12:00	50
	20:00-24:00	100	15:00-17:00	100
Cocinas	8:00-9:00	75	8:00-9:00	100
	14:00-15:00	50	14:00-15:00	50
Cuartos de baño	7:00-8:00	75	9:00-10:00	75

Tabla 6.1. Resumen de ocupación, establecidas según recomendaciones para simulación energética en CTE DB HE1. Apéndice C.

Horario de ocupación de las estancias para validación				
	Lunes a viernes	% ocupación	Sábados y festivos	% ocupación
Dormitorios	0:00 – 7:00	100	0:00 – 9:00	100
Salón	15:00-16:00	50	10:00-12:00	50
	19:00-21:00	100	15:00-17:00	100
	21:00-22:00	50	19:00-21:00	50
	22:00-24:00	100	21:00-22:00	100
			22:00-24:00	100
Cocinas	8:00-9:00	100	8:00-9:00	100
	14:00-15:00	50	14:00-15:00	50
	21:00-22:00	50	21:00-22:00	50
Cuartos de baño	7:00-8:00	1 persona	9:00-10:00	1 persona

Tabla 6.2. Resumen de ocupación, establecidas según perfil de usuario de piso en edificio demostrador para la validación de las simulaciones en programa CONTAM v3.1

3- Presión de Viento en las fachadas.

El funcionamiento, exclusivo o no, con ventilación natural para las viviendas, sin contar con medios mecánicos, convierte al factor de la presión de viento se convierte en fundamental. Por tanto, se ha tenido en cuenta la influencia del viento, disponiendo el bloque orientado a dos distintas orientaciones principales. El resto de normativas, al exigir un determinado caudal mínimo, establecido normalmente por el sistema de extracción, determina la menor influencia del papel del viento, en la renovación del aire de la vivienda, siendo predominante el papel del tiro de extracción mecánica o híbrida. En todo caso, las conclusiones de estas simulaciones se pueden aplicar a las condiciones de falta de funcionamiento de sistemas mecánicos en las otras normativas de referencia.

- Normativa previa a NTE-ISV-75
 - o Orientación norte-sur
 - o Orientación este-oeste
- Normativa NTE-ISV-75 y, normativa CTE DB HS3
 - o Orientación norte-sur
 - o Orientación este-oeste

El perfil de viento utilizado está basado en los archivos de base de ASHRAE para edificios altos con proporción largo/ ancho de 1/2. Cuya definición se establece bajo estas líneas.

Fig. 6.2. Perfil de presión de viento en fachada en el modelo definido.

4- Zonas climáticas. Las normativas consideradas no establecen regímenes distintos de ventilación con respecto a las zonas climáticas (NTE-ISV-75), y tan solo se determinan diferencias de dimensionado del tiro para la extracción en el caso del CTE. En el caso del edificio de referencia, al tratarse de una edificación de 8 alturas, el tiro corresponde siempre a la misma clase, independientemente de la zona térmica, y por tanto se dimensionará en consecuencia a tal efecto. Por tanto, supondría un aspecto relevante la determinación de si las condiciones de ventilación y calidad del aire dependen de la zona climática, por lo que es pertinente este tener en cuenta este parámetro. Estas zonas se han seleccionado extractado de la norma CTE DB HS3, vigente. Las ciudades que se han seleccionado para el análisis por las zonas climáticas contempladas son:

Ciudad	Zona climática	Archivo climático
Almería	A4	A4.wth
Sevilla	B4	B4.wth
Barcelona	C2	C4.wth
Bilbao	C1	C1.wth
Coruña	C1	C1.wth
Madrid	D3	D3.wth
Soria	E1	E1.wth

Tabla 6.3. Selección de ciudades de referencia y archivos climáticos de conversión para el programa CONTAM.

Los datos climáticos, que incluyen datos de viento, se han obtenido de la página ecoeficiente¹⁴². Esto es un factor importante, porque la ausencia de datos de viento (los datos que se obtienen usualmente para programas de simulación de eficiencia energética) varía en gran medida los resultados del análisis.

- **Emisión de contaminantes asociada con los materiales de acabados de los espacios interiores.** En estos momentos se están desarrollando normativas que limitan la emisividad de los materiales interiores, debido a las consecuencias ya establecidas para la salud de las personas de las concentraciones altas de contaminantes existentes en el interior de la edificación. La normativa UNE EN 15251:2008, y algunas normativas europeas estatales, ya definen, limitan y tabulan la emisividad total de los espacios interiores en cuanto a formaldehído y TVOCs entre otros. Siguiendo las recomendaciones de esta norma y basándose en mediciones y literatura científica existente (ver *estado de la cuestión*), se establecen los niveles de emisividad interior de estos materiales de acabado. Estos materiales se van a clasificar de manera conjunta, y se van a categorizar en:

formaldehído. (HCHO)	
edificio poco contaminante	0,05 mg/m ² h
edificio muy poco contaminante	0,02 mg/m ² h
edificio contaminante	>0,05mg/m ² h
Total de compuestos orgánicos volátiles. (TVOC)	
edificio poco contaminante	0,02 mg/m ² h
edificio muy poco contaminante	0,01 mg/m ² h
edificio contaminante	>0,02mg/m ² h

Tabla 6.4. Selección de emisividad de contaminantes en viviendas de modelo definido

Para el caso de estudio se ha seleccionado el nivel de emisividad correspondiente a edificio contaminante, al tener en cuenta la emisividad del mobiliario, fragancias, otros emisores y las tomas de datos en distintas viviendas en las mediciones realizadas.

En las páginas siguientes se resume gráficamente la definición de los escenarios que se ha descrito en este apartado para cada software utilizado.

¹⁴² <http://ecoeiciente.es/climas-cte2013-en-epw/>

Contam 3.1. mapeado de simulaciones.

Fig. 6.3. Esquema metodológico de definición de escenarios de simulación en el programa CONTAM v3.1

EnergyPlus 8.1. mapeado de simulaciones

Fig. 6.4. Esquema metodológico de definición de escenarios de simulación en el programa EnergyPlus v8.1 utilizando designBuilder

6.3 DEFINICIÓN DE LOS RESULTADOS A OBTENER DEL ANÁLISIS.

Como resultado de las simulaciones se obtienen multitud de datos y tipos de dato, que han de ser debidamente tratados, según el objetivo que pretenda el cálculo numérico a través de software de simulación. En cuanto a las simulaciones con el software CONTAM obtenemos resultados con los siguientes objetivos:

VALIDACIÓN DEL MODELO.

Estos resultados están orientados a validar el modelo contrastándolo con datos de monitorización reales de las viviendas situadas en el edificio demostrador.

Los datos obtenidos son:

- **Dióxido de Carbono (CO₂);** este dato se contrasta con la medición en el salón de las viviendas.
- **Caudal de renovación (ACH);** Se pueden comprobar con mediciones de dilución de CO₂ como gas trazador, el caudal de renovación según la fórmula y método expresado en el capítulo de *estado de la cuestión*.
- **Perfil de ocupación;** se obtienen datos que ajustamos con el perfil de ocupación, para asimilar el modelo a la realidad más, como contraste de datos.
- **Lectura del contador de gas ciudad de las viviendas;** se ha realizado un seguimiento de las lecturas de consumo de gas de todas las viviendas del bloque, ya que aunque no se han monitorizado todas, permite extraer conclusiones medias en cuanto a los hábitos de consumo y precisión o no del modelo desarrollado en EnergyPlus a través de designBuilder.

CALIDAD DE AIRE INTERIOR

Estos resultados están orientados a evaluar distintos aspectos que definen la calidad del aire interior en los distintos escenarios y con las distintas variables.

Los datos obtenidos son:

- **Dióxido de Carbono (CO₂);** la evolución y curvas de concentración de este indicador, expresan en qué estancias se producen los episodios de mayor concentración, de manera que se puedan sugerir las medidas para corregirlo.
- **Porcentaje de tiempo por encima de 1200 ppm (%>1200 ppm);** Índice extractado para evaluar la calidad del aire con respecto a la norma EN 15251:2008. Esta norma establece, para espacios residenciales de viviendas existentes, la categoría III, que respecto a calidad del aire interior se expresa en el límite de 1200 ppm. Este límite que debería ser superado en periodos cortos y/o esporádicos de tiempo (de un 5% a un 10%, aunque este último término no se explicita claramente).

Categoría	CO ₂ sobre la concentración exterior para cálculos energéticos y control de demanda (ppm)	Concentración total de CO ₂ estimada (ppm)
I	350	750
II	500	900
III	800	1200
IV	>800	>1200

Tabla 6.5. Concentraciones máximas permitidas en CO₂ (ppm) respecto a los niveles de calidad ambiental, por encima del nivel en el ambiente exterior (usualmente ≈400 ppm en entorno urbano)

La escala que se va a establecer en este caso está basada en la citada norma. Así, estableceremos el porcentaje de tiempo en las distintas categorías expresadas en la tabla previa, y se establece la

huella de la vivienda según el método establecido en la norma para evaluar la calidad ambiental a largo plazo¹⁴³.

Fig.6.5. Ejemplo de huella ambiental de concentración de CO₂ en 5 categorías. Se añade una categoría por encima de 1600 ppm.

- **formaldehído (HCHO);** En principio, en las viviendas existentes no deberían alcanzarse altos niveles de formaldehído, por la emisividad de los ocupantes y materiales de construcción. Es un factor que se tomará como indicador de necesidad de mayor caudal de renovación la superación de los niveles STEL (de corta duración), establecidos por la OMS para espacios interiores.
- **Compuestos Orgánicos Volátiles Totales (TVOC);** de igual manera que en el punto previo, se tomará la superación de los límites normativos establecidos por la OMS como indicador de necesidad de mayor ventilación.
- **Edad del aire (AGE);** este índice, explicado en el capítulo de Estado de la Cuestión, nos permite detectar las estancias con peor ratio de ventilación, dentro de la concepción de espacio multizonal, en que se realiza el análisis.
- **Porcentaje de personas insatisfechas (PPI);** calculado según el método establecido en la norma EN13779:2003 y EN15251:2008 conforme a la fórmula:

$$PPI = 395 \cdot e^{-15,15 \cdot (CO_2)^{0,25}}$$

Las simulaciones con el software EnergyPlus pretenden obtener resultados con los siguientes objetivos:

VALIDACIÓN DEL MODELO.

Estos resultados están orientados a validar el modelo contrastándolo con datos de monitorización reales de las viviendas situadas en el edificio demostrador.

Los datos obtenidos son:

DEMANDA ENERGÉTICA

Estos resultados están orientados a la obtención de datos relevantes en cuanto a la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico de las viviendas, cuando únicamente variamos los

¹⁴³ AEN/CTN 100, C., 2008. UNE-EN 15251:2008 Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido.p.46. establecimiento de huella de calidad ambiental.

parámetros definidos (climatología local, orientación principal del bloque sistemas de ventilación, aperturas de admisión de aire, sistemas de extracción de aire, caudales de ventilación, caudal de infiltración, número de personas, y niveles de calidad de aire según norma EN 15251).

Los datos obtenidos son:

- **Demanda de calefacción ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$);** en las simulaciones a realizar con EnergyPlus se establecen como condiciones de contorno el funcionamiento completo de la casa, según la metodología de cálculo establecida en la legislación vigente de calificación energética de edificios¹⁴⁴. Por tanto se obtendrá la demanda de calefacción (calor sensible y latente) de la vivienda.
- **Demanda por renovación de aire ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$);** nominalmente para cada escenario de ventilación considerado se establecen los caudales de renovación de aire, aire que al requerir aportación de energía para su acondicionamiento, forma parte de la demanda total, y que en nuestro caso, es interesante extraer con el objetivo de conocer el porcentaje que representa dentro de la demanda energética total de la vivienda.
- **Demanda por pérdidas de infiltración ($\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$);** en la misma dirección que el punto previo, se han establecido unos valores de infiltración de aire mediante la simulación realizada en el punto de análisis previo, mediante el software *CONTAM* para cada escenario considerado. Asimismo, la repercusión en la demanda energética debida al acondicionamiento del aire introducido en la vivienda por infiltración es importante de cara a caracterizar la situación correspondiente a cada escenario.

6.4 VALIDACIÓN DE MODELO CON AYUDA DE MEDICIÓN EN EDIFICIO DEMOSTRADOR

El proceso de validación, como se ha apuntado anteriormente, es de especial importancia para el establecimiento del margen de fiabilidad con que cuenta el proceso de simulación numérica posterior. En nuestro caso, se ha contado con la monitorización de 3 viviendas dentro del edificio demostrador, para el establecimiento de la validez del modelo. En primer lugar nos encontramos con la medición de los distintos parámetros monitorizados en las viviendas monitorizadas, respecto de la calidad ambiental.

La medición se ha realizado durante un periodo de 4 meses en tres viviendas del edificio demostrador, en el salón de las viviendas, según lo descrito en el capítulo de metodología. Los ocupantes son:

- En el 7º izquierda 2 personas de más de 80 años.
- En el 7º derecha 1 persona de más de 80 años con una persona de ayuda durante algunas horas de la mañana.
- En el 5º izquierda 2 personas de más de 80 años.

A continuación se muestran medidas de CO_2 , Temperatura del aire y Humedad relativa del salón de las 3 viviendas, en tres días del mes de febrero de 2014 (12, 13 y 14). Existen variaciones importantes en los tres parámetros medidos entre las tres viviendas, con igual configuración, lo que incide en la idea de que el ajuste unívoco de un modelo a la medición real se puede dar en condiciones de

¹⁴⁴ AICIA-Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de ingenieros industriales de Sevilla, 2009. Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER.

definición del experimento muy controladas, y no en condiciones cotidianas. En el caso que nos ocupa, vemos preliminarmente las causas de las diferencias que existen en: la temperatura de consigna que establece cada usuario; la presencia y el número de ocupantes en el salón; y el régimen de ventilación que se realice en la estancia.

Fig.6.6. Medidas de CO₂, temperatura del aire y humedad relativa del salón de las 3 viviendas.

Los horarios se han ajustado lo más posible a la presencia de los ocupantes en el demostrador, pero no se puede ajustar al 100%, y su comportamiento, como se puede apreciar en las gráficas de CO₂ en el salón, no es cíclico y permanente sino que sufre oscilaciones de consideración.

A continuación se muestran las huellas de concentración de CO₂ en las distintas viviendas.

Fig.6.7. Huellas ambientales de calidad de aire respecto a la concentración de CO₂

El modelo desarrollado en CONTAM ha previsto el ajuste de:

- los sistemas de ventilación
- la emisividad de los ocupantes
- la permeabilidad de la envolvente y de las ventanas
- la localidad en donde se sitúa el edificio demostrador
- los datos climáticos medios
- la emisividad de materiales
- orientación del bloque para ajustar los datos de viento.

Al tratarse de un edificio que cumple las condiciones del periodo normativo **PRE NTE ISV 75** se han considerado las características definidas para este escenario. Estos son los resultados de la simulación estableciendo las condiciones de contorno ajustadas para este escenario.

Fig. 6.7. Simulación con programa contam 3.1 en salón del modelo. Concentración de CO₂ (ppm) periodo de 10 días de mes de febrero de 2014

Obtenemos también los valores de simulación de otros parámetros de medición, como son el formaldehído y los compuestos orgánicos volátiles. Estos no se utilizarán para la validación, pero si como contraste posterior con las medidas de pisos similares in situ de estos contaminantes.

Fig.6.8.Simulación Con Programa Contam 3.1. Concentración De HCHO (ppm) Y TVOC (kg/kg). Periodo De 10 Días De Mes De Febrero De 2014

En la simulación se ha dispuesto el escenario más cercano a las condiciones de simulación (20°C y 2 ocupantes), que como observamos en las gráficas de concentración de CO₂, corresponden al piso 7º izquierda. En él se va a ajustar el archivo de datos climáticos, y el horario de usuario.

A continuación se muestran las gráficas de concentración de CO₂ en un periodo de 10 días del mes de febrero.

Fig. 6.9. Mediciones tomadas en salón del piso 7º izqda . Concentración de CO₂ (ppm) Periodo de 10 días de mes de febrero de 2014

La comparación entre la gráfica correspondiente a la simulación del modelo en CONTAM y la correspondiente a la medición de concentración de CO₂ en el salón de la vivienda 7º izquierda (7ºI) en el edificio demostrador de 10 días de febrero de 2014 arroja los siguientes resultados de correspondencia entre ambos que se definen en la siguiente gráfica:

Fig. 6.10. Comparativa entre simulación con programa CONTAM 3.1. y mediciones tomadas en salón del piso 7º izqda. Concentración de CO₂ (ppm) Periodo de 10 días de mes de febrero de 2014

En esta gráfica podemos observar:

1. La amplitud de la concentración de CO₂ en el modelo se ajusta a la correspondiente con la medición en cuanto a cantidades brutas de concentración. La concentración máxima del modelo es 2076 ppm mientras que la máxima en la medición de la vivienda 7I es 1998. **Por lo tanto, las fuentes de emisión y la caracterización de la dilución del contaminante son válidas.**
2. Los periodos dentro de los distintos niveles de concentración, a partir de los cuales se calcula la huella de calidad ambiental se ajustan con bastante precisión, correspondiendo estos en un 77,35% de los casos. A nivel numérico lo podemos observar dentro de la tabla de valores de comparación entre ambos escenarios (el modelado y el medido):

Numero de horas por categoría	x<750 ppm	750<x<900 ppm	900<x<1200 ppm	1200<x<1600 ppm	x>1600 ppm	DIF. TOTALES
MODELO CONTAM	135	31	40	21	14	0
	56,02%	12,86%	16,60%	8,71%	5,81%	100%
7ºI	138	56	31	10	5	57
	57,26%	23,24%	12,86%	4,15%	2,07%	23,65%

Tabla 6.6. Distribución de tiempo en distintas categorías de concentración de CO₂. Diferencias entre medición y modelo

3. las huellas de calidad ambiental en cuanto a distribución de horas de concentración de CO₂ en cada categoría se asemejan en medida suficiente para llevar a cabo el análisis con esta herramienta.

Fig.6.11. Huellas ambientales basadas en medidas de CO₂. Diferencia entre modelo y medición en 7º izqda.

4. Las mayores diferencias las encontramos debido a la dificultad de caracterizar el perfil de presencia con un usuario real. Este fenómeno, que en la actualidad es materia de estudio no resuelta por parte de la técnica y la ciencia, hace diferir los modelos de predicción en cierto grado, lo que no invalida los resultados.

CONCLUSIÓN DEL PROCESO DE VALIDACIÓN

Por tanto como condición para continuar el análisis utilizando como herramienta **el software CONTAM se puede considerar que el ajuste que se puede alcanzar con respecto a la realidad es adecuado para conducir el resto de las simulaciones con una cierta confianza en la fiabilidad de los resultados.**

6.5 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA CALIDAD DEL AIRE INTERIOR.

El análisis realizado en cuanto a la calidad del aire interior de las viviendas del parque residencial español se va a realizar en base a un modelo de vivienda representativo en cuanto a ocurrencia, distribución, su pertenencia tipológica a la época de 1960 a 1980 y su extensión por todo el territorio de España. En base a este modelo se van a estudiar los distintos escenarios normativos. Esto último se va a realizar ajustando los sistemas y las condiciones de contorno del modelo a las distintas variaciones normativas que se han producido en materia de ventilación. Los ajustes del modelo se muestran en las tablas (X a XX) indicadas en este capítulo en el apartado «Definición de los escenarios y variables del análisis». Estos valores de partida y condiciones de contorno del modelo determinarán la evolución del mismo y la obtención de valores dinámicos basados en las condiciones interiores y constructivas establecidas y las exteriores y climáticas del sitio, obtenidas de bases de datos medios validadas. El modelo desarrollado consta de las dos viviendas por planta, una orientada a este y la otra a oeste como se observa en la representación gráfica del modelo.

Fig. 6.12. Viviendas modeladas en software CONTAM

6.5.1 PERIODO PREVIO A LA NORMATIVA. ESCENARIO PRE NTE ISV 75

Este periodo, como hemos establecido con anterioridad, se caracteriza por tener una variabilidad elevada de las condiciones interiores debido a su alta dependencia de las condiciones climáticas exteriores.

Condiciones generales de ventilación

La ventilación en este escenario se produce por efecto de la infiltración y exfiltración de aire, por lo tanto, en este esquema la necesidad de tener alta permeabilidad de la envolvente es fundamental, sea mediante la apertura continua de ventanas en distintas orientaciones o por la propia permeabilidad de estas. En el modelo se han incluido ventanas muy permeables de la época (ver capítulo de caracterización), produciéndose un esquema de ventilación que tiene un índice de renovación de aire de $0,55$ a $0,59 \text{ h}^{-1}$ (renovaciones hora o ACH), lo que concuerda con las configuraciones de viviendas con baja estanqueidad de los esquemas de medición de infiltración con los diferentes métodos establecidos en el estado de la cuestión. Asimismo se aprecia una elevada fluctuación en los elementos de intercambio de flujo con el ambiente (ventanas) como se puede observar en la fig x. a continuación

Fig. 6.13. Caudales en las ventanas de las viviendas modeladas para el periodo PRE NTE ISV 75

En ella se puede observar el funcionamiento de las ventanas en doble flujo, en admisión y en expulsión del aire en distintos momentos del periodo de análisis. Esto nos indica que este sistema es poco eficiente en cuanto al acondicionamiento térmico, pues se pierde mucho calor en el intercambio. También lo es en cuanto a ventilación, pues estos elevados caudales no impiden la acumulación de contaminantes en el interior. Así, con 3 ocupantes la máxima concentración de CO₂ es de 3000. A continuación se detallan los resultados de cálculo correspondientes a este periodo normativo

código	Datos climáticos/orientación	NORMATIVA DE SIMULACION	CARPINTERIAS	OCUPANTES	ACH MAXIMO	concentración media de CO ₂	EDAD DEL AIRE MAX
CA.1.5.0	-	PRE NTE75	CLASE 0	2	0,56	732	11,87
CA.1.5.1	NS	PRE NTE75	CLASE 0	2	0,56	732	11,87
CA.1.5.2	EO	PRE NTE75	CLASE 0	2	0,59	725	11,87
CA.1.5.3	NS	PRE NTE75	CLASE 0	3	0,56	852	11,94
CA.1.5.4	EO	PRE NTE75	CLASE 0	3	0,59	819	11,65
CA.1.5.5	NS	PRE NTE75	CLASE 0	4	0,56	941	11,65
CA.1.5.6	NS	PRE NTE75	CLASE 0	4	0,59	938	11,65
CA.1.5.6	NS	PRE NTE75	CLASE 0	5	0,59	938	11,65
CA.1.5.6	NS	PRE NTE75	CLASE 0	6	0,59	938	11,65

Tabla 6.7. Condiciones generales de ventilación en las viviendas modeladas para el periodo PRE NTE ISV 75

OCUPANTES	CONCENTRACION CO ₂ MAX	ESTANCIA	CONCENTRACION VOC MAX (kg/kg)	ESTANCIA	CONCENTRACION HCHO MAX (ppm)	ESTANCIA
2	3064	dormitorio	0,185	dormitorio	0,095	dormitorio
2	3100	dormitorio	0,185	dormitorio	0,095	dormitorio
2	2928	dormitorio	0,169	dormitorio	0,088	dormitorio
3	3099	dormitorio	0,185	dormitorio	0,095	dormitorio
3	3296	SALON	0,169	dormitorio	0,088	dormitorio
4	3565	dormitorio	0,185	dormitorio	0,095	dormitorio
4	3600	SALON	0,162	dormitorio	0,088	dormitorio
5	3570	SALON	0,162	dormitorio	0,088	dormitorio
6	4571	SALON	0,162	dormitorio	0,088	dormitorio

Tabla 6.8. Concentración de contaminantes en las viviendas modeladas para el periodo PRE NTE ISV 75

NORMATIVA DE SIMULACION	OCUPANTES	TIEMPO SUPERACION UMBRALES (CO ₂ >1200 ppm)	PPI (según UNE EN 15251:2008)	CO ₂ ^{0,25}	PPI (según UNE EN 15251:2008) PPI=395·e ^{-15,15·(CO₂)^{0,25}}
PRE NTE75	2	9,59%	20	0,19	21
PRE NTE75	2	9,59%	20	0,19	21
PRE NTE75	2	9,87%	20	0,19	21
PRE NTE75	3	17,89%	30	0,19	24
PRE NTE75	3	16,83%	30	0,19	23
PRE NTE75	4	23,51%	>30	0,18	26
PRE NTE75	4	23,19%	>30	0,18	26
PRE NTE75	5	31,54%	>30	0,18	26
PRE NTE75	6	38,08%	>30	0,18	26

Tabla 6.9. Parámetros de evaluación de calidad del aire interior en las viviendas modeladas para el periodo PRE NTE ISV 75

Influencia de la ocupación

El aumento en el número de ocupantes no genera un aumento en la demanda energética, al no contar este escenario con sistemas mecánicos de ventilación. Sin embargo se observa un empeoramiento patente en la calidad de aire interior conforme el número de ocupantes aumenta. Las concentraciones máximas de CO₂ con 2 ocupantes rondan los 2000 ppm en el salón mientras que con 5 ocupantes rondan los 4000 ppm en las zonas de salón y cocina. Los dormitorios, por el transporte de contaminantes de una zona a otra, en situaciones climáticas que impidan una correcta ventilación, pueden hacer aumentar las concentraciones de manera considerable, como se puede observar en las figuras bajo estas líneas.

Las gráficas previas están realizadas en el escenario de ocupación con el perfil real cotejado en el demostrador de la canción del olvido 28, Madrid. En las gráficas a continuación se muestra el escenario con el horario de comparación establecido basado en el CTE. Las concentraciones aumentan en el salón conforme aumenta la ocupación. En los dormitorios, que eran mayores en los dormitorios en baja ocupación (2 personas)

Fig. 6.16. Concentración de CO₂. Archivo contam. 5 ocupantes. Horario de comparación. Pre NTE ISV 75

Fig. 6.17. Concentración de CO₂. Archivo contam. 5 ocupantes. Horario de comparación. Pre NTE ISV 75

Fig. 6.18. Concentración de CO₂. Archivo contam. 6 ocupantes. Horario de comparación. Pre NTE ISV 75

6.5.2 ESCENARIO A PARTIR DE LA NORMA NTE ISV 75

Este escenario y conjunto de situaciones para el análisis se realiza a partir de las modificaciones de las condiciones de contorno, asumiendo que se realizaran en el edificio las obras necesarias:

- Instalación de tiro vertical natural para extracción en baños y cocinas, hasta la cubierta, de dimensiones 200x200 mm de sección.

Este tiro vertical estabiliza en gran medida la ventilación haciéndola menos dependiente de las condiciones climáticas. Esto se puede observar en las gráficas que se encuentran en la parte final del apartado. Así, nos encontramos en primer lugar con un aumento del caudal de renovación de aire, pasando a 0,71. La media de concentración de CO₂ baja considerablemente y se regula la edad del aire en general, que pasa a ser 1,50 de máxima. El caudal por las ventanas es mucho más constante, perdiendo ya casi la oscilación que aparecía en el esquema anterior.

Fig.6.19. Caudales en las ventanas de las viviendas modeladas para el periodo NTE ISV 75

código	Datos climáticos /orientación	NORMATIVA DE SIMULACION	CARPINTERIAS	OCUPANTES	ACH MAXIMO	concentración media de CO ₂	EDAD DEL AIRE MAX
CA.1.5.7	MADRID	NTE75	CLASE 0	4	0,71	645	1,50
CA.1.5.8	MADRID	NTE75	CLASE 0	5	0,71	723	1,50
CA.1.5.9	MADRID	NTE75	CLASE 0	6	0,71	802	1,50
CA.1.5.10	NS	NTE75	CLASE 0	4	0,71	693	1,56
CA.1.5.11	EO	NTE75	CLASE 0	4	0,71	689	1,55
CA.1.5.12	NS	NTE75	CLASE 0	5	0,71	712	1,55
CA.1.5.13	EO	NTE75	CLASE 0	5	0,71	712	1,54
CA.1.5.14	NS	NTE75	CLASE 0	6	0,71	801	1,72
CA.1.5.15	EO	NTE75	CLASE 0	6	0,71	803	1,78

Tabla 6.10. Condiciones generales de ventilación en las viviendas modeladas para el periodo PRE NTE ISV 75

Las concentraciones de contaminantes se reducen, tanto las correspondientes a emisividad de los ocupantes, como las producidas por los materiales. Aún así, los niveles son elevados teniendo en cuenta el objetivo de 1200 ppm como concentración máxima, salvo un determinado número de horas al año.

Datos climáticos /orientación	OCUP.	CONCENTRACION CO ₂ MAX	ESTANCIA	CONCENTRACION VOC MAX (kg/kg)	ESTANCIA	CONCENTRACION HCHO MAX (ppm)	ESTANCIA
MADRID	4	1528	SALON	0,144	dormitorio	0,015	dormitorio
MADRID	5	1820	SALON	0,144	dormitorio	0,015	dormitorio
MADRID	6	2112	SALON	0,144	dormitorio	0,015	dormitorio
NS	4	1532	SALON	0,166	dormitorio	0,015	dormitorio
EO	4	1535	SALON	0,168	dormitorio	0,015	dormitorio
NS	5	1913	SALON	0,162	dormitorio	0,015	dormitorio
EO	5	1913	SALON	0,162	dormitorio	0,015	dormitorio
NS	6	2129	SALON	0,162	dormitorio	0,015	dormitorio
EO	6	2130	SALON	0,162	dormitorio	0,015	dormitorio

Tabla 6.11. Concentración de contaminantes en las viviendas modeladas para el periodo NTE ISV 75

En cuanto al tiempo de superación de umbrales o límites de cara al establecimiento de la huella de calidad del aire, nos encontramos con una dependencia grande del número de ocupantes para garantizar valores aceptables. Con 4 ocupantes los valores de tiempo por encima de 1200 ppm son inferiores al 10% (buena calidad ambiental) mientras que para 5 y 6 ocupantes las viviendas sufren un empeoramiento considerable de la calidad del aire y sube el porcentaje de insatisfechos (PPI).

NORMATIVA DE SIMULACION	OCUPANTES	TIEMPO SUPERACION UMBRALES (CO ₂ >1200 ppm)	PPI (según UNE EN 15251:2008)	CO ₂ ^{0,25}	PPI (según UNE EN 15251:2008) PPI=395·e ^{-15,15·(CO₂)^{0,25}}
NTE75	4	6,45%	20	0,20	20
NTE75	5	19,13%	30	0,19	21
NTE75	6	27,43%	>30	0,19	23
NTE75	4	6,45%	20	0,19	21
NTE75	4	6,45%	20	0,20	21
NTE75	5	17,20%	30	0,19	21
NTE75	5	17,20%	30	0,19	21
NTE75	6	27,43%	>30	0,19	23
NTE75	6	27,43%	>30	0,19	23

Tabla 6.12. Parámetros de evaluación de calidad del aire interior en las viviendas modeladas para el periodo NTE ISV 75

Observamos las concentraciones de baja cuantía, superando en escasas ocasiones los límites. Esta ventilación resulta suficiente para condiciones de ocupación de hasta 4 personas, en cuanto a la calidad del aire se refiere. Más adelante comprobaremos su adecuación en la demanda energética.

Sin embargo, para situaciones de mayor ocupación, los niveles comienzan a ser de manera constante demasiado elevados para garantizar la calidad del aire para este tipo de viviendas. Se hace necesaria una mejora de los sistemas de ventilación, para garantizar la calidad del aire en esas circunstancias.

Fig. 6.21. Concentración de CO₂. Archivo CONTAM. 5 ocupantes. NTE ISV 75

Llevando la ocupación al máximo contemplado en la normativa vigente nos encontramos con una superación casi continua de los umbrales establecidos de 1200 ppm en algún punto de la vivienda, al producirse la estancia de los ocupantes en distintos lugares de la misma al mismo tiempo. El proceso de establecimiento de superación de umbrales es ponderado con lo que no estaríamos hablando de la superación global de los umbrales, pero no deja de indicar una falta de suficiente ventilación con respecto al número elevado de ocupantes.

Fig. 6.22. Concentración de CO₂. Archivo CONTAM. 6 ocupantes. NTE ISV 75

6.5.3 ESCENARIO EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE DB HS3)

Este escenario y conjunto de situaciones para el análisis se realiza a partir de las modificaciones de las condiciones de contorno, asumiendo que se realizaran en el edificio las obras necesarias:

- Instalación de tiro vertical natural para extracción en baños y cocinas, hasta la cubierta, de dimensiones según la ficha de cálculo en el apartado «Definición de los escenarios y variables del análisis». El tiro será de caudal constante garantizado por medios mecánicos.
- Ajuste de dimensiones de aberturas de admisión en las ventanas, aumentando la superficie de admisión en función de la ocupación.
- Se reduce la infiltración con la mejora de la estanqueidad de las ventanas, que según la zona climática serán de clase 1 o clase 2 (norma UNE EN 12207:2000), y la situación de los aireadores o aberturas de admisión por encima del 1,80 m.

Este tiro vertical y el caudal constante de extracción estabiliza genera una depresión en la vivienda continua que estabiliza los caudales de ventilación. Los caudales de renovación de aire varían con respecto a la ocupación yendo de 0,55 a 0,90 h⁻¹. El caudal por las ventanas es mucho más constante, perdiendo ya casi la oscilación que aparecía en el esquema anterior.

Fig. 6.23. Caudales en las ventanas de las viviendas modeladas para el periodo CTE DB HS3

Código	Datos climáticos /orientación	NORMATIVA DE SIMULACION	CARPINTERIAS	OCUPANTES	ACH MAXIMO	concentración media de CO ₂	EDAD DEL AIRE MAX
CA.1.5.16	MADRID	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,55	740	2,23
CA.1.5.17	NS	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,57	710	2,19
CA.1.5.18	EO	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,57	709	2,18
CA.1.5.19	MADRID	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,66	706	1,74
CA.1.5.20	NS	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,71	709	1,77
CA.1.5.21	EO	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,71	711	1,74
CA.1.5.22	MADRID	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,79	698	1,45
CA.1.5.23	NS	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,86	713	1,45
CA.1.5.24	EO	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,90	691	1,46
CA.1.5.25	MADRID	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,51	745	2,18
CA.1.5.26	MADRID	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,64	706	1,74
CA.1.5.27	MADRID	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,77	750	1,45
CA.1.5.28	SEVILLA	CTEDBHS3	CLASE 1	4	0,55	682	2,18
CA.1.5.29	SEVILLA	CTEDBHS3	CLASE 1	5	0,69	680	1,74
CA.1.5.30	SEVILLA	CTEDBHS3	CLASE 1	6	0,83	683	1,45
CA.1.5.31	ALMERIA	CTEDBHS3	CLASE 1	4	0,55	716	2,18
CA.1.5.32	ALMERIA	CTEDBHS3	CLASE 1	5	0,69	679	1,74
CA.1.5.33	ALMERIA	CTEDBHS3	CLASE 1	6	0,83	720	1,45
CA.1.5.34	BARCELONA	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,55	715	2,18
CA.1.5.35	BARCELONA	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,69	679	1,74
CA.1.5.36	BARCELONA	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,83	719	1,45
CA.1.5.37	BILBAO	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,55	716	2,18
CA.1.5.38	BILBAO	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,69	680	1,74
CA.1.5.39	BILBAO	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,83	720	1,45
CA.1.5.40	CORUÑA	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,55	717	2,18
CA.1.5.41	CORUÑA	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,69	681	1,74
CA.1.5.42	CORUÑA	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,83	721	1,45
CA.1.5.43	SORIA	CTEDBHS3	CLASE 2	4	0,49	764	2,18
CA.1.5.44	SORIA	CTEDBHS3	CLASE 2	5	0,61	723	1,74
CA.1.5.45	SORIA	CTEDBHS3	CLASE 2	6	0,73	769	1,45

Tabla 6.13. Condiciones generales de ventilación en las viviendas modeladas para el periodo CTE DB HS3

Las renovaciones de caudal de aire sufren variación con respecto a la zona climática en todos los casos. Este aspecto no está contemplado en la normativa. La edad del aire máxima también varía en relación al número de ocupantes y la zona climática. La concentración media de CO₂ es más baja que con los dos escenarios previos, de 680 a 769 ppm de media. De manera poco previsible, la concentración máxima de CO₂ resulta más elevada con 4 ocupantes que con 5 y 6 ocupantes, dándose esta concentración mayor en el salón. El mismo fenómeno ocurre con los otros dos contaminantes caracterizados. Sin embargo la estancia que mayor concentración tiene son los dormitorios. Aún así, las concentraciones basales debidas a los acabados de construcción no suponen la superación de los umbrales establecidos a nivel numérico. Las concentraciones mayores se dan en las zonas climáticas de mayor severidad climática de invierno, en comparación con las zonas climáticas de invierno más benigno.

Datos climáticos /orientación	OCUP	CONCENTRACION N CO ₂ MAX (ppm)	ESTANCIA	CONCENTRACION N VOC MAX (kg/kg)	ESTANCIA	CONCENTRACION N HCHO MAX (ppm)	ESTANCIA
MADRID	4	2053	Salón	0,192	Dormitorio	0,016	Dormitorio
NS	4	1901	Salón	0,179	Dormitorio	0,016	Dormitorio
EO	4	1894	Salón	0,183	Dormitorio	0,016	Dormitorio
MADRID	5	1724	Salón	0,166	Dormitorio	0,015	Dormitorio
NS	5	1949	Salón	0,154	Dormitorio	0,013	Dormitorio
EO	5	1926	Salón	0,157	Dormitorio	0,015	Dormitorio
MADRID	6	1545	Salón	0,092	Dormitorio	0,013	Dormitorio
NS	6	1953	Salón	0,095	Dormitorio	0,013	Dormitorio
EO	6	1837	Salón	0,08	Dormitorio	0,013	Dormitorio
MADRID	4	2028	Salón	0,169	Dormitorio	0,015	Dormitorio
MADRID	5	2062	Salón	0,083	Dormitorio	0,015	Dormitorio
MADRID	6	2081	Salón	0,079	Dormitorio	0,015	Dormitorio
SEVILLA	4	1906	Salón	0,079	Dormitorio	0,015	Dormitorio
SEVILLA	5	1937	Salón	0,077	Dormitorio	0,015	Dormitorio
SEVILLA	6	1955	Salón	0,047	Dormitorio	0,013	Dormitorio
ALMERIA	4	1902	Salón	0,157	Dormitorio	0,015	Dormitorio
ALMERIA	5	1933	Salón	0,077	Dormitorio	0,015	Dormitorio
ALMERIA	6	1952	Salón	0,085	Dormitorio	0,013	Dormitorio
BARCELONA	4	1901	Salón	0,156	Dormitorio	0,015	Dormitorio
BARCELONA	5	1932	Salón	0,077	Dormitorio	0,015	Dormitorio
BARCELONA	6	1950	Salón	0,085	Dormitorio	0,013	Dormitorio
BILBAO	4	1905	Salón	0,157	Dormitorio	0,015	Dormitorio
BILBAO	5	1936	Salón	0,077	Dormitorio	0,015	Dormitorio
BILBAO	6	1954	Salón	0,085	Dormitorio	0,013	Dormitorio
CORUÑA	4	1909	Salón	0,157	Dormitorio	0,015	Dormitorio
CORUÑA	5	1940	Salón	0,077	Dormitorio	0,015	Dormitorio
CORUÑA	6	1958	Salón	0,085	Dormitorio	0,013	Dormitorio
SORIA	4	2110	Salón	0,178	Dormitorio	0,016	Dormitorio
SORIA	5	2145	Salón	0,087	Dormitorio	0,016	Dormitorio
SORIA	6	2166	Salón	0,096	Dormitorio	0,013	Dormitorio

Tabla 6.14. Concentración de contaminantes en las viviendas modeladas para el periodo CTE DB HS3

El tiempo de superación de umbrales en cuanto a la concentración de CO₂ varía de manera sustancial dependiendo de la zona climática y del número de ocupantes. La orientación del edificio si tiene en este caso influencia en la concentración de contaminantes, debido al cambio de superficie de admisión dependiendo de la fachada que esté más sometida a presión de viento y de la ocupación sea en los dormitorios que dan a esa fachada.

Datos climáticos /orientación	OCUPANTES	TIEMPO SUPERACION UMBRALES (CO ₂ >1200 ppm)	PPI (estimada)	CO ₂ ^{0,25}	PPI (según UNE EN 15251:2008) PPI=395·e ^{-15,15·(CO₂)^{0,25}}
MADRID	4	14,82%	30	0,19	22
NS	4	20,59%	20	0,19	21
EO	4	7,70%	20	0,19	21
MADRID	5	10,93%	30	0,19	21
NS	5	8,11%	20	0,19	21
EO	5	8,99%	20	0,19	21
MADRID	6	23,97%	>30	0,19	21
NS	6	8,67%	20	0,19	21
EO	6	7,38%	20	0,20	21
MADRID	4	17,24%	30	0,19	22
MADRID	5	19,87%	30	0,19	21
MADRID	6	27,48%	>30	0,19	22
SEVILLA	4	16,97%	20	0,20	20
SEVILLA	5	19,50%	20	0,20	20
SEVILLA	6	26,74%	20	0,20	20
ALMERIA	4	16,97%	20	0,19	21
ALMERIA	5	19,50%	20	0,20	20
ALMERIA	6	26,74%	20	0,19	21
BARCELONA	4	16,97%	20	0,19	21
BARCELONA	5	19,50%	20	0,20	20
BARCELONA	6	26,74%	20	0,19	21
BILBAO	4	16,97%	20	0,19	21
BILBAO	5	19,50%	20	0,20	20
BILBAO	6	26,74%	20	0,19	21
CORUÑA	4	16,97%	20	0,19	21
CORUÑA	5	19,50%	20	0,20	20
CORUÑA	6	26,74%	20	0,19	21
SORIA	4	23,93%	>30	0,19	22
SORIA	5	20,89%	>30	0,19	21
SORIA	6	29,51%	>30	0,19	22

Tabla 6.15. Parámetros de evaluación de calidad del aire interior en las viviendas modeladas para el periodo CTE DB HS3

Según la zona climática y el número de ocupantes, el porcentaje de tiempo de superación de umbrales se supera en mayor o menor medida. La dependencia fuerte de la ocupación (penalizando la baja ocupación en cuanto a dimensionamiento de las aberturas) parece sugerir que un dimensionamiento mayor supone una mejora de calidad de aire interior, en dormitorios. Asimismo, en zonas climáticas más exigentes, el problema no está del todo resuelto, ya que en circunstancias normales existe una peor calidad de aire en el interior. Esto queda dentro de los problemas a resolver. Sin embargo, en condiciones de dimensionamiento máximo (2 ocupantes por dormitorio y 5 o 6 ocupantes para salón), con el dimensionamiento de las aberturas mínimo correspondiente ($4 \cdot q_{va}$ según el CTE) expresado en la definición del cálculo los escenarios en la primera parte del capítulo, se reducen las concentraciones máximas en ambas estancias.

Fig. 6.24. Concentración de CO₂. Archivo CONTAM. 4 ocupantes. CTE DB HS3 Fig. 6.25. Concentración de CO₂. Archivo CONTAM. 5 ocupantes. CTE DB HS3

Los escenarios de alta ocupación se resuelven de una manera más efectiva dentro de las viviendas realizadas con la normativa del CTE DB HS3 que con las previas, factor que tiene que ver con el dimensionamiento de las aberturas para entrada de aire y el caudal de extracción mayor, dependiente de la ocupación. El dimensionamiento de los dormitorios individuales parece insuficiente según las simulaciones, siendo una de las estancias que supera ampliamente los 1200 ppm de CO₂.

Fig. 6.26. Concentración de CO₂. Archivo CONTAM. 6 ocupantes. CTE DB HS3

6.5.4 ESCENARIO A RAÍZ DE LA NORMA UNE EN 15251

Este escenario y conjunto de situaciones para el análisis se realiza a partir de las modificaciones de las condiciones de contorno, asumiendo que se realizaran en el edificio las obras necesarias:

- Como en el escenario del CTE, se prevé la instalación de tiro vertical natural para extracción en baños y cocinas, hasta la cubierta, de dimensiones según la ficha de cálculo en el apartado «Definición de los escenarios y variables del análisis». El tiro será de caudal constante garantizado por medios mecánicos.
- Ajuste de dimensiones de aberturas de admisión en las ventanas, aumentando la superficie de admisión en función de la ocupación, aunque el caudal de cálculo se fije como el máximo entre el cálculo de caudal por persona y el cálculo de caudal por superficie de estancias “secas”.
- Se continúa con el mismo nivel de estanqueidad de las ventanas, que según la zona climática serán de clase 1 o clase 2 (norma UNE EN 12207:2000), y la situación de los aireadores o aberturas de admisión por encima del 1,80 m.

Este tiro vertical y el caudal constante de extracción estabiliza genera una depresión en la vivienda continua que estabiliza los caudales de ventilación. Los caudales de renovación de aire varían con respecto al nivel de calidad que estemos considerando, yendo de 0,78 a 1,11 h⁻¹. El caudal por las ventanas es mucho más constante, perdiendo ya casi la oscilación que aparecía en el esquema anterior.

Fig.6.27. Caudales en las ventanas de las viviendas modeladas para el periodo UNE EN 15251.

Código	Datos climáticos /orientación	NORMATIVA DE SIMULACION	CARPINTERIAS	OCUP.	ACH MAXIMO	concentración media de CO ₂	EDAD DEL AIRE MAX
CA.1.5.46	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD I	CLASE 2	4	1,11	608	1,03
CA.1.5.47	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD I	CLASE 2	5	1,11	617	0,90
CA.1.5.48	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD I	CLASE 2	6	1,11	624	0,92
CA.1.5.49	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD II	CLASE 2	4	0,78	625	1,32
CA.1.5.50	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD II	CLASE 2	5	0,78	694	1,31
CA.1.5.51	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD II	CLASE 2	6	0,78	708	1,30
CA.1.5.52	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD III	CLASE 2	4	0,48	792	2,27
CA.1.5.53	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD III	CLASE 2	5	0,48	884	2,39
CA.1.5.54	MADRID	UNE EN 15251-CALIDAD III	CLASE 2	6	0,48	911	2,45

Tabla x.1. Condiciones generales de ventilación en las viviendas modeladas para el periodo UNE EN 15251

Las renovaciones de caudal de aire sufren variación con respecto a la categoría de calidad del aire que estemos considerando en cuanto a dimensionamiento. Para la categoría de calidad I tenemos un caudal de renovación de $1,11 \text{ h}^{-1}$. Para la categoría de calidad II de $0,78$, estando ya dentro de los números de cálculo del CTE DB HS3. En la categoría de calidad III en principio correspondiente a la edificación ya existente, el caudal de renovación baja hasta niveles de $0,48 \text{ h}^{-1}$, por debajo del nivel de ventilación establecido en el CTE DB HS3 e incluso en la NTE ISV 75. Esto puede suponer un riesgo para el aseguramiento de la calidad del aire interior en este tipo de viviendas.

Datos climáticos /orientación	OCUP	CONCENTRACION CO ₂ MAX (ppm)	ESTANCIA	CONCENTRACION VOC MAX (kg/kg)	ESTANCIA	CONCENTRACION HCHO MAX (ppm)	ESTANCIA
UNE EN 15251-CALIDAD I	4	1109	dormitorio	0,077	dormitorio	0,012	dormitorio

UNE EN 15251-CALIDAD I	5	1180	dormitorio	0,085	dormitorio	0,013	dormitorio
UNE EN 15251-CALIDAD I	6	1233	dormitorio	0,091	dormitorio	0,013	dormitorio
UNE EN 15251-CALIDAD II	4	1357	SALON	0,141	dormitorio	0,015	dormitorio
UNE EN 15251-CALIDAD II	5	1577	SALON	0,17	dormitorio	0,015	dormitorio
UNE EN 15251-CALIDAD II	6	1423	SALON	0,11	dormitorio	0,014	dormitorio
UNE EN 15251-CALIDAD III	4	2064	SALON	0,234	dormitorio	0,018	dormitorio
UNE EN 15251-CALIDAD III	5	2633	SALON	0,233	dormitorio	0,017	dormitorio
UNE EN 15251-CALIDAD III	6	2228	SALON	0,147	dormitorio	0,015	dormitorio

Tabla 6.16. Concentración de contaminantes en las viviendas modeladas para el periodo UNE EN 15251

Las concentraciones de contaminantes se reducen sensiblemente en comparación con los escenarios previos, para las categorías de calidad I y II. Sin embargo las simulaciones con la categoría de calidad III supone un empeoramiento con respecto a casi cualquiera de los escenarios previos en cuanto a la calidad del aire interior.

Datos climáticos /orientación	OCUP	TIEMPO SUPERACION UMBRALES (CO ₂ >1200 ppm)	PPI (estimada)	CO ₂ ^{0,25}	PPI (según UNE EN 15251:2008) $PPI=395 \cdot e^{-15,15 \cdot (CO_2)^{0,25}}$
UNE EN 15251-CALIDAD I	4	0,00%	15	0,20	19
UNE EN 15251-CALIDAD I	5	0,00%	15	0,20	19
UNE EN 15251-CALIDAD I	6	10,00%	15	0,20	19
UNE EN 15251-CALIDAD II	4	5,03%	20	0,20	19
UNE EN 15251-CALIDAD II	5	17,98%	30	0,19	21
UNE EN 15251-CALIDAD II	6	18,12%	30	0,19	21
UNE EN 15251-CALIDAD III	4	28,54%	>30	0,19	23
UNE EN 15251-CALIDAD III	5	30,85%	>30	0,18	25
UNE EN 15251-CALIDAD III	6	32,47%	>30	0,18	25

Tabla 6.17. Parámetros de evaluación de calidad del aire interior en las viviendas modeladas para el periodo UNE EN 15251

En la página siguiente, las gráficas para la categoría de calidad I indican que para todas las situaciones de ocupación y en distintas climatologías, este escenario es el que cumple en toda circunstancia con la limitación que establece de manera blanda la norma UNE EN 15251:2008. Esto significa que a efectos de la calidad del aire interior, esta será la referencia a seguir, en cuanto a objetivo a realizar. La problemática que puede conllevar es la repercusión a nivel energético que tiene, asumiendo que es necesaria la instalación de un sistema mecánico de extracción de aire con un caudal de 1,11 renovaciones/hora (h^{-1}). En el análisis energético estableceremos la demanda asociada de este sistema.

Fig. 6.28. Concentración de CO₂. Archivo CONTAM. 4 ocupantes. UNE EN 15251. CALIDAD I

Fig. 6.29. Concentración de CO₂. Archivo CONTAM. 5 ocupantes. UNE EN 15251. CALIDAD I

Fig. 6.30. Concentración de CO₂. Archivo contam. 6 ocupantes. UNE EN 15251. CALIDAD I

6.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS. COMPARACIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE INTERIOR ENTRE LOS DISTINTOS ESCENARIOS NORMATIVOS

La comparación de la calidad de aire interior la vamos a realizar por el método a largo plazo de huella de calidad ambiental que se ha apuntado anteriormente. La huella determina, en la mayor parte del espacio de la residencia o edificio (95%) la distribución horaria de la calidad de aire medida en concentración de CO₂ en los niveles establecidos en la norma UNE EN 15251:2008 como niveles de calidad referidos a la exigencia del espacio a diseñar o monitorizar.

El resultado de las distintas evaluaciones de calidad del aire realizados para los escenarios a analizar (PRE NTE ISV 75, NTE ISV 75, CTE DB HS3 Y UNE EN 15251) obtenemos las siguientes gráfica x.x.. En ella podemos observar la tendencia en los periodos anteriores al CTE a mayores concentraciones de CO₂ en el interior y consecuentemente una calidad del aire inferior.

6.6.1 CAUDAL DE RENOVACIÓN

El caudal de renovación en los distintos escenarios modelados varía según tres parámetros fundamentales: la ocupación (en las normativas en que se prescribe el aumento del caudal por persona en la vivienda), la superficie de la vivienda (en normativas que incluyen un caudal por m²) y la zona climática (siendo inferior el caudal cuanto mayor es la severidad climática invernal).

Fig. 6.31. Escenarios de simulación. Diferenciación según factor de influencia en el caudal de renovación

6.6.2 CONCENTRACIÓN MEDIA DE CO₂

En todos los casos, salvo en las situaciones de alta ocupación en el escenario PRE NTE ISV 75 y UNE EN 15251: CALIDAD III la concentración media no superó los 900 ppm. 900 ppm es el nivel que se está barajando como límite en la revisión de la legislación española al respecto, el Documento básico de salubridad, del Código técnico de la edificación.

Fig. 6.32. Escenarios de simulación. Concentración media de CO₂

6.6.3 EDAD DEL AIRE

La edad del aire salvo en los escenarios de UNE EN 15251: CALIDAD I, están por encima de la unidad. Según la definición de la edad del aire esto ocurre cuando el caudal de renovación es inferior a la unidad. Cualquier medida enfocada a conseguir una mayor calidad del aire tenderá a aumentar su caudal de renovación, como una de las opciones fundamentales.

La edad del aire media en los diferentes escenarios no varía con respecto a la orientación del bloque, sin embargo si lo hace con respecto a la ocupación (4, 5 o 6) y al escenario normativo considerado (caudal de renovación). No varía sin embargo respecto a la zona climática de referencia.

Fig. 6.33. Escenarios de simulación. Media de edad del aire.

6.6.4 ESTANCIAS CON MAYORES CONCENTRACIONES

En general, las mayores concentraciones se dan en distintas estancias dependiendo de qué contaminante estemos caracterizando. Por tanto es más probable encontrarnos mayor concentración de CO₂ en el salón, donde la presencia de los ocupantes es mayor. En máxima ocupación. Sin embargo, en los dormitorios, dobles o individuales, la concentración de contaminantes de origen diverso, como son los acabados interiores, mobiliario y aromatizadores son mayores que en el salón.

6.6.5 CONCENTRACIONES DE OTROS CONTAMINANTES (HCHO Y TVOC)

Las concentraciones de otros contaminantes dependen fundamentalmente de la renovación continua del aire interior, y de la medida del caudal de renovación para diluir las concentraciones generadas de una manera continua. Tanto el formaldehído como los compuestos orgánicos volátiles sufren variación en la emisividad en función de las condiciones de temperatura y humedad, por lo que a mayor temperatura interior se produce una mayor emisividad de estos contaminantes, y correspondientemente una mayor exposición a ellos. Es conveniente mantener los espacios interiores residenciales ventilados en proporción a la temperatura interior.

Fig. 6.34. Concentración de HCHO en vivienda. CTE DB HS3. 4 ocupantes

Fig. 6.35. Concentración de TVOCs en vivienda. CTE DB HS3. 4 ocupantes

Como observamos en las gráficas sobre estas líneas con el caudal continuo garantizado en las

normativas a partir del CTE la concentración de contaminantes no provenientes de los ocupantes se mantiene constante si no hay variaciones en la emisividad. Estas variaciones suelen venir a partir de reformas y cambios de mobiliario, momento en el que habrá de aumentar el caudal de renovación, durante un tiempo prolongado, para evitar concentraciones molestas de estos químicos.

En cuanto a la concentración en cuanto a número de ocupantes, no existe una relación directa, sino más bien relacionada con el caudal de renovación

6.6.6 TIEMPO DE SUPERACIÓN DE UMBRALES

El tiempo de superación de umbrales, entendiendo el umbral por el definido en la norma UNE EN 15251 y que se ha seleccionado como referencia en esta tesis como el valor límite de referencia para la vivienda existente en cuanto a marcador de la calidad del aire interior varía según normativas, ocupación y zona climática. El estudio de este parámetro es más complejo que los anteriores, requiriendo su estudio un mayor desarrollo.

Si lo estudiamos por número de ocupantes, vemos que la relación es directa en las situaciones normativas que no aumentan el caudal con respecto a la ocupación.

Fig. 6.37. Tiempo de superación de umbrales para 4 ocupantes. Todos los escenarios

Fig. 6.38. Tiempo de superación de umbrales para 5 ocupantes. Todos los escenarios

El tiempo de superación de umbrales aumenta proporcionalmente al aumento de ocupantes en los escenarios PRE NTE ISV 75, NTE ISV 75 y las distintas categorías de calidad del escenario UNE EN 15251. Aumenta ligeramente en los escenarios del CTE DB HS3, pero no en igual grado. No hay variación significativa por zona climática.

En cuanto a la orientación, observamos dos aspectos diferenciados:

- La inclusión o no del viento en el modelado hace que las diferencias sean grandes en cuanto a la calidad del aire interior y a los tiempos de superación de umbrales. Esto implica que en situaciones urbanas con poca exposición al viento, el comportamiento del modelo se acercará más a las situaciones en que no se precisa la orientación (archivos en los que se ha incluido el modelado de la influencia del viento en cada ventana).
- En el caso de inclusión de la variable de viento en el modelado, la orientación del bloque tiene una gran influencia en cuanto al tiempo de superación de umbrales, en los escenarios con dependencia fuerte de las condiciones exteriores. En el escenario previo a la normativa (PRE NTE ISV 75), la variación es muy sensible. En el escenario NTE ISV 75 la variación es poco sensible

Fig. 6.39. Tiempo de superación de umbrales (>1200 ppm de CO₂) para 4 ocupantes por orientación de bloque con viento

En cuanto a las zonas climáticas, no se observa una influencia grande en cuanto a tiempo de superación de umbrales, salvo en las zonas con severidad invernal fuerte, donde empeora ligeramente este ratio en comparación con las zonas climáticas con severidad invernal menor.

Tiempo de superación de umbrales (>1200 ppm de CO₂) para 4 ocupantes y zona climática

Fig. 6.40. Escenario de simulación CTE DB HS3. Tiempo de superación de umbrales según zona climática

6.6.7 PORCENTAJE DE INSATISFECHOS

El cálculo del porcentaje de insatisfechos se introdujo a partir de la publicación del “*método de Fanger*” de evaluación de las condiciones interiores en cuanto a aire interior¹⁴⁵. Representa el número de personas que, al entrar en el local (visitantes), expresa insatisfacción con la calidad del aire. En ventilación residencial no se ha desarrollado este indicador en las normativas, pero si hacemos la asimilación del espacio residencial a un espacio en el que cada vez se desarrollan más actividades (laborales incluidas) se debería tener en cuenta este indicador consecuentemente. Está relacionado con la concentración media de CO₂, según la siguiente ecuación:

$$PPI = 395 \cdot e^{-15,15 \cdot (CO_2)^{0,25}}$$

En cuanto a los resultados en el análisis realizado obtenemos la siguiente gráfica donde se muestra en azul cuatro ocupantes, en granate 5 ocupantes y en verde 6 ocupantes.

Fig. 6.41. Escenario de simulación CTE DB HS3. PPI según zona climática

¹⁴⁵Fanger, P.O., 1989. The new comfort equation for indoor air quality. ASHRAE Journal (10): 33-38

Para las distintas zonas climáticas se observa la misma tendencia que en el apartado anterior (6.6.6.). En la siguiente gráfica se compara el mismo aspecto referente al porcentaje de insatisfechos entre los distintos escenarios y variación de los ocupantes. De nuevo encontramos, en azul cuatro ocupantes, en granate 5 ocupantes y en verde 6 ocupantes.

Fig. 6.42. Escenarios de simulación. PPI según número de ocupantes.

El mayor rango de PPI se encuentra proporcionalmente relacionado a la concentración media de CO₂ y a la huella ambiental de cada uno de los escenarios, que se muestra, para número de ocupantes en la página siguiente.

Como conclusiones a este primer apartado del análisis de la calidad del aire interior nos encontramos con las siguientes conclusiones:

- En cuanto al porcentaje de tiempo de superación de umbrales de concentración de CO₂ la situación previa al año 2006 (NTE ISV 75) es similar a la posterior (CTE DB HS3) en calidad ambiental
- la edificación construida de manera previa a la normativa NTE ISV 75 (escenario Pre NTE ISV 75), se caracteriza por alta variabilidad y calidad del aire interior inferior.
- Para los escenarios según las normativas NTE ISV 75 y CTE DB HS3, la calidad ambiental está dentro de los parámetros establecidos en la norma EN 15251 (superando los 1200 ppm en periodos cortos), salvo para ocupación de 5 a 6 ocupantes.
- Únicamente el nivel de ventilación calidad I de la norma EN 15251:2007 garantiza en todas las situaciones de ocupación una calidad del aire optimizada, según los parámetros establecidos en la EN 15251:2007.
- La exposición a viento y la orientación del bloque influyen en las concentraciones de contaminantes interiores de manera sensible, por lo que para realizar un análisis con garantías es necesario introducir la variable del viento, la orientación del edificio y la incidencia de la presión de viento en la fachada.
- En cuanto a las zonas climáticas, la calidad de aire interior se ve afectada por las condiciones locales de climatología, sobre todo en cuanto a las condiciones de severidad invernal. Es necesario realizar análisis representativos en todas las estaciones.

Fig. 6.43. Escenarios de simulación. Huellas ambientales por ocupación basadas en los periodos de concentración de CO₂

6.7 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

El análisis de la demanda energética con el software EnergyPlus desde el interface de designBuilder toma como punto de partida los siguientes supuestos:

- Caudal de renovación desde los datos obtenidos con el software CONTAM tomando como punto de partida el ACH obtenido en el apartado previo de calidad de aire.
- Se analizarán los escenarios basados en los distintos periodos normativos, pero no se van a modificar las condiciones de envolvente en cuanto a aspectos térmicos, ni de materiales.
- Las modificaciones en cuanto a los periodos normativos serán únicamente referidas a los sistemas de ventilación, admisión y extracción de aire, dejando al software el dimensionado de los sistemas.
- Se toman como características de las viviendas las establecidas en el capítulo de caracterización, referidas al edificio demostrador, como edificio de referencia.
- Se aplicarán los perfiles de uso extraídos del CTE DB HE1 (apéndice C) para el establecimiento de la demanda global del sistema (contabilizando en el global el aporte de todas las cargas del sistema de calentamiento y de enfriamiento).
- Asimismo se introduce en los meses de verano, el enfriamiento nocturno para reducir las cargas de climatización del sistema.

El mapeado de simulaciones a realizar es descrito en el siguiente gráfico:

Fig. 6.44. Esquema descriptivo del proceso de simulación y variables incluidas.

6.7.1 PERIODO PREVIO A LA NORMATIVA. ESCENARIO PRE NTE ISV 75

Durante este periodo, que corresponde con el original del edificio demostrador, y el de la NTE ISV 75, la ventilación no tiene un sistema mecánico que demande energía y la demanda derivada de la ventilación tiene dos fuentes:

- El acondicionamiento térmico del aire a climatizar
- Las pérdidas producidas por la infiltración y exfiltración de aire.

Como observamos en el estado de la cuestión, las pérdidas térmicas por ventilación pueden suponer un 45% de las pérdidas térmicas globales. (Orme et al, 2000). En este caso vemos que la demanda energética en el escenario que nos ocupa es elevada, y coherente con la que se baraja en las certificaciones energéticas y el espectro estadístico que establece el DG Energy para este tipo de vivienda, en bloques de viviendas en España.

Fig. 6.45. Periodo previo a la implantación de la NTE ISV 75. Esquema de ventilación por ventana, sin tiro natural vertical, salvo en ocasiones en cocinas para combustión y el tiro provocado por el hueco de escaleras. Elaborado por el autor

Cargas debidas a la infiltración y a la ventilación

En este caso, las cargas debidas a la infiltración son elevadas, y suponen un alto porcentaje de la demanda del sistema. Asimismo, la posibilidad, (establecida en el perfil de utilización del CTE) del enfriamiento nocturno en verano, con un caudal de 4 renovaciones/hora durante las noches del periodo de verano, aumentan la media de caudal de renovación (vemos que el caudal previsto por el programa CONTAM era aproximadamente 0,60 y en la simulación energética global es 1,15).

Tabla 6.18. Demanda energética en energía primaria debida a acondicionamiento térmico, a infiltración y ventilación y porcentaje. PRE NTE ISV 75. Variable orientación.

Fig. 6.46. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid. PRE NTE ISV 75 4 ocupantes. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus (designBuilder). Orientación Norte-Sur

Fig. 6.47. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid. PRE NTE ISV 75 4 ocupantes. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus (designBuilder). Orientación Este-Oeste

A continuación se muestra una tabla que resume los resultados de la simulación para distintas orientaciones y modificando el número de ocupantes de la vivienda, como hemos realizado en el apartado referente a análisis de calidad del aire.

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas.	Ocupación	Caudal de Renovación global	Demanda Por Ventilación+ infiltración	Demanda total de calefacción	Calor sensible
Escenario de simulación	personas	h^{-1}	kWh/vivienda	kWh/vivienda	kWh/vivienda
PRE NTE ISV 75- NORTE SUR	4P	1,15	-2976,53	6052,17	5976,02
	5P	1,15	-3011,00	5748,69	5676,26
	6P	1,16	-3046,36	5456,35	5388,14
PRE NTE ISV 75- ESTE OESTE	4P	1,16	-3070,49	6127,27	6050,85
	5P	1,16	-3103,97	5833,52	5761,13
	6P	1,16	-3138,03	5547,43	5479,15

Tabla 6.19. Resumen de resultados de ventilación. Madrid. PRE NTE ISV 75. Análisis anual

En cuanto a la demanda global, y demanda de acondicionamiento térmico y ventilación los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas en uso final de energía (no energía primaria)	Número de ocupantes	Demanda energética global por m^2 acondicionado	Demanda energética global por m^2 acondicionado de HVAC
Escenario de simulación	personas	[kWh/ m^2a]	[kWh/ m^2a]
PRE NTE ISV 75- NORTE SUR	4P	192,58	117,24
	5P	183,96	112,85
	6P	175,58	108,66
PRE NTE ISV 75- ESTE OESTE	4P	196,03	125,08
	5P	183,96	120,92
	6P	175,58	116,93

Tabla 6.20. Resumen de resultados de demanda energética. Madrid. PRE NTE ISV 75. Análisis anual

Se observa mayor demanda en las orientaciones de este y oeste, no atribuible a los sistemas de ventilación, sino por las ganancias y pérdidas a través de la envolvente. La demanda de acondicionamiento térmico disminuye con el aumento del número de ocupantes, debido a las cargas metabólicas, como se aprecia en la gráfica x.x bajo estas líneas.

Fig. 6.48. Demanda energética de acondicionamiento térmico según orientación y ocupantes. PRE NTE ISV 75.

6.7.2 ESCENARIO A PARTIR DE LA NORMA NTE ISV 75

Periodo similar al anterior, con la diferencia principal en la inclusión de tiro natural en baños y cocinas. Este tiro pasivo (que puede ser mecánico pero en la mayoría de los casos es pasivo) tiene dimensiones mínimas de 200x200 mm hasta la cubierta garantizando la ausencia de obstáculos que dificulten el efecto Bernoulli. La infiltración y la ventilación es similar al escenario previo y la mayor diferencia la apreciamos en la calidad del aire interior, y no así en los aspectos relacionados con la energía.

Fig. 6.49. Periodo posterior a la implantación de la NTE ISV 75. Esquema de ventilación por ventanas, tiro natural o mecánico en baño y cocinas, de dimensionado estándar. Elaborado por el autor

Cargas debidas a la infiltración y a la ventilación

En este caso, las cargas debidas a la infiltración son elevadas, y suponen una demanda en alto porcentaje del sistema.

Tabla 6.21. Demanda energética en energía primaria debida a acondicionamiento térmico, a infiltración y ventilación y porcentaje. NTE ISV 75. Variable orientación.

Fig. 6.50. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid. NTE ISV 75 4 ocupantes. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus (designBuilder). Orientación Norte-Sur

Fig. 6.51. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid. NTE ISV 75 4 ocupantes. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus (designBuilder). Orientación Este-Oeste

A continuación se muestra una tabla que resume los resultados de la simulación para distintas orientaciones y modificando el número de ocupantes de la vivienda, como hemos realizado en el apartado referente a análisis de calidad del aire.

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas.	Ocupación	Caudal de Renovación global	Demanda Por Ventilación+ infiltración	Demanda total de calefacción	Calor sensible
Escenario de simulación	personas	h^{-1}	kWh/vivienda	kWh/vivienda	kWh/vivienda
NTE ISV 75- NORTE SUR	4P	1,15	-2976,06	6062,00	6062,00
	5P	1,15	-3010,74	5759,60	5759,60
	6P	1,16	-3045,96	5469,22	5469,22
NTE ISV 75- ESTE OESTE	4P	1,16	-3070,17	6137,75	6137,75
	5P	1,16	-3103,58	5843,21	5843,21
	6P	1,16	-3137,72	5559,19	5559,19

Tabla 6.22. Resumen de resultados de ventilación. Madrid. PRE NTE ISV 75. Análisis anual

En cuanto a la demanda global, y demanda de acondicionamiento térmico y ventilación los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas en uso final de energía (no energía primaria).	Número de ocupantes	Demanda energética global por m^2 acondicionado	Demanda energética global por m^2 acondicionado de HVAC
Escenario de simulación	personas	$[\text{kWh}/\text{m}^2]$	$[\text{kWh}/\text{m}^2]$
NTE ISV 75- NORTE SUR	4P	196,03	117,40
	5P	187,66	113,03
	6P	179,52	108,88
NTE ISV 75- ESTE OESTE	4P	196,03	125,25
	5P	187,66	121,07
	6P	179,52	117,12

Tabla 6.23. Resumen de resultados de demanda energética. Madrid. PRE NTE ISV 75. Análisis anual

Se observa mayor demanda en las orientaciones de este y oeste, no atribuible a los sistemas de ventilación, sino por las ganancias y pérdidas a través de la envolvente. La demanda de acondicionamiento térmico disminuye con el aumento del número de ocupantes, debido a las cargas metabólicas, como se aprecia la gráfica 6.52 bajo estas líneas.

Fig. 6.52. Demanda energética de acondicionamiento térmico según orientación y ocupantes. NTE ISV 75.

6.7.3 ESCENARIO EN EL CÓDIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE DB HS3)

Es esta la primera normativa obligatoria para edificación residencial en el campo de la ventilación en la legislación española. Las modificaciones constructivas que se incorporan en el modelo para adaptarlo a las exigencias del CTE DB HS3 son:

1. Inclusión de sistema de ventilación mecánica de extracción con caudal dependiente de la ocupación máxima prevista en la vivienda como parámetro de diseño.
2. Reducción de la infiltración de la envolvente a través de las carpinterías. No se procede al cambio de la ventana en todos sus aspectos (térmicos, factor solar,...) sino solo el aspecto de permeabilidad al aire exterior.
3. Inclusión de aberturas de admisión de aire que garanticen la entrada de caudal de renovación de aire sin inducir sobrepresión en la boca de entrada (con velocidades que provocan corrientes molestas).
4. Inclusión de las aberturas de paso interior garantizando el correcto funcionamiento multizonal de la ventilación.

Fig. 6.53. Periodo posterior a la implantación del CTE (DB HS3). Esquema de ventilación por aireadores, ventanas y extracción por conducto vertical de extracción en baño y cocina, con extracción en la salida del tiro. Elaborado por el autor.

Cargas debidas a la infiltración y a la ventilación

La reducción de la permeabilidad de la envolvente, y el aporte de un caudal continuo causado por depresión diferencial inducida en los tiros de extracción, que regulan la infiltración y la admisión de aire por los medios establecidos a tal efecto ayuda a la reducción de las pérdidas por infiltración y por ventilación.

Tabla 6.24. Demanda energética en energía primaria debida a acondicionamiento térmico, a infiltración y ventilación y porcentaje. CTE DB HS3. Variable orientación y ocupantes.

En cuanto a las zonas climáticas establecidas para el análisis nos encontramos los siguientes resultados.

Tabla 6.25. Demanda energética en energía primaria debida a acondicionamiento térmico, a infiltración y ventilación y porcentaje. CTE DB HS3. Variables zonas climáticas y ocupantes.

Fig. 6.54. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid.
CTE DB HS3 4 ocupantes. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus (designBuilder). Orientación
Norte-Sur

Fig. 6.55. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid.
CTE DB HS3 4 ocupantes. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus (designBuilder). Orientación
Este-oeste

A continuación se muestra una tabla que resume los resultados de la simulación para distintas orientaciones y modificando el número de ocupantes de la vivienda, como hemos realizado en el apartado referente a análisis de calidad del aire.

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas en kWh.	Ocupación	Caudal de Renovación global	Demanda Por Ventilación+ infiltración	Demanda total de calefacción	Calor sensible
Escenario de simulación	personas	h ⁻¹	kWh/ vivienda	kWh/ vivienda	kWh/ vivienda
CTE DB HS3- NORTE SUR	4P	0,96	-3105,70	3648,77	3648,77
	5P	1,05	-3515,50	3645,28	3645,28
	6P	1,24	-4252,89	3914,57	3914,57
CTE DB HS3- ESTE OESTE	4P	0,96	-3304,80	3699,01	3699,01
	5P	1,05	-3719,46	3699,04	3699,04
	6P	1,24	-4472,26	3965,73	3965,73

Tabla 6.26. Resumen de resultados de ventilación. Madrid. CTE DB HS3. Análisis anual

En cuanto a la demanda global, y demanda de acondicionamiento térmico y ventilación los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas en uso de energía (no energía primaria)	Número de ocupantes	Demanda energética global por m ² acondicionado	Demanda energética global por m ² acondicionado de HVAC
Escenario de simulación	personas	[kWh/m ²]	[kWh/m ²]
CTE DB HS3- NORTE SUR	4P	133,43	79,79
	5P	135,33	80,97
	6P	141,66	87,03
CTE DB HS3- ESTE OESTE	4P	149,85	88,48
	5P	151,90	89,74
	6P	158,12	95,76

Tabla 6.27. Resumen de resultados de demanda energética. Madrid. CTE DB HS3. Análisis anual

Como ya se observaba para el escenario NTE ISV 75 se aprecia mayor demanda en las orientaciones de este y oeste, no atribuible a los sistemas de ventilación, sino por las ganancias y pérdidas a través de la envolvente. La demanda de acondicionamiento térmico aumenta con el aumento del número de ocupantes, debido al aumento de caudal de ventilación relativo por ocupante, que contrarresta la ganancia por cargas metabólicas, como se aprecia la gráfica 6.56. bajo estas líneas.

Fig. 6.56. Demanda energética de acondicionamiento térmico según orientación y ocupantes. Madrid. CTE DB HS3. Análisis anual

6.7.4 ESCENARIO A RAÍZ DE LA NORMA UNE EN 15251

No siendo un periodo propiamente dicho, puesto que su implantación no se ha producido a nivel nacional, sino que corresponde a una norma que ha de ser traspuesta mediante mecanismos legislativos propios. El esquema constructivo no tiene variaciones con respecto al esquema que se plantea en el escenario CTE DB HS3.

Fig. 6.57. Periodo posterior a la implantación del UNE EN 15251. Esquema de ventilación por aireadores, ventanas y extracción por conducto vertical de extracción en baño y cocina, con extracción en la salida del tiro. Elaborado por el autor.

Cargas debidas a la infiltración y a la ventilación

La reducción de la permeabilidad de la envolvente, y el aporte de un caudal continuo causado por depresión diferencial inducida en los tiros de extracción, que regulan la infiltración y la admisión de aire por los medios establecidos a tal efecto ayuda a la reducción de las pérdidas por infiltración y por ventilación. En las gráficas de la página siguiente se muestran, para los distintas categorías de calidad, la ventilación e infiltración.

Tabla 6.28. Demanda energética en energía primaria debida a acondicionamiento térmico, a infiltración y ventilación y porcentaje. UNE EN 15251. Variable categoría de calidad y ocupantes.

Fig. 6.58. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid.
UNE EN 15251. 4 ocupantes. 10 viviendas. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus
(designBuilder). Categoría de calidad I

Fig. 6.59. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid.
UNE EN 15251. 4 ocupantes. 10 viviendas. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus
(designBuilder). Categoría de calidad II

Fig. 6.60. Cargas debidas a infiltración y aportes de enfriamiento nocturno. Madrid.
UNE EN 15251. 4 ocupantes. 10 viviendas. Analisis mensual. Archivo EnergyPlus
(designBuilder). Categoría de calidad III

A continuación se muestra una tabla que resume los resultados de la simulación para distintas categorías y modificando el número de ocupantes de la vivienda, análogamente a lo desarrollado con los escenarios previos y como hemos realizado en el apartado referente a análisis de calidad del aire.

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas.	Ocupación	Caudal de Renovación global	Demanda Por Ventilación+ infiltración	Demanda total de calefacción	Calor sensible
Escenario de simulación	personas	h^{-1}	kWh/vivienda	kWh/vivienda	kWh/vivienda
UNE 15251 CALIDAD I	4P	1,57	-8491,52	8884,06	8884,06
	5P	1,58	-8636,09	8396,83	8396,83
	6P	1,59	-8780,99	7925,94	7925,94
UNE 15251 CALIDAD II	4P	1,24	-6600,28	7180,72	7180,72
	5P	1,24	-6735,11	6719,85	6719,85
	6P	1,25	-6868,52	6274,87	6274,87
UNE 15251 CALIDAD III	4P	0,90	-4640,11	5514,86	5514,86
	5P	0,91	-4758,80	5086,55	5086,55
	6P	0,91	-4874,88	4677,77	4677,77

Tabla 6.29. Resumen de resultados de ventilación. Madrid. UNE EN 15251. Análisis anual

En cuanto a la demanda global, y demanda de acondicionamiento térmico y ventilación los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Simulación anual efectuada en edificio de 16 viviendas en uso de energía final (no energía primaria)	Número de ocupantes	Demanda energética global por m^2 acondicionado	Demanda energética global por m^2 acondicionado de HVAC
Escenario de simulación	personas	[kWh/ m^2]	[kWh/ m^2]
UNE 15251 CALIDAD I	4P	172,56	115,76
	5P	169,20	111,30
	6P	166,04	107,05
UNE 15251 CALIDAD II	4P	152,84	96,13
	5P	149,86	92,00
	6P	147,08	88,07
UNE 15251 CALIDAD III	4P	133,64	76,98
	5P	131,15	73,278
	6P	128,97	69,83

Tabla 6.30. Resumen de resultados de demanda energética. Madrid. UNE EN 15251. Análisis anual

Se observa una sensible diferencia tanto en valores globales de renovación de aire (medida incluyendo el periodo de ventilación nocturna en verano), entre las distintas categorías. Esto repercute directamente en la demanda energética asociada como podemos ver en las dos tablas en las líneas superiores. El valor de demanda una mayor demanda para las categorías. Al ser predominante en el dimensionamiento la variable de renovación por superficie ocupada que por número de ocupantes, la demanda energética global disminuye cuanto mayor es el número de ocupantes en la simulación, al sumarse la carga de calor metabólico al conjunto de las cargas que producen la demanda de energía global para acondicionamiento térmico y ventilación.

Fig. 6.61. Demanda energética de acondicionamiento térmico según categoría y ocupantes. Madrid. UNE EN 15251. Análisis anual

6.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS NORMATIVOS EN TERMINOS ENERGÉTICOS

Una vez analizados cada uno de los escenarios podemos analizar independientemente las variables que se han caracterizado y extractado en el análisis. Este análisis pretende establecer patrones de comportamiento con respecto a la demanda energética en los distintos escenarios de manera conjunta. Los parámetros que se han evaluado, que se detallan a continuación, son los siguientes:

- La demanda energética asociada a la infiltración
- La demanda energética asociada a la ventilación
- La demanda energética asociada al acondicionamiento térmico

6.8.1 DEMANDA ENERGÉTICA ASOCIADA A LA INFILTRACIÓN, LA VENTILACIÓN Y EL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO

Las pérdidas por infiltración se reducen desde el escenario previo a la normativa (PRE NTE ISV 75) a los posteriores, debido a la presión negativa que induce el tiro natural o mecánico en el interior, que hace que el aire tienda a entrar y no a salir, por la envolvente. Es por ello que algunos sistemas prevén un caudal continuo, pues este, aunque reducido, consigue en muchos de los casos estabilizar la corriente. Al mismo tiempo, este caudal hace que si la envolvente es muy permeable, el caudal de aire que se envía a través de la extracción sea elevado. Esto explica que en términos absolutos, la demanda energética asociada a la infiltración y ventilación es mayor en los escenarios previos al Código Técnico. Asimismo, el porcentaje de demanda energética debida al acondicionamiento térmico es mayor en las zonas climáticas de clima más suave (zonas C1 y C2). El porcentaje que representa la infiltración sobre el total de la demanda energética de acondicionamiento térmico varía según estos parámetros. En la siguiente gráfica podemos ver, para 4 ocupantes, los porcentajes en los distintos escenarios.

Fig. 6.62. Porcentaje de infiltración y ventilación sobre demanda energética (%) en energía primaria. 4 ocupantes. Madrid.

El aumento del número de ocupantes incrementa la demanda energética en el escenario CTE DB HS3 mientras que la reduce para los escenarios UNE EN 15251, PRE NTE ISV 75 y NTE ISV 75.

La capacidad de enfriamiento nocturno en verano depende en gran medida de la orientación del bloque.

Para los escenarios previos al CTE el porcentaje de energía primaria debida a la ventilación sobre el total de demanda energética asociada al acondicionamiento térmico es menor que en los escenarios CTE DB HS3 y UNE EN 15251. El mayor caudal en estos escenarios y el funcionamiento mecánico del sistema explican esto.

Fig. 6.63. Energía primaria asociada al acondicionamiento térmico. 4 ocupantes ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$)

La energía primaria asociada al acondicionamiento térmico, modificando únicamente las condiciones y sistemas de ventilación, dependen del caudal de renovación y la zona climática. La eficacia de esta

ventilación necesita, para ser contrastada, de la comprobación de la calidad del aire obtenida, que se estudiará en el apartado siguiente.

Fig. 6.64. Caudal medio anual de renovación de aire interior (h^{-1})

Observamos una ciertos aspectos relevantes:

- La zona climática influye en la demanda energética asociada a la ventilación. Así, para zonas con severidad invernal suave la proporción es mayor pero en términos numéricos absolutos la demanda es menor.
- La zona climática influye en el caudal de renovación. Así, para zonas con climatología invernal severa el caudal de renovación es menor. Igualmente para zonas con severidad climática de verano suave.
- La proporción menor (óptima) entre caudal de renovación y demanda energética asociada a acondicionamiento térmico la encontramos en el escenario CTE DB HS3 para alta ocupación (6 ocupantes) y UNE EN 15251 en calidad I.
- Para las zonas climáticas con severidad invernal suave la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico es menor, pero el porcentaje sobre el total que representa la ventilación y la infiltración es mayor.

6.9 CONCLUSIONES PARCIALES. COMPARACION INTEGRADA DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR Y DEMANDA ENERGÉTICA

Una vez obtenidos y analizados los resultados de ambos análisis, es necesario y clarificador integrar las dos variables principales en un solo indicador conjunto. Para ello vamos a seleccionar en primer término por un lado el% de tiempo por encima de 1200 ppm de CO₂ del análisis de calidad de aire interior y por otro lado la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico por parte del análisis energético. Los resultados van a ser extractados en primer lugar de manera individualizada y a continuación en conjunto. Se extractarán los datos según normativa, ocupantes. Y para el CTE DB HS3 se integrarán los resultados también por zona climática.

En primer lugar establecemos parámetros de evaluación para esta comparación. Tomemos como referencia para la calidad del aire el tanto por ciento de tiempo de superación de los umbrales. En la norma UNE EN 15251 nos indica a nivel informativo el 5% del tiempo como límite. Sin embargo utilizaremos una escala mayor teniendo en cuenta que con el 10% de superación de umbrales tenemos un porcentaje de insatisfechos calculado de 19%, correspondiente al intervalo entre la categoría I y la categoría II en cuanto a porcentaje de insatisfechos esperados.

6.9.1 PRE NTE ISV 75

Bajo estas líneas se muestra la relación establecida entre ambos parámetros con respecto a los escenarios de la situación previa a la NTE ISV 75. Se observa en la parte inferior las escalas establecidas, de calidad óptima de 0 a 10%, de calidad media, de 10 a 20% y de calidad inferior de 20% en adelante. Por otro lado, en cuanto a los datos, vemos que para este escenario la calidad ambiental tiene una calidad media-inferior. En situaciones de baja ocupación, como también es lo más común en la edificación residencial española según la estadística, la calidad de aire no es de calidad elevada, y tampoco en términos de demanda energética.

Fig. 6.64. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa y número de ocupantes.
PRE NTE ISV 75

6.9.2 NTE ISV 75

Para el escenario de mayor número de viviendas en cuanto a representatividad, observamos una calidad óptima para escenarios de ocupación media (4 ocupantes) empeorando con el aumento de ocupantes llegando a escenarios de calidad inferior. En cuanto a la demanda energética el rendimiento es mucho más mejorable. Con respecto a los parámetros de calificación energética, el escenario de la NTE ISV 75 representa una situación con necesidad de mejora de eficiencia energética. Comparando con escenarios con extracción mecánica (CTE) la demanda energética es mucho mayor debido a las pérdidas por dependencia de la climatología para el tiro térmico pasivo y la peor estanquidad de la envolvente, respecto a carpinterías.

Fig. 6.65. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa y número de ocupantes.
NTE ISV 75

6.9.3 CTE DB HS3

El escenario de la edificación construida a partir del año 2006 en cuanto a calidad del aire interior obtiene una calidad media, solo empeorando en situaciones de alta ocupación (6 ocupantes). Existe un salto en cuanto a demanda energética a partir de la utilización de extracción mecánica en baños y cocinas, que estabiliza el caudal de impulsión a través de las aberturas de la envolvente y la infiltración por las carpinterías.

Fig. 6.66. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa y número de ocupantes.
CTE DB HS3

La situación es similar cuando incluimos en el análisis por zona climática. En este análisis se observa que salvo para la zona climática E1, la calidad es media para 4 y 5 ocupantes. Para 6 ocupantes (alta ocupación) se encuentra en todas las zonas climáticas en zona de calidad inferior. En cuanto a la demanda energética asociada, nos encontramos con la distribución propia a la severidad climática que hemos considerado, creciente en cuanto a severidad climática de invierno. Esto será importante a la hora de considerar la adecuación de sistemas de optimización, como veremos en el siguiente capítulo.

Fig. 6.67. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa, zona climática y número de ocupantes. CTE DB HS3

Como conclusión de la comparación entre los distintos escenarios que representan la mayor parte de la edificación residencial española, según el análisis realizado, nos encontramos con que para escenarios de ocupación media (4 ocupantes), la calidad del aire es buena para la edificación correspondiente al escenario NTE ISV 75, media para el CTE DB HS3 e inferior para la situación previa a la normativa (PRE NTE ISV 75). La prioridad correspondería, en cuanto a calidad de aire, para la edificación construida con anterioridad a los años 80.

En términos de demanda energética, la mejora es sustancial con el uso de la extracción mecánica (escenario CTE DB HS3 en el esquema de análisis mostrado en la tesis doctoral). La diferencia en términos porcentuales es de hasta el 30%.

Fig. 6.68. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa y número de ocupantes. Todos los escenarios de edificación residencial existente.

6.9.4 ESCENARIO UNE EN 15251. PLANTEAMIENTO DE ESTRATEGIA DE OPTIMIZACIÓN

La aplicación de los parámetros de calidad contemplados en la norma europea significaría una mejora sustancial de la calidad del aire interior, pero al mismo tiempo, un aumento igualmente significativo en cuanto a la demanda energética asociada, para la categoría de calidad I. Por tanto, este escenario sería el deseable si solo tenemos en cuenta la calidad del aire interior, pero no así en cuanto a los propósitos de cumplimiento de eficiencia energética y reducción sustancial de las emisiones de GEI de la edificación residencial. La norma establece para edificación residencial existente la categoría de calidad III que encontramos similar en cuanto a calidad de aire al escenario pre normativo (PRE NTE ISV 75) pero con una demanda energética asociada mucho más baja.

CONCLUSIONES PARCIALES. CALIDAD AMBIENTAL SEGÚN ESCENARIO NORMATIVO Y NÚMERO DE OCUPANTES

Fig. 6.69. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa y número de ocupantes.

Todos los escenarios de edificación residencial existente y las categorías de calidad de UNE EN 15251.

Sería por tanto deseable, para la consecución de ambos objetivos de calidad de aire interior y demanda energética asociada a acondicionamiento térmico y ventilación, si planteáramos un escenario de optimización, que aunara por la calidad de aire interior correspondiente a la categoría de calidad I y la demanda energética asociada a la categoría de calidad III.

Fig. 6.70. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa, categoría de calidad y número de ocupantes
UNE EN 15251

Este va a ser el objetivo del siguiente capítulo de esta tesis, planteando la optimización en doble sentido:

- Por un lado la incorporación de un sistema de extracción mecánica con recuperación de calor adaptable a las características constructivas del edificio de referencia. la
- Por otro lado, optimización del uso de la ventilación mecánica al periodo de ocupación

6.10 ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LAS CONDICIONES DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR EN LA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EXISTENTE.

Hasta ahora hemos completado dos partes del análisis y evaluación previstos. El paso siguiente en cuanto al establecimiento de un análisis representativo de la situación de la edificación residencial existente en España y sobre todo la previa a la implantación del CTE, con el objeto de proporcionar una estrategia de optimización viable en cuanto a la mejora necesaria de la eficiencia energética de la misma, y la calidad del aire como prerequisite, será la de la evaluación experimental mediante toma de datos de distintos parámetros en muestras de la edificación existente.

La estrategia de toma de datos se basa en dos vertientes bien diferenciadas, que tiene que ver con la naturaleza de los contaminantes y parámetros de calidad que queremos caracterizar. Por un lado, los contaminantes relacionados con la emisividad de materiales y entornos interiores no tienen una variabilidad tan elevada como para necesitar una evaluación a largo plazo, y no es el objetivo de la tesis, al haber concluido que el parámetro fundamental de caracterización de la calidad del aire se puede limitar al estudio a largo plazo de la concentración de CO_2 . Por esta razón, evaluaremos con mediciones de corta duración, de hasta 1 día, los parámetros contaminantes formaldehído, Monóxido de Carbono y Compuestos orgánicos volátiles. Asimismo, esta medición a corto plazo, nos permitirá comprobar con la metodología experimental propuesta por Roulet, la renovación de aire unizonal, basado en la medida de la concentración de CO_2 .

Al mismo tiempo, continuando con el razonamiento previo, de la mayor importancia de la medición de la concentración de CO_2 a largo plazo, para evaluar la calidad ambiental de los espacios en cuanto a su calidad de aire interior se han realizado mediciones continuadas en el salón de 3 viviendas del edificio demostrador con que ha contado el análisis de la tesis doctoral. Las mediciones, por un periodo de 4 meses, como se ha establecido en el capítulo de Metodología, nos ha permitido obtener dos comprobaciones fundamentales: la validación del modelo de simulación en CONTAM; la evaluación real mediante medición de la calidad del aire y condiciones de ventilación dentro del edificio demostrador.

Fig. 6.71. Definición de metodología de medición experimental de datos de calidad de aire y consumo energético

6.11 ANALISIS DE CONDICIONES A LARGO PLAZO DE CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

Dentro del análisis realizado dentro del edificio demostrador se ha monitorizado un total de tres viviendas en cuanto a su concentración de CO_2 . Estas medidas no nos dan una muestra representativa de las condiciones reales del conjunto de viviendas. Tan solo podemos extraer datos, limitándose al número de usuarios que las ocupan. Al corresponder la tipología a la representativa en términos de ventilación, y aunque este estudio es ante todo parcial, dentro de sus limitaciones, nos permite evaluar los parámetros definidos de calidad de aire interior, % de tiempo por encima de umbrales de CO_2 y los aspectos energéticos definidos, en un demostrador a escala real.

La medición se ha realizado durante un periodo de 4 meses en tres viviendas del edificio demostrador, en el salón de las viviendas, según lo descrito en el capítulo de metodología. Los ocupantes son:

- En el 7º izquierda: 2 personas de más de 80 años.
- En el 7º derecha: 1 persona de más de 80 años con una persona de ayuda durante algunas horas de la mañana.
- En el 5º izquierda: 2 personas de más de 80 años.

A continuación se muestran medidas de CO_2 , Temperatura del aire y Humedad relativa del salón de las 3 viviendas, en tres días del mes de febrero de 2014 (12, 13 y 14). Existen variaciones importantes en los tres parámetros medidos entre las tres viviendas, con igual configuración, lo que incide en la idea de que el ajuste unívoco de un modelo a la medición real se puede dar en condiciones de definición del experimento muy controladas, y no en condiciones cotidianas. En el caso que nos ocupa, vemos preliminarmente las causas de las diferencias que existen en: la temperatura de consigna que establece cada usuario; la presencia y el número de ocupantes en el salón; y el régimen de ventilación que se realice en la estancia.

Fig. 6.72.. Concentración de CO_2 en medición de tres días consecutivos del mes de febrero de 2014.

Las huellas de calidad del aire, que se mostraron en el apartado de validación en cuanto a concentración de CO_2 en las distintas viviendas nos muestran, que, en gran medida, la calidad del aire del interior es aceptable o buena. Teniendo en cuenta que el número de ocupantes es bajo (1 o 2)

nos hace pensar que en condiciones de alta ocupación, las condiciones en cuanto a la huella ambiental serían bastante menos positivas.

Fig. 6.73. Gráficos de huella de calidad de aire de las viviendas monitorizadas.

De las mediciones de las viviendas obtenemos como conclusión, que el usuario también tiene una gran parte de la causa en cuanto a la calidad del aire interior. Esto puede parecer trivial, en cuanto a que resulta lógico, pero no lo es tanto si consideramos que existen contaminantes en el interior de las viviendas que no son perceptibles o asociados al CO₂ como son los bioefluentes y el olor. Además, nos encontramos con la circunstancia de que los sectores sociales y poblacionales que más tiempo pasan en los espacios residenciales son niños y ancianos, usuarios cuya tolerancia a los contaminantes interiores es menor. En cada vez un mayor número de casos en adultos, consta hipersensibilidad a determinados compuestos.

Las medias de medición en las viviendas son las siguientes:

	PISO 5ª Izquierda	PISO 7ª Derecha	PISO 7ª Izquierda
Ocupación	2	1	2
Temperatura media	24	26	22
Humedad relativa media	37	25	37
Concentración de CO₂ media	833	558	721

Tabla 6.31. Condiciones ambientales medias durante la medición

De nuevo nos encontramos con el valor medio de 900 ppm como válido pero poco expresivo en cuanto a la concentración y variaciones reales dentro de las viviendas. La vivienda del 5 izquierda tiene unos valores de concentración elevados de media, y sin embargo, no se producen picos relevantes en la medición. No sucede así lo mismo con la vivienda 7ª izquierda, cuyas concentraciones son mayores en valor pico y sin embargo, su media es mucho menor.

En las gráficas de la fig.6.74. se observa un extracto de las condiciones ambientales interiores de la medición realizada en las 3 viviendas muestra del estudio. En ellas observamos en la primera de las gráficas, la temperatura interior de las viviendas (líneas azul, verde oscuro y rojo) con respecto a la temperatura exterior (línea verde claro) que muestra una mayor inestabilidad. Se observan las diferencias en la temperatura media de cada una de las viviendas. En la segunda gráfica del conjunto se observa la variación de la humedad relativa. En ella se observan mayores picos de humedad relativa en la vivienda 7ª izquierda (en verde bajo la línea de humedad relativa exterior) debidos a la mayor presencia de personas durante periodos específicos (comida y cena) En la tercera gráfica observamos concentración de CO₂ en las distintas viviendas, que muestra una correlación clara con la variación de la humedad relativa en las viviendas, observable sobre todo en la vivienda 7ª izquierda (color verde). A continuación se muestran extractos de medición y graficas de 3 días continuos de medición entre enero y febrero de 2014.

Fig. 6.74. Gráficos de condiciones ambientales durante 3 días en las viviendas monitorizadas.

Asimismo, en términos de calidad de aire, el número de ocupantes que vayan a habitar la vivienda se convierte en un factor fundamental a la hora de promover una intervención de mejora de la calidad del aire, puesto que las concentraciones de contaminantes no son lo suficientemente altas, es decir, la huella ambiental tiene buena calidad, y la amortización de cualquier intervención sería compleja. Sin embargo, como hemos visto en el apartado de análisis de demanda energética, la incorporación de un sistema de extracción mecánico junto con una reducción de la permeabilidad de la envolvente, reduce la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico y ventilación en más de un 30%.

6.12 ANALISIS DE CONDICIONES PUNTUALES DE CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

El objetivo de este proceso de toma de datos es analizar mediciones puntuales (periodos de alrededor de 1 día) de la calidad ambiental real existente en viviendas construidas en distintos periodos normativos (escenarios en el análisis) respecto a los parámetros¹⁴⁶ (contaminantes de referencia) seleccionados como relevantes a la hora de determinar la calidad del aire. El análisis de los parámetros de calidad del aire interior en distintas muestras de viviendas se ha realizado mediante la utilización del sensor PPM monitor unit de PPM technologies. Estos testigos tomados sirven como muestra indicativa de la calidad del aire interior a modo de testeo aleatorio. La calibración del aparato consta del año 2013 en que fue adquirido por la universidad politécnica de Madrid. Para realizar este análisis se ha realizado el siguiente proceso:

1. Identificación de viviendas válidas para el testeo, con características similares a las que encontramos tras la fase 1 de caracterización.
2. Medición puntual de condiciones de calidad de aire interior (CO, CO₂, TVOCs y HCHO).

Las viviendas que se han seleccionado tienen unas características comunes:

- Son viviendas en bloque.
- Están construidas en su mayoría en el periodo previo a la implantación del Código Técnico.
- Tienen características similares en cuanto a los aspectos constructivos, a los representativos del tipo medio en España.
- Están situadas en la comunidad de Madrid.
- Tienen una superficie que está en la media de las viviendas en España.
- Las mediciones se han llevado a cabo desde primavera hasta verano, al tener los contaminantes a caracterizar tendencia a sufrir variaciones con altas o bajas temperaturas, al interactuar más con el ambiente.

¹⁴⁶ AEN/CTN 100 Climatización, 2009. UNE-EN-15665. Ventilación de edificios. Determinación de los criterios de rendimiento para los sistemas de ventilación residencial. norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 15665:2009.

Se han testeado 4 parámetros referidos a distintos contaminantes: CO, CO₂, TVOCs y HCHO.

A continuación se muestran los resultados medios de concentración para todos ellos.

	11/06/15	26/06/15	17/06/15	06/06/15	02/05/15	22/04/15	18/04/15	29/05/15	15/04/15	27/07/15
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	NTE 75 rehabilitado ocupado	pre NTE ocupado	pre NTE vacío	NTE 75 1978. ocupado	NTE 75 2003 ocupado	NTE 75 2003 ocupado	NTE 75 2003 ocupado	NTE 75 2003 ocupado	NTE 75 2003 vacío	CTE 2011 ocupado
TVOC MEDIA ACOTADA	0,23	0,41	0,20	0,43	0,25	0,21	0,26	0,18	0,22	0,19
CO MEDIA ACOTADA	0,83	1,04	0,41	1,42	0,79	0,69	0,64	0,58	0,40	0,78
HCHO MEDIA ACOTADA	0,107	0,061	0,039	0,104	0,124	0,019	0,106	0,035	0,020	0,107
CO₂ MEDIA ACOTADA	1111	1340	476	1214	1118	1026	675	1120	415	1111

Tabla 6.32. Concentraciones medias de contaminantes en viviendas muestreadas

Las celdas en verde son las medias que no superan la concentración límite normativa según las autoridades sanitarias. Las naranjas son las que superan este límite. Nos encontramos con que indistintamente de la época en que se construyera la vivienda, los niveles superan en muchas ocasiones los establecidos, salvo para el monóxido de Carbono, cuyos niveles son bajos, aspecto que entra dentro de la normalidad, teniendo en cuenta que la medición no se efectuaba en la cocina, sino en el salón de las viviendas y no había fumadores durante la medición.

Asimismo, se han analizado los resultados de las mediciones con herramientas software de aplicación estadística. Del análisis destacamos las graficas de medias de cajas y bigotes obtenidos con el software Statgraphics, con licencia concedida a la Universidad Politécnica de Madrid para uso docente y de investigación. La gráfica consta de los siguientes elementos¹⁴⁷: El cuadro en gris de cada medida va del cuartil inferior al superior. La línea vertical y muesca se dibuja en la mediana. La media se dibuja con un punto en color granate. Se dibujan los “bigotes” desde el valor menor al valor mayor. Los puntos que se encuentran a una distancia muestral mayor a 1,5 veces el rango intercuartil (ancho del cuadro gris) se dibujan mediante puntos independientes. A continuación se destacan los resultados gráficos de las medidas tomadas.

Fig. 6.75. Gráfico de caja y bigotes de TVOC.(ppm)

¹⁴⁷ Statpoint, Inc. 2005. Manual de uso de STATGRAPHICS

En cuanto a los TVOC (compuestos orgánicos volátiles), se superan los niveles establecidos durante la mayoría de las medidas en los testigos tomados. La mayor parte de estos compuestos no son dañinos, pero si son un indicador de la calidad del aire reconocido por organismos internacionales como la OMS y la Unión Europea. Es importante tener en cuenta los niveles reales en las viviendas de estos compuestos, dado que la limitación de emisividad sobre los materiales de acabado interior no está contemplada en la normativa existente en España todavía. En caso de que de la siguiente modificación de la norma CTE DB HS3 contemple otros contaminantes como parte de las necesidades explícitas de ventilación, ha de contemplarse, para la vivienda ya construida, soluciones adaptadas para resolver el problema de la ventilación por debajo de las necesidades en estos espacios.

Fig. 6.76. Gráfico de caja y bigotes de HCHO (ppm)

El formaldehído proviene de múltiples fuentes, como los acabados interiores, el mobiliario de madera que incluya resinas de aldehídos y los propios ocupantes. En el caso de las medidas tomadas en las viviendas, el muestreo revela niveles por encima de los marcados como límite en las normativas de referencia a nivel europeo y mundial (EU y OMS). La repercusión en la salud de los ocupantes del exceso de formaldehído ha sido bien estudiada y conviene tomar medidas normativas para reducir el riesgo para la salud en el ambiente doméstico.

Fig. 6.77. Gráfico de caja y bigotes de CO₂ (ppm)

En la gráfica de CO₂ se ha marcado el límite que se baraja en el ámbito de modificación del CTE DB HS3 en cuanto a límite medio anual previsto en vivienda (900 ppm). Este límite medio es superado en mediciones que no incluyen los periodos de no ocupación y si los tenemos en cuenta en el cómputo resulta muy difícil superar este límite. Vemos que en los periodos de medición, y sin una ocupación elevada, en el salón de las viviendas que sirven como testigo, se superan ampliamente estos niveles.

Fig. 6.78. Gráfico de caja y bigotes de CO (ppm)

Por último, en el caso del monóxido de Carbono (CO), resaltar que gracias a la práctica eliminación de los medios de combustión utilizados anteriormente y reducción del hábito de fumar, las concentraciones no superan los límites establecidos para este compuesto, cuya peligrosidad es mayor a la de los anteriores, pudiendo provocar la muerte por asfixia en concentraciones elevadas.

Del análisis realizado se puede observar en general que los niveles límite considerados en las normativas de otros países y recomendaciones de organizaciones de referencia son superados en un número apreciable de las muestras tomadas, por lo que una regulación al respecto de la emisividad de los materiales de acabado interior o de objetos que vayan a estar en el interior de las viviendas es recomendable de cara al mantenimiento de un ambiente interior salubre

7 OPTIMIZACIÓN DE LA VENTILACIÓN EN EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EXISTENTE

En este capítulo se aborda el tema de la optimización de la ventilación en términos de calidad del aire interior y eficiencia energética. Una vez determinadas las características medias del parque edificatorio residencial se ha procedido a analizar los aspectos relativos a la calidad del aire y la demanda energética del mismo. El análisis se ha desarrollado estableciendo escenarios basados en las distintas normativas que han sido de aplicación en los sistemas de ventilación de la edificación residencial, aplicados en un modelo de edificio de referencia. En este capítulo se establece la estrategia de optimización, se aplica al modelo de análisis utilizado en el capítulo previo y se analizan los resultados en términos de; mejora de la calidad del aire interior, reducción de la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico y ventilación y valoración económica comparativa usando la metodología del coste óptimo.

7.1 ESTRATEGIA GENERAL DE OPTIMIZACIÓN

Como conclusiones del capítulo de análisis, en el apartado de análisis comparativo integral de calidad de aire y demanda energética, se establecían los escenarios destacados respecto a la calidad del aire interior y respecto a la demanda energética. Estos correspondían al escenario normativo UNE EN 15251. La categoría de calidad I respecto a la calidad ambiental, obtiene unos resultados óptimos en cuanto a dilución de contaminantes. No así en el aspecto energético, siendo escenario que mayor demanda presenta, a causa del elevado caudal de renovación de aire. Por otro lado, la categoría de calidad III presenta unos resultados muy inferiores en cuanto a calidad del aire, pero la demanda energética que supone esta opción es la más reducida de todas las analizadas.

Sería por tanto deseable, para la consecución de ambos objetivos de mejora de la calidad de aire interior y reducción de la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico y ventilación, si planteáramos un escenario de optimización, que aunara la calidad de aire interior correspondiente a la categoría de calidad I y la demanda energética asociada a la categoría de calidad III.

La solución de optimización que se plantea ha de ser fácilmente integrable en la edificación de referencia caracterizada para los distintos escenarios normativos, y viables a nivel económico para suponer una alternativa a tener en cuenta en cuanto a la rehabilitación energética de la edificación residencial a llevar a cabo en los próximos años.

Para conseguir este objetivo doble planteo en esta tesis dos actuaciones a realizar:

1. La primera corresponde a la **instalación de un sistema de extracción mecánica con recuperación de calor en el baño de la vivienda**. Este sistema se convertirá al tiempo en extractor y distribuidor de aire al interior de la vivienda. Este recuperador entálpico será seleccionado de entre los comercialmente disponibles condicionado por los aspectos constructivos característicos de la vivienda media en España.

Esta medida pretende reducir la demanda energética asociada a la renovación de aire con caudal elevado, correspondiente a la categoría de calidad I.

2. La segunda medida supone **la racionalización del caudal de renovación**. Se pretende optimizar la utilización de los medios mecánicos de extracción, manteniendo apagado el sistema descrito en el punto previo, obteniendo en esos periodos la renovación de aire necesaria mediante medios naturales e infiltración, con un caudal suficiente recomendado en la norma de 0,2 renovaciones por hora.

Para que esta medida sea viable, también se hace necesario establecer previamente una mejora de la estanquidad de la envolvente. No se pretende el cambio de las ventanas por otras más permeables (medida que resulta difícilmente amortizable en el momento actual, sino de una mejora de la envolvente y carpinterías existentes, mediante un proceso que se describe en este capítulo.

El horario optimizado según ocupación es viable mediante la instalación de sensores inalámbricos de CO₂ en las estancias vivideras de la vivienda, para poner en marcha el sistema cuando se haga patente por la curva de concentración, que la vivienda está ocupada. Para el análisis se ha considerado el mismo horario de ocupación considerado para el análisis previo.

Fig.7.1. Descripción gráfica conceptual del punto del proceso correspondiente a la optimización

7.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

7.2.1 MEJORA DE LA ESTANQUEIDAD DE LA ENVOLVENTE

La mejora de la estanqueidad de la envolvente se va a centrar en dos aspectos:

1. El repaso de las juntas constructivas y en su caso las de instalaciones. Estas son:
 - a. Juntas de la ventana con el soporte
 - b. Juntas de los sistemas de ventilación preexistentes, en baños y cocinas.
 - c. Cajas de registro en fachada
 - d. Capialzados de persiana
2. Actuación sobre la ventana. Existen opciones para mejorar y reparar las ventanas existentes. Sus capacidades térmicas, estéticas y de tipo lumínico no varían, pero su permeabilidad a la entrada de aire por la presión de viento se ve mejorada.

En cuanto al punto 1, las actuaciones consisten en sellado de los puntos de fuga. Para detectarlos se puede utilizar una cámara termográfica, como la utilizada para caracterizar el edificio demostrador en el capítulo 4. Asimismo se puede utilizar un barómetro o un anemómetro portátil para detectar cambios en la velocidad del aire que indiquen corrientes.

Actuaciones sobre la ventana

La ventana es, por sus particularidades, uno de los elementos de mayor importancia en el comportamiento energético del edificio y en cuanto a la estanqueidad de la edificación por lo que debe ser considerada con especial cuidado. Por otro lado, al ser un elemento bastante industrializado e independiente del soporte, es una de las intervenciones independientes que se puede afrontar con mayores garantías.

En el Proyecto SIREIN+ se han estudiado maneras de mejorar el rendimiento de la ventana, contando con la opción de la sustitución, pero también la de mejora y la de reparación y la instalación de doble ventana desde el punto de vista de la rentabilidad. Para ello se han evaluado las diferentes opciones en el campo de la envolvente acristalada, desde un punto de vista teórico, aunque en la práctica se suele optar únicamente por la reparación con masillas y siliconas o la sustitución completa del elemento.

El estado de la ventana determinará el margen de mejora de eficiencia energética y qué actuaciones son compatibles: reparación de la ventana existente, complemento de la misma con productos específicos o sustitución por otra ventana de altas prestaciones. Por otro lado, la intervención puede graduarse según presupuesto disponible, de manera que se abre la posibilidad de intervenir a todos los interesados.

Fig.7.2. Opciones de procesos de actuación sobre las ventanas y carpinterías de la envolvente. Proyecto SIREIN+

Los distintos grados de **deterioro y prestaciones** de una ventana indicarán cuál de las siguientes acciones es la más indicada. En el caso que nos ocupa, presuponemos que la opción es la de reparación, en cuanto a que las otras actuaciones están orientadas a mejorar aspectos que no tienen que ver con la permeabilidad de la envolvente, sino sobre aspectos térmicos o lumínicos, o la sustitución, que mejora la estanqueidad al aire, pero también afecta a las capacidades térmicas de la misma.

7.2.2 OPCIONES DE REPARACIÓN Y MEJORA DE LA ESTANQUEIDAD DE LA VENTANA

La ventana, especialmente las de mayor antigüedad, precisan de **mantenimiento** para conservar el buen estado; si el elemento tiene muchos años o ha estado descuidado, seguramente haya perdido varias de sus cualidades por envejecimiento. Existen una serie de soluciones dirigidas a **recuperar en la medida de lo posible las características iniciales de la ventana**. Entre ellas encontramos:

7.2.2.1 SELLADO DE JUNTAS Y PERÍMETRO DE HUECOS

Es frecuente en el uso y envejecimiento de los **elementos fijos** de envolvente acristalada el desajuste entre algunas de las múltiples piezas que los conforman de manera que se forman **diminutas grietas por las que se filtra el aire**, tanto en la ventana, como en el **cajón de la persiana**. Por otro lado, la **unión del muro con el marco** de la ventana es otro punto crítico por las diferencias de dilatación de ambos elementos y la frecuente mala calidad de los elementos de sellado y aislamiento utilizados en el pasado.

Para resolver estos problemas contamos con materiales flexibles que **sellan fisuras y grietas de hasta medio centímetro** de ancho. Estos materiales se distribuyen mayoritariamente en **cartuchos** adaptables para pistola, aunque también en forma de **aerosol, tubo o cuerda**. A continuación, se resumen los materiales que se comercializan para ofrecer esta solución y sus características:

Material	Uso recomendado	Reducción de volumen	Adhesión	Vida útil	Observaciones
Silicona	Sellado de elementos constructivos de madera, metal, piedra o cerámica.	Mínima o nula	Muy buena	10+ años	<ul style="list-style-type: none"> - Al ser flexible permite dilatación y contracción de elementos. - Aunque puede sellar superficies pintadas, no suele absorber al pintar encima.
Poliuretano en espuma expansiva	Grietas en interior o exterior.	Expansión al secar	Muy buena		<ul style="list-style-type: none"> - Debe ser pintado en exteriores para proteger de radiación ultravioleta. - Emisión de CO₂ en fabricación. - Es flexible.
Sellado en espuma de base acuosa	Perímetro de huecos en sustitución de carpinterías y grietas pequeñas.	Nula. Expansión de 0 - 25%	Muy buena		<ul style="list-style-type: none"> - Tiempo de curado: 24 horas. - Debe estar expuesto al aire para garantizar la sequedad. - En grandes grietas el curado se dificulta. - No se expande ni emite gases en fabricación.
Caucho butílico	Se adhiere a un amplio rango de materiales (piedra, metal, madera, vidrio, plástico). Perímetro de ventanas y también tejas sueltas.	5 - 30%	Buena	10+ años	<ul style="list-style-type: none"> - Durabilidad mínima de 10 años sin resquebrajar. - Se puede pintar tras 1 semana de curado. Puede necesitar dos manos dada la reducción de volumen durante el curado. - No se adhiere a superficies pintadas. Tóxico: estudiar la lista de precauciones.
Látex	Sellado de zonas con agua en materiales como cerámica, yeso, vidrio y plástico. No a metal.	5 - 10%	Muy buena	2 a 10 años	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil uso. Impermeable cuando seca. Admite lijado y pintado. - Menos flexible que los anteriores. - Durabilidad varía de 2 a 10 años. - No se adhiere al metal. - Necesita recubrimiento en exteriores.
Material	Uso recomendado	Reducción de volumen	Adhesión	Vida útil	Observaciones
Sellado de base petróleo o resina	Juntas exteriores de materiales constructivos.	10 - 20%	Buena	1 a 4 años	<ul style="list-style-type: none"> - Disponible en tubo y cordón. - Baja durabilidad, de 1 a 4 años. - Baja adhesión a materiales porosos. - No resiste U.V.A. - toxicidad (consultar etiqueta).

- Rango de temperaturas limitado.

Tabla 7.1. Materiales y soluciones de sellado y características. Proyecto SIREIN+

7.2.2.2 AISLAMIENTO DE ELEMENTOS MÓVILES

Las infiltraciones a través del hueco de fachada tienen algunas soluciones de carácter temporal pero bastante eficaz. Se trata de rellenar los espacios, fundamentalmente entre hojas y marco, de manera que cuando se encuentran en posición cerrada no haya intercambio de aire con el exterior.

Esto se puede conseguir a través de diferentes productos de mercado, entre los que se debe seleccionar el más adecuado para las condiciones climáticas, cambios de temperatura y desgaste del lugar donde se encuentra. Se busca sellar bien la junta mientras la ventana o puerta esté cerrada, pero permitiendo siempre la apertura con facilidad. Es importante considerar la durabilidad a la hora de comparar productos. A continuación se resumen los distintos tipos de productos que mejoran la estanqueidad en el perímetro de las hojas:

	Material	Uso	Puesta en obra	Ventajas	Desventajas
BURLETES	Goma tubular	Alrededor de las hojas de puertas y ventanas	Tienen bridas a lo largo del tubo para fijar con clavos o grapas	Barrera al aire bastante efectiva.	- Las versiones autoadhesivas no son fáciles de instalar.
	Cintas de espuma abierta o cerrada o caucho EDPM	Marco de puertas y ventanas, acristalamientos fijos y grietas o esquinas.		Fácil instalación, puede reforzarse con grapas.	- Durabilidad no muy alta, aunque depende del material. - Sólo para zonas con poco desgaste. Es visible.
	Fieltro o fieltro reforzado En rollo	Ventanas y puertas	Grapado (en dirección de la cinta), pegado o clavado	Fácil instalación, coste reducido.	- Baja durabilidad, y baja estanqueidad al aire. - No usar expuesto a la humedad, la fricción o abrasión. - Muy visible. El fieltro de 100% lana da mejor resultado, aunque es más caro.
	Espuma de celda cerrada sobre tiras de madera o metal	Ventanas y puertas	Serrado, clavado y pintado.	Rígido y efectivo, con buen comportamiento en las pruebas de viento del USDE.	- Difícil instalación. - Muy visible. Se producen gases de efecto invernadero en la fabricación.
	Material	Uso	Puesta en obra	Ventajas	Desventajas
	Tira de vinilo sobre madera o metal Rígida o plegable	Ventanas y puertas		Fácil instalación, coste reducido. Las tiras que vienen perforadas permiten un mejor anclaje y mayor durabilidad. Hay variedad de colores para mejorar la visibilidad.	- Visible.
	Silicona reforzada Junta tubular sobre tira	En las jambas de puertas y ventanas		Buen sellado.	- La instalación puede complicarse, especialmente en las esquinas.

	metálica			- Es necesario el uso de sierra de metal.
MECÁNICOS	Sellado mecánico con tira en forma de V De PVC, aluminio, acero o cobre	En el carril de ventana corredera.	Buena durabilidad, poco visible y muy efectivo. El vinilo es fácil de instalar.	- Superficies deben ser lisas. El bronce debe ir calado cada 8 centímetros. - Puede aumentar la resistencia al giro de la hoja.
	Magnético	Parte superior y lateral de las puertas, ventanas correderas	Proporciona alto nivel de estanqueidad al aire.	-
	Unión de raíles metálicos	Perímetro de puertas y marco de ventanas correderas	Aislamiento excepcional.	- Precisa instalador.
OTROS	Aleta y/o cepillo	Ventanas correderas	Alta durabilidad.	- Instalación no sencilla.
	Zapata de puerta	Bajo la puerta	Evita la entrada de agua. Alta durabilidad. En algunos se pueden reemplazar las gomas.	- Caro y de difícil instalación. - No puede instalarse en todos los casos.
	Placa de aluminio o acero en umbral Filtro, plástico, PVC o esponja debajo. También disponible con RPT	Bajo puertas oscilantes	Relativamente fácil de instalar, algunos pueden adaptarse a umbrales irregulares. Existen placas autoretráctiles, con más durabilidad.	- Visible. - Pueden estropear el solado.

Tabla 7.2. Métodos de mejora de la estanqueidad de las ventanas y huecos. Ventajas y desventajas de su utilización.
Proyecto SIREIN+

En este caso, dar un coste asociado a cada nivel de mejora es innecesario y ajeno al trabajo de esta tesis, por lo que se ha limitado la investigación a dar unos valores estimados de productos en el mercado por metro lineal de aplicación y por cada ventana de unas dimensiones de 1500 x 1200 mm.

		Precio medio (€/m)	Precio ventana (€)	Espesor (mm)	Duración máx
Burletes	Silicona	-	8 + pistola	-	-
	Caucho	1,2	6	3 a 5	5 años
	Flecos	0,5	3	4	-
	Espuma	0,6	3	1 a 4	5 años
Perímetro	Espuma poliuretano	-	8 + pistola	-	-

Tabla 7.3. Precios de productos para la mejora de la estanqueidad. Proyecto SIREIN+

Se trata de intervenciones económicas que pueden tener cierto impacto en el confort interior si el problema de infiltración es grande. Sin embargo, no se puede ignorar el hecho de que el valor de transmitancia de la ventana no varía, por lo que la reducción de demanda se puede atribuir únicamente a la reducción de pérdidas por infiltración y exfiltración de aire.

Siendo realistas, es muy improbable alcanzar esos niveles de estanqueidad al aire con una ventana antigua o con una corredera. Estos sistemas funcionan muy bien en las líneas rectas de los perfiles, pero en las esquinas y encuentros no se llega a colmatar el hueco, o no al menos de manera durable. Además, las carpinterías con ciertos años presentan diminutas separaciones entre los elementos muy difíciles de sellar dada la sección de la boquilla de la pistola.

En cualquier caso, la solución de optimización aspira a reducir la infiltración pero no de una manera total. Se cuenta con un porcentaje de infiltración reducido en comparación con la ausencia de la misma, que produzca 0,2 renovaciones por hora (h^{-1}) en los periodos de no ocupación. Durante los periodos de ocupación la extracción mecánica del sistema estabilizará la entrada de aire generando un sistema equilibrado de presiones aportando presión interior por impulsión que contrarreste la entrada no deseada de aire del exterior.

7.2.3 SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR

Se puede definir un recuperador de calor como aquel dispositivo que permite reutilizar el calor residual de un sistema con el objetivo final de alcanzar la máxima eficiencia en el funcionamiento global de la instalación (ATECYR, 2010).

Los recuperadores de energía en los sistemas de ventilación permiten reducir el aporte energético para acondicionar el aire de impulsión, aprovechando la temperatura o entalpía del aire de extracción del sistema. Al tratarse, en general, de un sistema mecánico, produce una demanda extra de energía (eléctrica normalmente) que ha de ser compensada con la energía recuperada del aire de extracción. Al mismo tiempo, posibilita aumentar los caudales de renovación de aire, pudiendo incidir de manera notable en la calidad del aire interior y la dilución de contaminantes interiores.

Básicamente, en términos de energía, las ecuaciones que describen el funcionamiento de la recuperación de calor son las siguientes.

- Para recuperación de calor sensible

$$Q = e \cdot m \cdot cp \cdot (T_{e1} - T_{i1}) = e \cdot V \cdot (\rho \cdot cp) \cdot (T_{e1} - T_{i1})$$

Siendo

Q el calor recuperado

e la eficiencia del recuperador de calor

m el caudal másico del flujo de aire

cp el calor específico del aire

V el volumen

ρ la densidad del aire (1,22 kg/m³ en condiciones normales de temperatura y presión)

T_{e1} la temperatura del aire exterior

T_{i1} la temperatura del aire interior

- Para recuperación de calor latente

$$Q = e \cdot m \cdot (h_{h1} - h_{c1}) = e \cdot V \cdot (\rho \cdot cp) \cdot (h_{h1} - h_{c1})$$

Siendo

Q el calor recuperado

e la eficiencia del recuperador de calor

m el caudal másico del flujo de aire

cp el calor específico del aire

V el volumen

ρ la densidad del aire (1,22 kg/m³ en condiciones normales de temperatura y presión)

h_{h1} la entalpía de la corriente del aire a una temperatura mayor

h_{c1} la entalpía de la corriente del aire a una temperatura menor

La energía total recuperada será:

$$Q = e \cdot m \cdot \Delta T \cdot t = e \cdot V \cdot (\rho \cdot cp) \cdot \Delta T \cdot t$$

La energía recuperada total depende del tiempo de funcionamiento, de la eficacia del recuperador y de la diferencia de temperatura. Como hemos mencionado, el sistema, si ha de operar conjuntamente con un sistema de impulsión mecánica tendrá que tener en cuenta también la demanda de energía eléctrica que supone el tiempo de uso del ventilador mecánico. La potencia del ventilador se calcula mediante la fórmula:

$$N = \frac{L \cdot p}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \eta_p \cdot \eta_v}, (kW)$$

Donde

L es el flujo de aire (m³/h)

P es la pérdida de presión aerodinámica del sistema

η_p es la eficiencia de transmisión

η_v es la eficiencia del ventilador

Y el consumo asociado al sistema mecánico de extracción será:

$$W = N \cdot t_{vent} \cdot n_{vent}, (kWh)$$

Donde

t_{vent} es el número de días de trabajo del ventilador

n_{vent} es el número de horas diarias de trabajo del ventilador

Las soluciones de recuperación de calor habrán de contar con este consumo extra, convertido a energía primaria, ya que en el balance global de consumo de energía no se pueden comparar distintas fuentes de energía sin aplicar el factor de conversión de cada una de ellas. En este sentido, la energía eléctrica, si no viene de fuentes renovables tiene un factor de conversión de 3,08 aproximadamente, según la compañía suministradora o el documento de referencia que se esté utilizando. En nuestro caso, aplicaremos el factor de conversión que utiliza el programa designBuilder v4.5.

La siguiente tabla expone, con diferentes caudales, el consumo energético eléctrico asociado al ventilador a instalar en la vivienda del edificio de referencia.

	Ocup. (p)	tiempo de funcion amiento	ach (h ⁻¹)	N (kW)	N/m ² (kW/m ²)	L (m ³ /h)	p	consumo o anual (kWh·a)	consumo/m ² (kWh·a·m ²)	energía primaria (kWh·a·m ²)
UNE EN 15251- CALIDAD II	4	24 h	0,78	0,04	0,61	129,48	150,00	336,47	5,29	15,98
	5	24 h	0,78	0,04	0,61	129,48	150,00	336,47	5,29	15,98
	6	24 h	0,78	0,04	0,61	129,48	150,00	336,47	5,29	15,98
	4	12 h	0,78	0,02	0,30	129,48	150,00	84,12	1,32	3,99
	5	12 h	0,78	0,02	0,30	129,48	150,00	84,12	1,32	3,99
	6	12 h	0,78	0,02	0,30	129,48	150,00	84,12	1,32	3,99
UNE EN 15251- CALIDAD III	4	24 h	0,48	0,02	0,38	79,68	150,00	207,06	3,26	9,83
	5	24 h	0,48	0,02	0,38	79,68	150,00	207,06	3,26	9,83
	6	24 h	0,48	0,02	0,38	79,68	150,00	207,06	3,26	9,83
	4	12 h	0,48	0,01	0,19	79,68	150,00	51,76	0,81	2,46
	5	12 h	0,48	0,01	0,19	79,68	150,00	51,76	0,81	2,46
	6	12 h	0,48	0,01	0,19	79,68	150,00	51,76	0,81	2,46
CTEDBHS3	4	24 h	0,69	0,03	0,54	114,54	150,00	297,65	4,68	14,13
	5	24 h	0,87	0,04	0,68	144,42	150,00	375,30	5,90	17,82
	6	24 h	0,90	0,04	0,70	149,40	150,00	388,24	6,10	18,44
	4	12 h	0,69	0,02	0,27	114,54	150,00	74,41	1,17	3,53
	5	12 h	0,87	0,02	0,34	144,42	150,00	93,82	1,48	4,46
	6	12 h	0,90	0,02	0,35	149,40	150,00	97,06	1,53	4,61
UNE EN 15251- CALIDAD I	4	24 h	1,11	0,05	0,87	184,26	150,00	478,83	7,53	22,74
	5	24 h	1,11	0,05	0,87	184,26	150,00	478,83	7,53	22,74
	6	24 h	1,11	0,05	0,87	184,26	150,00	478,83	7,53	22,74
	4	12 h	1,11	0,03	0,43	184,26	150,00	119,71	1,88	5,68
	5	12 h	1,11	0,03	0,43	184,26	150,00	119,71	1,88	5,68
	6	12 h	1,11	0,03	0,43	184,26	150,00	119,71	1,88	5,68

Tabla 7.5. Demanda de energía primaria de ventilador según su régimen de uso (por escenario, tiempo de uso y ocupantes).

En la tabla superior se observa la repercusión por m² de la inclusión del ventilador con recuperación de calor en la instalación de la vivienda del edificio demostrador. El consumo se ha referido conforme a los caudales de renovación de aire establecidos en las normativas que incluyen la ventilación mecánica en el análisis realizado como parámetro de dimensionamiento del sistema.

Fig. 7.3. Resumen de energía primaria demandada por el uso del recuperador de calor, según caudal de aire por escenario, régimen de uso y ocupantes.

7.2.4 TIPOS DE RECUPERADORES DE CALOR

Los recuperadores de calor pueden ser de los siguientes tipos

Fig.7.4.Esquemas de recuperadores de calor. Fuente: el autor

En el campo de la rehabilitación energética, cada vez con mayor claridad se está introduciendo el concepto y el diseño de sistemas de recuperación de calor en la ventilación. En la Unión Europea destaca el informe realizado para DG Enterprise realizado en 2012 (Holsteijn and Kema, 2012)¹⁴⁸ establece los condicionantes y las particularidades de los sistemas existentes de cara a la incorporación de medidas de rehabilitación energética a nivel macroeconómico. En cuanto a la recuperación de calor, el informe propone dos opciones para los edificios de viviendas.

¹⁴⁸ Holsteijn, V., 2012. Final Report Task 3 User Requirements , Infrastructure Ventilation Systems. , pp.1–88.

Fig.7.5.Esquemas de recuperadores de calor en edificios. Fuente: Van Holsteijn y Kema

En la descripción del informe se exponen las ventajas y desventajas de cada uno de los sistemas:

SISTEMA COLECTIVO	. Ventajas
	1. Recuperación de calor. Solución de ventilación más eficaz hoy en día.
	2. Utilización más orientada a edificios no residenciales.
	3. Adecuación al ocupante y sus horarios con sistemas de caudal variable (VAV) en cada estancia.
	4. Adecuado para todo tipo de edificios
	Desventajas
	1. Sistema más caro y de mantenimiento más complejo
SISTEMA INDIVIDUAL	. Ventajas
	1. Recuperación de calor
	2. Mayor aplicabilidad a rehabilitación energética
	3. Adecuación al ocupante y sus horarios
	4. Adecuación al número de ocupantes sin se incorpora una unidad de volumen variable .
	5. Fácil mantenimiento y limpieza
	Desventajas
	1. En edificios más altos de 8 alturas el viento puede suponer un problema

Tabla 7.6. Características de los distintos esquemas de recuperación de calor, individual y colectivo. Fuente: Van Holsteijn y Kema

De los sistemas que se describen para la ventilación en edificación residencial, el que incorpora recuperación de calor es el más viable para conseguir los objetivos de las directivas de eficiencia energética de la edificación. Según la aproximación teórica inicial del informe, la energía primaria de la ventilación en edificación residencial se ajusta a este perfil:

Fig.7.6. Energía primaria asociada a sistemas de ventilación en edificios residenciales. De izquierda a derecha, ventilación natural (PRE NTE y NTE), ventilación con extracción mecánica (CTE) y sistema equilibrado con recuperación de calor (UNE EN 15251). Fuente: Van Holsteijn y Kema

El mayor consumo de energía primaria corresponde a las soluciones con ventilación natural, al necesitar de un componente elevado de infiltración y poco control sobre el caudal de ventilación, lo que la convierte en un sistema poco eficiente. Como segunda solución, la inclusión de un sistema

mecánico de extracción de aire regula la infiltración pero continúa representando un consumo elevado por ventilación. La inclusión de un sistema equilibrado como recuperación de calor, reduce el consumo de energía primaria de calefacción a un porcentaje muy pequeño, pero aumenta la energía primaria por la utilización de electricidad para el funcionamiento del sistema de recuperación de calor.

7.2.5 ESTUDIO DE LOS RECUPERADORES DE CALOR EXISTENTES PARA LOS PROPÓSITOS DE LA OPTIMIZACIÓN.

Se ha efectuado un estudio de los equipos disponibles en el mercado, para seleccionar los recuperadores que son viables dentro de nuestro edificio demostrador, tanto por dimensiones como por caudal necesario y eficacia de recuperación de calor. La base de datos, de 99 equipos, se incorpora a los anexos. En general la aproximación se ha realizado hacia recuperadores de doble flujo o recuperadores rotativos, dado el tipo de características edificatorias y del sistema existente de ventilación.

La aproximación a la búsqueda del equipo que sea adecuado para su instalación en una vivienda de las características medias en que se ha basado el análisis previo hace que primen las características siguientes:

- Dimensiones: han de ser tales que el equipo y sus accesorios puedan incluirse en el falso techo del baño o de la cocina. Por tanto, la altura , anchura y longitud del equipo han de encajar en estos límites dimensionales.
- Capacidad de caudal: el caudal de impulsión y/o extracción ha de ser suficiente para alcanzar el volumen de renovación por hora concluido en el apartado de análisis como adecuado para alcanzar una calidad del aire interior deseada.
- Eficacia de recuperación: cuanto mayor sea, mayor reducción en la demanda de energía de la ventilación.

A continuación se muestra un extracto de la base de datos generada para el estudio.

air-in dintel	aire - aire	1200 x 80 x 12 a 2000 x 185 x 12	5 - 10 l/s	Ventanas con o sin carpintería	Ventilación mecánica e híbrida. Aislamiento acústico.	
air-in lateral	aire - aire	1250 x 100 x 40 a 2400 x 180 x 40	5 - 10 l/s	Ventanas con carpintería de aluminio	Ventilación mecánica e híbrida. Fácil instalación.	
MVHR-LP Units OPUSXBOX	aire - aire	850 x 685 x 185	19 - 56 l/s	Interiores, lejos de fuentes directas de calor, agua y humedad	2 ventiladores con control de volumen de flujo y velocidad.	
SQURBO XBOX HORIZONTAL	aire - aire	1700 x 1150 x 350 a 4600 x 2600 x 1300	hasta 430 l/s		Gran variedad de tamaños. Sensor para controlar velocidad.	
SQURBO XBOX STACKED	aire - aire	2500 x 550 x 820 a 4600 x 1300 x 2600	hasta 430 l/s		Gran variedad de tamaños. Sensor para controlar velocidad.	
FV-250ZDV2, FV-350ZDV2, FV-500ZDV2, FV-800ZDV2, FV-01KZDV2A	aire - aire	270 x 599 x 882 a 388 x 884 x 1250	47,22 - 277,78 l/s	Falso techo. En lugares donde la temperatura no pueda sufrir grandes fluctuaciones.	Diseño counter-flow. Fácil instalación. Silenciosas. Invertible.	
FV-04VE1	aire - aire	696 x 425 x 239	5 - 19 l/s		Prevención de congelación. 2 ventiladores con motor. Transfiere humedad y recupera energía de la humedad.	
WR-100	aire - aire	540 x 540 x 160	8 - 19 l/s	Suelo, pared, techo	Gradua la humedad previniendo la formación de mohos. Tres velocidades por interruptor.	
AIRFRESH	aire - aire	715 x 712 x 462	hasta 78 l/s	Pared	Ventilación equilibrada. Con regulador by-pass. Varios modelos. Diferentes potencias por interruptor.	
WRL	aire - aire	150 x 300 x 98 a 955 x 540 x 138	6 - 17 l/s	Suelo o falso techo	Varios modelos. Gradua la humedad previniendo la formación de mohos. Funciona por cables de presiones.	
RONDO	aire - aire	500 x 250 x 422/522	8 - 14 l/s	Horizontal (techo) o vertical (pared)	Configuración horizontal y vertical. Muy bajos costes. Funciona solo cuando se necesita.	
Xva16, Xva35, Xva50, Xva80, Xva90	aire - aire	410 x 204 x 110 a 1250 x 311 x 106	28 - 292 l/s		Nuevo paquete de intercambio con mejor relación entre superficie y factor de intercambio. Junta de estanqueidad integral.	
AKOR	aire - aire	780 x 670 x 340			Sistema de flujos cruzados. Fácilmente desmontable. Juntas de estanqueidad.	
RCV	aire - aire	600 x 300 x 600 a 1250 x 600 x 1250	111 - 833 l/s		Ventiladores centrífugos de alto rendimiento. Intercambiador de calor de flujo cruzado. Configuración horizontal y vertical.	
RCP	aire - aire	1200 x 1800 x 820 y 1500 x 2000 x 1020	694 - 2222 l/s		Intercambiador de calor estático de alta eficacia. Entrada y salida regulables. Versión disponible con by-pass.	
RCH	aire - aire	2200 x 1220 x 500 a 2500 x 1450 x 600	417 - 972 l/s			
Volcane	aire - aire	600 x 310 x 600 a 5500 x 2000 x 1360	hasta 2222 l/s	Falso techo	Con batería incorporada. 3 gamas, 11 tamaños. Configuración horizontal y vertical. Versión disponible con by-pass.	
HRU	aire - aire	2000 x 1220 x 500 a 2500 x 1450 x 690	417 - 972 l/s		Compresor en espiral. Circuito frigorífico con bomba de calor. Controlador con microprocesador programado.	
TECNAVENT	aire - aire	700 x 700 x 275 a 1350 x 1350 x 550	139 - 1111 l/s		2 ventiladores centrífugos con motor de rotor exterior, muy silenciosos. Recuperación parcial del calor latente. Salidas de impulsión en diferentes lados.	
Serie LGH-X4	aire - aire	610 x 780 x 275 a 1231 x 1164 x 800	42 - 458 l/s	Falso techo. Evitar lugares donde pueda mojarse.	Placa de interconexión, para integración con las unidades de aire acondicionado. By-pass. A -8°C, ventilación con intercambio.	
SH704	aire - aire	549 x 439 x 268	20 - 50 l/s		Mecanismo automático de descongelación. 2 motores EMR. Una sola velocidad.	

Fig.7.7. Base de datos de recuperadores de calor. Fuente: el autor

7.2.6 SELECCIÓN DE RECUPERADORES DE CALOR

De la base de datos se ha realizado una selección de los equipos por eficacia y ajuste al resto de requerimientos (dimensionales, de consumo, adaptabilidad...). Estos equipos serán los que puedan ser instalados en las viviendas, según el diseño realizado. Los recuperadores que no incorporan ventilador son válidos por dimensiones, pero no funcionarían en condiciones normales si no se les

añadiera en el diseño de conjunto un ventilador. Seleccionamos el recuperador tipo Flexeo 210 de la casa S&P con una eficacia de recuperación de hasta el 94%

EFICACIA >90%. Consumo de energía medio.

Id.	Nombre	Fabricante	Tipo	Medio	Localización	Dimensiones
100	Kinetic E	Vent-Axia	Recuperador de calor	aire-aire	Techo o pared	550 x 550 x 285 y 630 x 775 x 524
	Akor ST HR	"S&P"	Recuperador de calor con ventilador de impulsión y extracción	aire-aire	falso techo	786x668x427
	Flexeo 210	"S&P"	Recuperador de calor con ventilador de impulsión y extracción	aire-aire	falso techo	1774x591x300

EFICACIA 80-90%. Consumo de energía bajo-nulo.

Id.	Nombre	Fabricante	Tipo	Medio	Localización	Dimensiones
13	WRL	SCHAKO	Ventilación descentralizada	aire-aire	Suelo o falso techo	540 x 540 x 160
25	SH704	Fantech	Ventilador con recuperación de calor	aire-aire	-	549 x 439 x 268
88	HR25	Vent-Axia	Recuperador de calor	aire-aire	Pared exterior	508 x 204 y 666 x 204

EFICACIA 70-80%. Consumo de energía bajo-nulo.

Id.	Nombre	Fabricante	Tipo	Medio	Localización	Dimensiones
74	SAF	Lumelco, Mitsubishi	Recuperador de calor entálpico	aire-aire	Techo	882 x 599 x 270
86	HR200V	Vent-Axia	Recuperador de calor	aire-aire	Falso techo o ático	435 x 373 x 275
87	HR100R	Vent-Axia	Recuperador de calor	aire-aire	Falso techo	305 x 240 x 160
90	HR100W	Vent-Axia	Recuperador de calor	aire-aire	Pared exterior	370 x 270 x 195
91	HR200WK	Vent-Axia	Recuperador de calor	aire-aire	Pared exterior	270 x 270 x 245
94	HEU-Heat Exchange Unit	Vent-Axia	Recuperador de calor	aire-aire	Falso techo o ático	700 x 340 x 315

Tabla 7.7. Características de los distintos recuperadores de calor comerciales disponibles, seleccionados por su adecuación. Fuente. El autor.

Este equipo se toma como ejemplo para realizar las simulaciones y los cálculos, teniendo en cuenta que cumple con las características que son necesarias para realizar la intervención de optimización.

Flexeo 210 y Flexeo BP 210

Conjunto formado por un recuperador de calor estático CADS-FLEXEO de alta eficiencia (hasta el 94%) y 2 motoventiladores VENT-FLEXEO (uno de impulsión y otro de extracción). Todos los elementos del conjunto son de bajo perfil (300 mm) y peso reducido, lo que permite su instalación en falsos techos, tanto en viviendas unifamiliares como en pisos de viviendas colectivas. La configuración independiente de los distintos módulos (intercambiador, motoventilador de impulsión y motoventilador de extracción) permite total flexibilidad de ubicación e instalación. Equipados con filtro de impulsión F5 y filtro de extracción G4. Disponen de control remoto que permite ajustar la función boost, el by-pass y la alarma de filtros sucios. La versión FLEXEO BP incorpora, como

accesorio, by-pass 100%, de accionamiento manual o automático, cuyo diseño permite mantener el bajo perfil del recuperador de manera que no impide su perfecta instalación en falsos techos.

Características

- Intercambiador a contraflujo con rendimiento hasta 94%.
- Cuerpo de EPP.
- Toberas pivotantes 90°.
- 2 módulos ventilador (impulsión y extracción).
- By-pass 100% manual o automático (versión BP).
- Modo boost manual.
- Filtros de impulsión F5.
- Filtro de extracción G4.
- Kit de instalación mural o de techo.
- Fácil acceso al intercambiador.
- Control remoto incorporado Permite el ajuste de:
 - Función boost.
 - Alarma de filtros sucios.
 - By-pass.
 - Modo ausencia.

Características técnicas

Modelo	Toberas (mm)	Tensión (V)	Caudal máximo (m ³ /h)	Potencia absorbida (W)	Eficiencia máxima (%)
FLEXEO 210	125	230	210	100	94
FLEXEO BP 210	125	230	210	100	94

Fig. 7.8. Esquema de equipo de recuperador de calor y ventilador de impulsión y extracción seleccionado.

Fig. 7.9. Curva de rendimiento del equipo seleccionado.

7.3 METODOLOGÍA DE COMPARACIÓN DE INTERVENCIONES DE REHABILITACIÓN DE COSTE ÓPTIMO (COST OPTIMAL METHODOLOGY)

El reglamento delegado 244/2012 de la Unión Europea desarrolla los aspectos de las intervenciones de rehabilitación energética de los edificios planteadas en la Directiva 2010/31/UE de “Eficiencia Energética de la Edificación” (EPBD). Este reglamento introduce un marco metodológico comparativo para calcular los niveles óptimos de rentabilidad de los requisitos mínimos de eficiencia energética de los edificios y sus elementos. *La Directiva 2010/31/UE no solo promueve la reducción del consumo de energía en los entornos construidos, sino que además hace hincapié en que el sector de la*

construcción es una de las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono. Esta metodología incluye, dentro de sus indicaciones, instrucciones básicas para establecer la rentabilidad de medidas de eficiencia energética en la edificación nueva y existente y de sus elementos.

El nivel de coste óptimo se define como «el nivel de eficiencia energética que conduce al mínimo coste durante el periodo estimado de ciclo de vida». Los estados miembros determinarán este nivel teniendo en cuenta los costes, incluyendo la inversión inicial, mantenimiento, costes de operación y el ahorro en el coste de energía. El ciclo de vida económica se estima en un periodo de 30 años y se define en el reglamento delegado de la Comisión (EC, 2012a).

En primer lugar, los estados miembros habrán de definir los edificios de referencia para la calificación energética. Una vez definidos, se establecen los parámetros y paquetes de medidas para mejorar la eficiencia energética de la edificación (objetivos de edificio energía casi nula, EECN).

A partir de aquí, se establecen las condiciones de contorno, en cuanto a la edificación (clima, geometría, eficiencia de los sistemas,...). De estas condiciones de contorno del edificio se obtiene la demanda energética del mismo, fruto de la aplicación de los distintos paquetes de intervención o intervenciones. Como condiciones de contorno económicas están los costes (coste de la inversión, tipos de interés, precio de la energía...).

El producto de los análisis previos (de ámbito económico y energético) es un escenario de comparación, con los valores actualizados al momento presente, de forma que se pueda comparar cada intervención o paquete de intervenciones en el ámbito de un periodo de su ciclo de vida, que se establece a priori como 30 años. El análisis comparado con el valor actual neto de los gastos a incurrir y el ahorro relativo será lo que muestra el escenario de amortización de las soluciones, para compararlas en la dimensión financiera, como una inversión más a realizar.

7.3.1 APLICACIÓN A LA SOLUCIÓN DE OPTIMIZACIÓN EN LA VENTILACIÓN

La aplicación que se va a hacer del método del coste óptimo en la tesis doctoral tiene por objeto comparar el sistema de optimización propuesto a los distintos escenarios establecidos en el apartado de análisis. Se han obtenido ya las demandas energéticas de cada una de las simulaciones (variaciones dentro de los distintos escenarios) con el análisis energético realizado en el capítulo 5. Habrá que realizar la simulación, en las mismas condiciones, para el escenario de optimización, con sus variantes según ocupación y zona climática, primero sin optimización de horario (mejora de la estanquidad de la envolvente y recuperación de calor 24h/día) y en segundo lugar, la optimización aplicando la racionalización del horario de utilización del sistema (mejora de la estanquidad de la envolvente y recuperación de calor aplicando el horario de ocupación) Para ello, habrá en primer lugar que definir las condiciones de contorno, es decir, comenzando por establecer la solución propuesta. En segundo lugar, dentro de este mecanismo, se establecerán los costes:

1. **de inversión inicial**, estableciendo el presupuesto de partida para la instalación de la solución propuesta, que se detalla más adelante en este capítulo.
2. **De los costes de operación, que en nuestro caso, será los precios de la energía y su variación anual**, teniendo en cuenta los costes actuales de la energía en el estado español y la tasa de variación anual.

Para este caso y siguiendo el guion del Anexo al Reglamento, se consideran los costes derivados del cumplimiento de la normativa vigente. Dentro de los costes de explotación se

pueden encontrar también los costes de energía, pero por tratarse de viviendas, donde el coste fundamental de la energía se destina en mantener las condiciones térmicas, se analizan dentro del cálculo de la demanda energética y el gasto necesario para cubrirla.

Los costes energéticos de funcionamiento, dado su elevado impacto en la sensibilidad del análisis, se han considerado con sus tasas de variación más realistas posibles. Dado que para este análisis de rentabilidad no se interviene sobre otros consumos eléctricos (cocina, iluminación, etc.) estos no son diferenciales para la comparativa y no se han analizado.

El coste de la energía se ha separado en dos grupos principales, dadas las características del edificio: Gas y electricidad. Estos costes se han estimado en base a los datos de la Comisión Nacional de la Energía. A estas tasas de variación media interanual habrá que descontarles una inflación media, prevista en base a los datos históricos del Instituto Nacional de Estadística.

3. **De mantenimiento estimando la degradación y operación de los sistemas y actuaciones a realizar.** Se estiman unos gastos de mantenimiento de 50 euros anuales en base a repasos para mantener la permeabilidad de la envolvente reducida, es decir, los repasos sobre los sellados, burletes y juntas constructivas.

7.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN OPTIMIZADA

En el edificio demostrador, se ha desarrollado un sistema de admisión y extracción mecánica, instalado en el falso techo del baño, con salida a la fachada. Por encima de la ventana del baño. Este sistema no cuenta con un recuperador de calor con ventilador de impulsión/extracción, que genera una presión equilibrada en el interior de la vivienda y permite la incorporación a multitud de tipologías de vivienda al tratarse de una solución individualizada, que minimiza los conductos y la instalación y permite un uso personalizado por parte de cada usuario.

En la vivienda tipo que muestra el CTE DB HS3 el planteamiento podría ser el mostrado en las figuras bajo estas líneas. Un recuperador de calor únicamente para la ventilación en el esquema 2 y un recuperador de calor para todos los usos térmicos con bomba de calor en el esquema 1. En nuestro caso, optamos por el esquema 2.

Fig. 7.10. Esquemas de introducción de recuperador de calor en vivienda tipo CTE. Fuente: el autor

En el edificio demostrador el sistema se adaptaría a la configuración de la vivienda, buscando la adecuación a la zona de falso techo del baño y minimizar los conductos hasta las estancias vivideras, donde se requiere mayor nivel de renovación. Bajo estas líneas observamos el esquema de configuración y funcionamiento del sistema y la adecuación a una vivienda del bloque demostrador.

Fig. 7.11. Esquema de instalación de recuperador. Fuente: el autor

Fig. 7.12. Esquema de instalación de recuperador en vivienda de edificio de referencia. Fuente: el autor

7.4.1 PRESUPUESTO DEL SISTEMA

Se ha determinado una solución posible con unidades de obra, de tipo presupuesto de ejecución material (PEM), sin incluir IVA, para el cálculo real de los costes en que se podría incurrir si se desarrolla la solución.

PRESUPUESTO ORIENTATIVO PARA INSTALACIÓN EN DEMOSTRADOR DE CALLE LA CACIÓ DEL OLVIDO, 28, MADRID		Precio
Mejora de la estanqueidad	Pruebas de estanqueidad al aire para detectar las fugas y sellarlas	300,00 €
	Sellado de, vidrios en ventanas, marcos de ventanas y juntas constructivas con envolvente	200,00 €
	Burletes en puertas exteriores	50,00 €
	Sellado de aparatos sanitarios, tomas eléctricas y armarios	50,00 €
Instalación completa de recuperación de calor	Grupo de ventilación para instalación individual. Recuperador de calor, con intercambiador de flujo cruzado, caudal máximo 400 m³/h, de 780x560x340 mm.	982,73 €
	Techo continuo de placas de cartón yeso. Techo continuo de placas de cartón yeso de 1,5 cm de sección, sujetas mediante estopada colgante.	300,00 €
	Conducto flexible de doble pared de aluminio/poliéster con aislamiento acústico. Conducto flexible de doble pared de aluminio/poliéster con aislamiento acústico, de 125 mm de diámetro interior, para instalación de ventilación.	300,00 €
	Rejilla para interiores. Rejilla de plástico, con lamas horizontales fijas, salida de aire perpendicular a la rejilla, modelo bip "alder", para ventilación mecánica. (5 uds.)	58,70 €
	Abertura para ventilación mecánica. Boca de extracción, autorregulable, modelo bap color 60 "alder", o similar, de caudal mínimo 21 l/s, rejilla color blanco, con revestimiento acústico y anillo fónico, para paredes o techos de locales húmedos (baño/aseo), para ventilación mecánica. (1 ud.)	37,47 €
	Derivación para conducto de distribución. Derivación formada por cajón repartidor, "alder", o similar, de 484x470x180	20,18 €

mm, con embocadura de entrada oblonga de 325x130 mm y cuatro embocaduras de salida de 125 mm de diámetro, para conducto de impulsión de ventilación mecánica.	
Compuerta anti retorno, metálica, modelo car-80 "S&P", o similar, de 80 mm de diámetro, para ventilación mecánica. (4 uds.)	76,00 €
Total:	2.375,08 €

Tabla 7.8. Presupuesto de instalación de recuperación de calor en vivienda tipo.

7.4.2 OPTIMIZACIÓN DE HORARIO. HORARIO DE UTILIZACIÓN DE RECUPERACIÓN DE CALOR

El esquema de utilización que se ha previsto para la optimización de las soluciones esta basado en el vigente para el cálculo de la demanda energética del CTE. Se contemplan dos horarios de utilización, uno con utilización continua del sistema y un segundo, racionalizando su uso a los momentos en que se produzca ocupación de las estancias de la vivienda.

Escenario de optimización 1 Horario de ocupación de las estancias en simulaciones de 4, 5 y 6 ocupantes						Caudal de renovación
	Lunes a viernes	% de ocupación	Sábados y festivos	% de ocupación		UNE EN 15251 CALIDAD I
Dormitorios	0:00 – 9:00	100	0:00 – 9:00	100		1,11 h ⁻¹
Salón (máxima ocupación)	15:00-16:00	50	10:00-12:00	50		
	20:00-24:00	100	15:00-17:00	100		
Cocinas	8:00-9:00	75	8:00-9:00	100		
	14:00-15:00	50	14:00-15:00	50		
Cuartos de baño	7:00-8:00	75	9:00-10:00	75		

Tabla 7.9. Resumen de ocupación, establecidas según recomendaciones para simulación energética en CTE DB HE1.

Apéndice C.

En el escenario de optimización 1 se usa el caudal correspondiente a la categoría de calidad I del UNE EN15251, que tiene un caudal de renovación de aire de 1,11 h⁻¹. En el escenario de optimización 2 el uso del sistema es de 14 horas diarias.

Escenario de optimización 2 Horario de ocupación de las estancias en simulaciones de 4, 5 y 6 ocupantes						Caudal de renovación
	Lunes a viernes	% de ocupación	Sábados y festivos	% de ocupación		UNE EN 15251 CALIDAD I
Dormitorios	0:00 – 9:00	100	0:00 – 9:00	100		1,11 h ⁻¹
	9:00-15:00	0	9:00-15:00	0		0,2 h ⁻¹
Salón (máxima ocupación)	15:00-16:00	50	10:00-12:00	50		1,11 h ⁻¹
	16:00-20:00	0				0,2 h ⁻¹
Cocinas	20:00-24:00	100	15:00-17:00	100		1,11 h ⁻¹
	8:00-9:00	75	8:00-9:00	100		1,11 h ⁻¹
Cuartos de baño	14:00-15:00	50	14:00-15:00	50		1,11 h ⁻¹
	7:00-8:00	75	9:00-10:00	75		1,11 h ⁻¹

Tabla 7.10. Resumen de ocupación, establecidas según recomendaciones para simulación energética en CTE DB HE1.
Apéndice C.

En cuanto a las simulaciones se realizarán en los escenarios previos del análisis, aplicándolos a los ocupantes definidos (4, 5 y 6) y las ciudades de las zonas climáticas seleccionadas.

Fig. 7.13. Definición de metodología de simulación con el software EnergyPlus v8.1 para la optimización

Una vez definidos los resultados, se procede al análisis de la calidad del aire interior mediante simulación con el programa CONTAM, en los escenarios definidos. Una parte de este análisis es la comprobación de que los otros contaminantes no superan los límites, y no solo los producidos por emisión de los ocupantes.

Fig. 7.14. Definición de metodología de simulación con el software CONTAM v3.1 para la optimización

Obtenidos los resultados de las simulaciones nos disponemos a realizar la comparativa en los 3 aspectos en cuestión: la demanda de energía global, la calidad del aire interior y la comparativa de costes que hagan la medida de optimización amortizable para los distintos escenarios.

7.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS ENERGÉTICOS

El estudio comparativo en términos de demanda energética se ha realizado analizando la demanda de la situación que denominamos Base y que expresa los escenarios previos (PRE NTE ISV 75, NTE ISV 75 o CTE DB HS3) y comparándolos con los resultados obtenidos de la simulación con Recuperación de calor (R.C.) y optimización de horario de utilización del sistema (BASE con R.C. y optimización de horario).

En la siguiente tabla se detallan los resultados de la simulación con el escenario de optimización con recuperación de calor y el escenario con recuperación de calor y optimización de horario, comparándolos con la demanda de los escenarios correspondientes a la edificación residencial existente en España construida en los distintos periodos.

ESCENARIO	OCUPANTES	DEMANDA CALEFACCIÓN, REFRIGERACIÓN Y VENTILACIÓN	DEMANDA CON RECUPERACIÓN DE CALOR (R.C.)	REDUCCIÓN DE DEMANDA	DEMANDA CON R.C. Y OPTIMIZACIÓN DE HORARIO (O.H.)	REDUCCIÓN DE DEMANDA (R.C.+ O.H.)
		kWh/m ² a	kWh/m ² a	%	kWh/m ² a	%
PRE NTE ISV 75 NORTE SUR	4P	117,24	74,00	36,88%	68,22	41,82%
	5P	112,85	71,02	37,07%	65,29	42,15%
	6P	108,66	68,31	37,14%	62,62	42,37%
PRE NTE ISV 75-ESTE OESTE	4P	125,08	74,00	40,84%	68,22	45,46%
	5P	120,92	71,02	41,26%	65,29	46,01%
	6P	116,93	68,31	41,58%	62,62	46,45%
NTE ISV 75-NORTE SUR	4P	117,40	74,00	36,97%	68,22	41,89%
	5P	113,03	71,02	37,17%	65,29	42,24%

	6P	108,88	68,31	37,26%	62,62	42,49%
NTE ISV 75 ESTE OESTE	4P	125,25	74,00	40,92%	68,22	45,54%
	5P	121,07	71,02	41,34%	65,29	46,07%
	6P	117,12	68,31	41,68%	62,62	46,54%
CTEDBHS3- NORTE SUR	4P	79,79	74,00	7,26%	68,22	14,50%
	5P	80,97	71,02	12,28%	65,29	19,36%
	6P	87,03	68,31	21,51%	62,62	28,04%
CTEDBHS3 ESTE OESTE	4P	88,48	82,06	7,26%	75,65	14,50%
	5P	89,74	78,72	12,28%	72,37	19,36%
	6P	95,76	75,17	21,51%	68,91	28,04%
CTEDBHS3 SEVILLA	4P	43,02	42,45	1,32%	38,01	11,64%
	5P	44,16	40,85	7,50%	36,92	16,40%
	6P	47,87	39,21	18,10%	35,60	25,63%
CTEDBHS3 BARCELONA	4P	59,79	55,52	7,13%	50,97	14,74%
	5P	60,52	52,55	13,16%	48,31	20,17%
	6P	65,08	50,28	22,75%	46,09	29,18%
CTEDBHS3 ALMERIA	4P	34,49	33,31	3,40%	30,00	13,00%
	5P	35,54	32,37	8,90%	29,26	17,67%
	6P	38,43	31,76	17,35%	28,84	24,96%
CTEDBHS3 BILBAO	4P	73,26	71,30	2,68%	64,21	12,36%
	5P	72,46	65,94	9,01%	59,59	17,77%
	6P	76,19	60,87	20,11%	55,27	27,46%
CTEDBHS3 CORUÑA	4P	53,55	51,64	3,57%	46,51	13,15%
	5P	52,40	46,50	11,26%	42,02	19,81%
	6P	55,14	41,75	24,28%	37,91	31,25%
CTEDBHS3 SORIA	4P	136,93	119,87	12,46%	112,49	17,85%
	5P	138,32	114,76	17,03%	107,34	22,40%
	6P	147,40	110,03	25,35%	102,47	30,48%
UNE 15251 CALIDAD I	4P	115,76	74,00	36,07%	68,22	41,07%
	5P	111,30	71,02	36,19%	65,29	41,34%
	6P	107,05	68,31	36,19%	62,62	41,51%
UNE 15251 CALIDAD II	4P	96,13	68,86	28,37%	64,29	33,12%
	5P	92,00	65,74	28,54%	61,28	33,39%
	6P	88,07	62,80	28,69%	58,46	33,62%
UNE 15251 CALIDAD III	4P	76,98	66,75	13,29%	62,32	19,04%
	5P	73,27	63,50	13,34%	59,19	19,22%
	6P	69,83	60,47	13,41%	56,29	19,39%

Tabla 7.11. Resultados de optimización en términos de demanda de calefacción, refrigeración y ventilación

7.5.1 PRE NTE ISV 75

Para la edificación realizada anteriormente a 1980, que corresponde al escenario previo a la introducción de la NTE, los resultados de reducción de demanda son sustanciales, llegando hasta el 40% de reducción de demanda de calefacción, refrigeración y ventilación para la optimización con recuperación de calor y optimización de horario, y de más del 35% para el escenario únicamente de recuperación de calor. Observamos que la orientación del bloque no tiene una incidencia remarcable. El número de ocupantes tiene un efecto de reducción ligera de la demanda, relacionado con las ganancias internas de calor provenientes de los ocupantes.

Fig. 7.15. Reducción de demanda con recuperación de calor (R.C.) Y optimización de horario según ocupación (O.H.) – Aplicación con niveles de ventilación según orientación y ocupantes. PRE NTE ISV 75

7.5.2 NTE ISV 75

Al igual que en el escenario anterior, la incorporación de las medidas de optimización resultan muy eficaces para conseguir el objetivo de reducción de demanda de calefacción, refrigeración y ventilación. Observamos igualmente una leve influencia de la orientación y de la ocupación en la reducción de demanda.

Fig. 7.16. Reducción de demanda con recuperación de calor (R.C.) Y optimización de horario según ocupación (O.H.) – Aplicación con niveles de ventilación según orientación y ocupantes. NTE ISV 75

7.5.3 CTE DB HS3

Para la situación referente al escenario a partir de la implantación del CTE, a partir del año 2006, en la localidad de Madrid, la eficacia de las medidas de optimización resultan menores, rondando porcentajes poco significativos para la optimización únicamente con recuperación de calor (del 7 al 15%) y llegando a porcentajes más relevantes en con la optimización de horario (del 15 al 28%). En todo caso, se observa que para las simulaciones con alta ocupación la eficacia mejora ostensiblemente. No se aprecia mucha diferencia en términos de orientación principal del bloque (de norte-sur a este-oeste).

Fig. 7.17. Reducción de demanda con recuperación de calor (R.C.) Y optimización de horario según ocupación (O.H.) – Aplicación con niveles de ventilación según orientación y ocupantes. CTE DB HS3

En cuanto a las distintas zonas climáticas, los resultados son aún más reveladores. Para las zonas climáticas con severidad climática de invierno (zonas E y D, representadas por Soria y Madrid) la eficacia de la optimización en términos de reducción de demanda es significativa para en el escenario con recuperación de calor y optimización de horario. Al igual que en la gráfica previa, la ocupación incide positivamente en la eficacia de las medidas. Sin embargo, para las zonas climáticas de severidad invernal suave (A, B y C) las medidas son relativamente poco eficaces. Si bien, en términos relativos el porcentaje de reducción de demanda es similar a las simulaciones en las otras zonas climáticas, en términos absolutos la reducción de demanda supone un número inferior al ser la demanda base muy inferior. Por tanto, aun suponiendo una intervención con repercusión en la demanda, su eficacia resulta inferior.

fig. 7.18. Reducción de demanda con recuperación de calor (R.C.) y optimización de horario según ocupación (O.H.) – Zona climática y ocupantes. CTE DB HS3

7.5.4 UNE EN 15251

Al no ser un escenario que represente edificación residencial existente, y sabiendo que su categoría de calidad I es la que ha servido como referencia en cuanto a caudal de renovación, no se va a tener en cuenta para los análisis de reducción de demanda, ya que se comprueba que la reducción está garantizada. Sin embargo, se ha realizado también la simulación para las restantes categorías de calidad, para apuntar que si se optara por ellas, aun asumiendo una calidad del aire inferior, la reducción de demanda resultaría aún más significativa, de cara a incorporarla a los otros escenarios. El tomar como referencia la categoría de calidad II o III significaría una reducción en los caudales de renovación del aire interior ($0,78 \text{ h}^{-1}$ y $0,48 \text{ h}^{-1}$ respectivamente) por lo que esta medida obligaría a prestar una atención mayor si cabe a la repercusión con respecto a calidad de aire interior.

Fig. 7.19. Reducción de demanda con recuperación de calor (R.C.) y optimización de horario según ocupación (O.H.) – Aplicación con niveles de ventilación según niveles de calidad y ocupantes.une EN 15251

7.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS CON OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR

Una vez analizada la repercusión con respecto a demanda de calefacción, refrigeración y ventilación, se hace obligado el análisis de la repercusión en la calidad del aire global en cuanto a CO_2 en principio, pero también teniendo en cuenta los aspectos relacionados con los contaminantes domésticos que tienen más relación con la salud de los ocupantes, que hemos caracterizado como formaldehído y Compuestos orgánicos volátiles totales.

En primer lugar nos encontramos con que la optimización, con el aumento de caudal de renovación, la recuperación de calor y la optimización de horario según uso tienen un efecto de reducción de los picos en las curvas de concentración de CO_2 , como se puede observar en las gráficas bajo estas líneas.

El efecto, que se aprecia a simple vista en las concentraciones de los dormitorios que disminuyen y mejoran la calidad del aire interior. Aunque en el salón no alcanza a reducir en su totalidad la curva de concentración por debajo del nivel de 1200 ppm, se aprecia una disminución significativa y se supera únicamente en cortos periodos de tiempo este límite, aspecto contemplado por la normativa UNE EN 15251. Asimismo se observa que las pendientes de las curvas de disminución de contaminantes se suavizan, lo que indica que en el tiempo en que no se produce ocupación, el caudal se reduce, de manera que no se incremente la demanda energética utilizando sin necesidad el sistema de ventilación, durante periodos de no ocupación. A continuación se muestran las gráficas para 4, 5 y 6 ocupantes de la solución optimizada con recuperación de calor y regulación por horario.

Fig. 7.22. CO₂. Concentración dinámica en ppm. Escenario optimizado. 4 ocupantes. Madrid.

Fig. 7.23. CO₂. Concentración dinámica en ppm. Escenario optimizado. 5 ocupantes. Madrid

Fig. 7.24. CO₂. Concentración dinámica en ppm. Escenario optimizado. 6 ocupantes. Madrid

Las huellas ambientales para 4, 5 y 6 ocupantes de estos escenarios se muestran bajo estas líneas:

Fig. 7.25. Huellas de calidad de escenario optimizado por número de ocupantes. Madrid.

Se observa que en las situaciones de ocupación media (hasta 4 ocupantes), la respuesta del espacio se encuentra enteramente dentro de los límites establecidos para la edificación residencial existente, por debajo de 1200 ppm e incluso podría llegar al nivel establecido para nueva edificación (por debajo de 900 ppm). Para ocupación elevada (de 5 a 6 ocupantes) la respuesta de huella de calidad de aire está por debajo del 10% que establecemos como límite de la calidad óptima. En estos casos, la respuesta confirma el objetivo general de mejorar la calidad del aire interior mediante una estrategia de optimización de los sistemas de ventilación existentes. Como hemos visto en el apartado previo, la demanda energética también se ha visto optimizada.

En cuanto a los contaminantes de referencia (formaldehído y Compuestos orgánicos volátiles), producidos por la emisión de los acabados interiores y el mobiliario. Nos encontramos los siguientes resultados, que se observan en las gráficas de concentración de formaldehído (HCHO) y compuestos orgánicos volátiles.

Fig. 7.26. HCHO. Concentración (ppm). Ventilación según escenario de optimización con R.C. Y O.H. 6 ocupantes. Madrid

Se aprecia un aumento de las concentraciones, que en otros escenarios permanecían estables, en el periodo en el que se reduce la ventilación a la infiltración. Aún así, este aumento no llega a superar los niveles establecidos como límites, por la OMS. En todo caso es importante vigilar la evolución de estos contaminantes, a la vista de las medidas experimentales de concentración de estos contaminantes en viviendas (ver apartado de análisis, en su punto 6.1.2 en esta tesis).

Fig. 7. 27. HCHO. Concentración (ppm). Ventilación Según Escenario NTE ISV 75. 6 Ocupantes. Madrid

Algo similar ocurre en el caso de los compuestos orgánicos volátiles totales (TVOCs), como se observa en las gráficas bajo estas líneas.

Fig. 7.28. TVOCs. Concentración (kg/kg). Escenario de optimización con R.C. y O.H. 6 ocupantes. Madrid

Se observa el mismo efecto, y en este caso tampoco se superan los límites establecidos por la OMS para este contaminante. Otro efecto apreciable, tanto para el formaldehído como los TVOCs, es que durante los periodos de ocupación la concentración es un 25% menor aplicando el caudal de renovación del escenario de optimización, es decir, las condiciones mejoran en los periodos de ocupación, y no llegan a niveles peligrosos durante los periodos de no ocupación.

Fig. 7.29. TVOCs. Concentración (kg/kg). Escenario NTE ISV 75. 6 ocupantes. Madrid

7.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS. COMPARACIÓN DE ESCENARIOS DE OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS DE CALIDAD AMBIENTAL Y DEMANDA ENERGÉTICA

Uno de los aspectos destacados de la presente investigación es la unificación de los vectores calidad de aire y demanda energética de calefacción, refrigeración y ventilación como aproximación al problema de la ventilación en edificación residencial. El proceso de optimización realizado pretendía en sus objetivos iniciales mejorar de manera sustancial estos dos vectores. En el capítulo de análisis se han relacionado ambos aspectos para los escenarios de análisis caracterizados (PRE NTE ISV 75, NTE ISV 75 y CTE DB HS3). En la siguiente gráfica observamos el posicionamiento de la solución optimizada respecto de las posiciones iniciales para la situación de 6 ocupantes, la de mayor exigencia en términos de calidad del aire, en la localidad de Madrid.

Fig. 7.30. Escenario optimizado frente a escenarios de edificación existente. Relación entre demanda energética y calidad del aire. Mejoras respecto a escenarios iniciales. 6 ocupantes. Madrid.

En las distintas zonas climáticas consideradas, el resultado en cuanto a la calidad del aire es similar, mientras que observamos diferencias en cuanto al rendimiento de las medidas de optimización en cuanto a demanda energética.

Se observa que la pendiente que marca la línea de unión entre la situación optimizada y la situación inicial señala la viabilidad energética de la propuesta, y en un sentido más amplio, la posible viabilidad en términos económicos de la implementación de la estrategia de optimización. Así, nos encontramos que en la localidad de Almería (zona climática A4), la calidad del aire pasa de 27% de superación de umbrales a 8% (19% de diferencia), mientras que en demanda energética pasa de 38 kWh/m²a a 29 kWh/m²a (9 kWh/m²a) lo que supone un rendimiento inferior en términos de demanda. Si estudiamos las pendientes de las rectas por separado, nos damos cuenta de que se da la misma pendiente por zona climática. Así, la pendiente de las zonas C (Barcelona, Bilbao y Coruña) tienen una pendiente de entre 0,92 y 1,15. La zona D tiene una pendiente mayor (1,35) que las previas y la E tiene la mayor pendiente (2,03). Las zonas A (0,51) y B (0,72) son las de menor pendiente. Esta pendiente indica la idoneidad de la aplicación de la estrategia de optimización a la

zona climática. Para mayor pendiente, la medida será más efectiva, siempre dentro de un mismo escenario.

Fig. 7.31. Escenario optimizado frente a escenarios de edificación existente. Relación entre demanda energética y calidad del aire. Mejoras respecto a escenario CTE DB HS3 con distintas zonas climáticas.. 6 ocupantes.

TABLA 7.12. Pendiente de la recta en la gráfica de calidad del aire y demanda energética

SORIA E1	2,14
MADRID D3	1,35
BILBAO C1	1,15
BARCELONA C2	0,92
CORUÑA C1	0,93
SEVILLA B4	0,72
ALMERÍA A4	0,51

7.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS.COMPARACIÓN DE ESCENARIOS OPTIMIZACIÓN EN TERMINOS DE COSTE ÓPTIMO

La evaluación realizada hasta el momento, en términos de demanda energética, de calidad del aire, y de la combinación de ambas quedaría incompleta si no se analizaran los aspectos relacionados con el coste de la intervención y su amortización. En apartados previos se ha analizado y concretado un sistema del que se han definido los elementos y valorado el conjunto. Dentro de esta valoración, que consideramos el coste de inversión inicial, se ha incluido el coste de los equipos, la instalación y los elementos de mejora de la estanquidad de la envolvente, relacionados con las ventanas y carpinterías exteriores.

Como costes de operación se ha incluido el coste de la energía en términos anuales, con respecto a las simulaciones realizadas. Como costes de mantenimiento se ha considerado un coste anual de 50 euros para revisión y mantenimiento de los equipos y de la estanquidad de la envolvente.

Se han analizado los escenarios en función de su ahorro relativo, el VAN (Valor actual neto) y TIR (tasa interna de retorno), teniendo en cuenta estos costes.

En primer lugar, se han considerado los distintos escenarios con sus demandas caracterizadas en cuanto a calefacción y refrigeración en términos de energía y su gasto asociado conforme a la fuente:

variable escenario	variable ocupación	Demanda anual de calefacción (kWh/m ² ·a)	Demanda anual de refrigeración (kWh/m ² ·a)	Gasto en gas	Gasto en electricidad
PRE NTE ISV 75 NORTE SUR	4P	103,43	13,81	393,04 €	124,90 €
	5P	98,25	14,60	373,33 €	132,06 €
	6P	93,25	15,41	354,34 €	139,39 €
PRE NTE ISV 75 ESTE OESTE	4P	104,72	20,36	397,91 €	184,11 €
	5P	99,70	21,22	378,84 €	191,89 €
	6P	94,81	22,12	360,26 €	200,06 €
NTE ISV 75- NORTE SUR	4P	103,60	13,80	393,67 €	124,81 €
	5P	98,43	14,60	374,04 €	132,00 €
	6P	93,47	15,41	355,18 €	139,34 €
NTE ISV 75- ESTE OESTE	4P	104,90	20,35	398,59 €	184,08 €
	5P	99,86	21,20	379,47 €	191,75 €
	6P	95,01	22,11	361,02 €	200,01 €
CTEDBHS3 NORTE-SUR	4P	62,36	17,43	236,96 €	157,65 €
	5P	62,30	18,67	236,73 €	168,82 €
	6P	66,90	20,12	254,22 €	182,00 €
CTEDBHS3 ESTE OESTE	4P	63,22	25,27	240,22 €	228,50 €
	5P	63,22	26,53	240,22 €	239,89 €
	6P	67,78	27,99	257,54 €	253,11 €
CTEDBHS3 SEVILLA	4P	15,84	27,17	60,20 €	245,76 €
	5P	15,28	28,88	58,08 €	261,19 €
	6P	16,82	31,05	63,91 €	280,84 €
CTEDBHS3 BARCELONA	4P	42,81	16,97	162,69 €	153,49 €
	5P	42,04	18,48	159,75 €	167,11 €
	6P	44,87	20,21	170,51 €	182,77 €
CTEDBHS3 ALMERIA	4P	11,32	23,17	43,00 €	209,57 €
	5P	10,63	24,91	40,38 €	225,28 €
	6P	11,38	27,05	43,23 €	244,64 €
CTEDBHS3 BILBAO	4P	69,13	4,13	262,68 €	37,38 €
	5P	67,92	4,54	258,09 €	41,08 €
	6P	71,08	5,10	270,11 €	46,15 €
CTEDBHS3 CORUÑA	4P	50,07	3,48	190,26 €	31,50 €
	5P	48,64	3,76	184,82 €	34,00 €
	6P	51,00	4,14	193,79 €	37,45 €
CTEDBHS3 SORIA	4P	132,27	4,67	502,59 €	42,21 €
	5P	133,25	5,08	506,32 €	45,90 €
	6P	141,76	5,64	538,67 €	50,97 €

Tabla 7.12. Estimación de demanda energética y gastos en energía en los distintos escenarios contemplados

Por otro lado se calcula el coste de inversión inicial y se incorpora a la tabla de costes anuales, que serán considerados en su valor actual neto. Cada una de las soluciones se caracterizará según estos costes hasta el año 30 de la intervención, horizonte establecido como marco comparativo por la metodología de coste óptimo.

ESCENARIOS		AÑO 1	AÑO 2...
PRE NTE ISV 75 NORTE SUR	Gasto Energía sin rehabilitación	505,39	531,36
	Ahorro Relativo con la intervención	-213,00	-223,95
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-3113,65	173,95
	Acumulado	-3113,65	-2939,70
PRE NTE ISV 75 ESTE OESTE	Gasto Energía sin rehabilitación	570,73	600,06
	Ahorro Relativo con la intervención	-262,57	-276,06
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-3228,56	226,06
	Acumulado	-3228,56	-3002,50
NTE ISV 75 NORTE SUR	Gasto Energía sin rehabilitación	506,04	532,04
	Ahorro Relativo con la intervención	-213,74	-224,73
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-3115,04	174,73
	Acumulado	-3115,04	-2940,31
NTE ISV 75 ESTE OESTE	Gasto Energía sin rehabilitación	571,22	600,57
	Ahorro Relativo con la intervención	-263,18	-276,70
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-3229,66	226,70
	Acumulado	-3229,66	-3002,95
CTEDBHS3 NORTE-SUR	Gasto Energía sin rehabilitación	405,54	426,39
	Ahorro Relativo con la intervención	-78,53	-82,56
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-2879,33	32,56
	Acumulado	-2879,33	-2846,77
CTEDBHS3 ESTE OESTE	Gasto Energía sin rehabilitación	480,11	504,79
	Ahorro Relativo con la intervención	-92,97	-97,75
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-2968,34	47,75
	Acumulado	-2968,34	-2920,60
CTEDBHS3 SEVILLA	Gasto Energía sin rehabilitación	319,27	335,68
	Ahorro Relativo con la intervención	-52,37	-55,06
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-2766,90	5,06
	Acumulado	-2766,90	-2761,84
CTEDBHS3 BARCELONA	Gasto Energía sin rehabilitación	326,86	343,65
	Ahorro Relativo con la intervención	-65,93	-69,32
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-2788,05	19,32
	Acumulado	-2788,05	-2768,73
ESCENARIOS		AÑO 1	AÑO 2
CTEDBHS3 ALMERIA	Gasto Energía sin rehabilitación	265,67	279,32
	Ahorro Relativo con la intervención	-46,95	-49,36
	Costes totales	2395,26	50,00

	Flujo de gasto	-2707,88	-0,64
	Acumulado	-2707,88	-2708,51
CTEDBHS3 BILBAO	Gasto Energía sin rehabilitación	299,18	314,55
	Ahorro Relativo con la intervención	-53,15	-55,89
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-2747,59	5,89
	Acumulado	-2747,59	-2741,71
CTEDBHS3 CORUÑA	Gasto Energía sin rehabilitación	218,82	230,07
	Ahorro Relativo con la intervención	-43,34	-45,57
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-2657,43	-4,43
	Acumulado	-2657,43	-2661,86
CTEDBHS3 SORIA	Gasto Energía sin rehabilitación	552,22	580,60
	Ahorro Relativo con la intervención	-123,67	-130,03
	Costes totales	2395,26	50,00
	Flujo de gasto	-3071,15	80,03
	Acumulado	-3071,15	-2991,12

Tabla 7.13. Estimación de ahorros respecto a la demanda energética y gastos en energía en los distintos escenarios contemplados

Como observamos, el coste de la energía no se considera en su totalidad, sino solo en la parte del ahorro obtenido con la optimización. Si se tuviera en cuenta el coste de la energía anual en operación no se podrían amortizar las medidas por si solas (el gasto en estos casos siempre superaría el ahorro). Es por eso que hemos centrado el análisis en el ahorro que supone la optimización y se han contemplado unos ciertos gastos de mantenimiento.

Los primeros datos que obtenemos corresponden al ahorro relativo de la aplicación de la optimización. En esta comparativa, llevada hasta el año 30 desde la intervención según establece el Reglamento Delegado 244/2012UE, observamos gráficamente en qué año aproximado se equilibran los gastos con los ahorros.

Fig. 7.32. Gráfica de amortización en el tiempo respecto al ahorro relativo y distintos escenarios y orientación.

Si comparamos por escenarios normativos, nos encontramos con que el gasto que supone la optimización es amortizable como medida individual en los escenarios previos al Código Técnico de la Edificación (NTE ISV 75 y PRE NTE ISV 75). Sin embargo, para escenarios a partir del CTE resulta amortizable solo a largo plazo.

La orientación del bloque tiene incidencia en la amortización de las medidas de optimización. Se amortiza antes para la orientación este-oeste que para la orientación norte-sur.

Fig. 7.33. Gráfica de amortización en el tiempo respecto al ahorro relativo y distintos zonas climáticas. CTE DB HS3.

En este primer análisis observamos que las medidas de optimización tienen un punto de amortización que va del medio plazo en los escenarios PRE NTE ISV 75 y NTE ISV 75 a no llegar a amortizarse en ciertas zonas climáticas en el escenario del CTE DB HS3. En la optimización los ahorros superan los gastos en la zona E1 (Soria), D3 (Madrid) y C2 (Barcelona) en 20, 26 y 29 años respectivamente.

Los datos que obtenemos referentes al Valor actual neto (VAN), aplicando una tasa de descuento del 5% y la tasa interna de retorno (TIR) apuntan en la misma dirección que estos primeros datos de ahorro relativo. La aplicación de una tasa de descuento de 5% es conservadora, respecto a la posible evolución de los precios, dentro de las opiniones de los expertos, pero a su vez, al considerar un escenario de amortización a 30 años, la incertidumbre aconseja contemplar un escenario conservador. En cualquier caso, el considerar una tasa de descuento de 4 o 4,5% aunque variaría el tiempo de amortización en las soluciones, no supone un salto cualitativo, es decir, las soluciones que se amortizan a medio plazo continuarían haciéndolo y las que lo hacen a largo plazo también. Las soluciones con una amortización en un horizonte temporal medio son las que se remontan a los escenarios previos al CTE (hasta el año 2006) en los periodos correspondientes a la situación pre-normativa y la situación correspondiente a la norma NTE ISV 75 y la amortización económica se hace más complicada para las zonas climáticas contempladas para el CTE DB HS3.

ESCENARIOS		
PRE NTE ISV 75 NORTE SUR	Amortización	10,67
	Ahorro Relativo	14.494,23 €
	TASA	5%
	TIR	9,37%
	VAN	2.430,60 €
PRE NTE ISV 75 ESTE OESTE	Amortización	10,64
	Ahorro Relativo	17.866,84 €
	TASA	5%
	TIR	11,21%
	VAN	3.781,92 €
NTE ISV 75 NORTE SUR	Amortización	10,64
	Ahorro Relativo	-14.544,58 €
	TASA	5%
	TIR	9,40%
	VAN	2.451,10 €
NTE ISV 75 ESTE OESTE	Amortización	8,90
	Ahorro Relativo	17.908,24 €
	TASA	5%
	TIR	11,23%
	VAN	3.798,83
CTEDBHS3 NORTE-SUR	Amortización	67,98
	Ahorro Relativo	5.343,64€
	TASA	5%
	TIR	1,47%
	VAN	-1.313,26
CTEDBHS3 ESTE OESTE	Amortización	38,63
	Ahorro Relativo	6.326,21
	TASA	5%
	TIR	0,32%
	VAN	-1.594,59
CTEDBHS3 SEVILLA	Amortización	-
	Ahorro Relativo	-3.563,65 €
	TASA	5%
	TIR	-
	VAN	-1.594,59 €
CTEDBHS3 BARCELONA	Amortización	-
	Ahorro Relativo	-4.486,56 €
	TASA	5%
	TIR	-
	VAN	-
CTEDBHS3 ALMERIA	Amortización	-
	Ahorro Relativo	-3.194,74 €
	TASA	5%
	TIR	-
	VAN	-2.076,03 €
CTEDBHS3 BILBAO	Amortización	-
	Ahorro Relativo	-3.616,94 €
	TASA	5%
	TIR	-
	VAN	-1.932,19 €
CTEDBHS3 CORUÑA	Amortización	-
	Ahorro Relativo	-2.949,42 €
	TASA	5%
	TIR	-
	VAN	-2.132,24 €
CTEDBHS3 SORIA	Amortización	21,60
	Ahorro Relativo	-8.415,67 €
	TASA	5%
	TIR	4,64
	VAN	-169,53

Tabla 7.14. Estimación de amortización de los gastos de la intervención de optimización en los distintos escenarios contemplados

Observamos que para los escenarios del CTE, la amortización en términos financieros no se produce y si lo hace es en un horizonte temporal lejano. No es la amortización de costes, por tanto, la que ha de motivar la intervención en estos casos, sino la mejora de calidad de aire interior.

8 CONCLUSIONES DE LA TESIS DOCTORAL

En el capítulo final se destacan los aspectos más relevantes resultantes de la investigación realizada y se detallan las futuras líneas de investigación tras la finalización de esta investigación.

A lo largo de los capítulos previos, siguiendo la metodología general, se ha desarrollado el análisis para contrastar la hipótesis inicial que se establece en esta tesis: **«Es posible mejorar de manera significativa las condiciones de calidad de aire interior en la edificación residencial existente en España y reducir la demanda energética asociada a los sistemas de acondicionamiento térmico y ventilación».**

Como conclusión general, se puede confirmar esta hipótesis gracias a la aplicación de la metodología general de la tesis doctoral, con matices que se explicarán a lo largo del capítulo. En él se exponen las conclusiones obtenidas siguiendo un orden de desarrollo basado en la investigación realizada. Así, en primer lugar se enumeran las conclusiones de los capítulos 4 a 7 de la tesis. A continuación, se exponen las conclusiones en cuanto a los objetivos particulares, finalizando con las conclusiones generales de la tesis doctoral y el cumplimiento del objetivo general de la misma.

8.1 CONCLUSIONES DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN

Del capítulo «Estado de la cuestión», como ya se ha apuntado anteriormente, se puede concluir:

- E.C.1.** La ventilación en edificación residencial es fundamental para la reducción de la demanda energética de la misma.
- E.C.2.** A su vez, la calidad del aire interior incide directamente sobre la salud y el confort de los usuarios, por lo que cualquier actuación orientada a reducir la demanda energética, con repercusión en los aspectos relacionados con la ventilación residencial ha de ser analizado en ambos términos: Repercusión energética y repercusión en calidad de aire interior.
- E.C.3.** Las concentraciones de los contaminantes interiores son un indicador fiable de la calidad del aire interior, pero han de seleccionarse los más representativos para analizar la calidad del aire interior. En el caso que nos ocupa, de edificación residencial, los más adecuados son:
- En términos de ocupación, y por tanto, más relacionados con el confort, es pertinente estudiar la concentración del CO₂. También este parámetro permite obtener datos relevantes en cuanto a caudal de renovación de aire al ser un gas trazador.
 - En términos de contaminantes de fuentes de acabados interiores, más relacionados con la salud, es pertinente analizar el formaldehído, muy presente como emisión de mobiliario, y algunos materiales de la construcción de acabados interiores, además de los compuestos orgánicos volátiles totales, que son un indicador muy amplio, pero que empieza a tener lugar en la normativa en cuanto a limitaciones de contaminantes en espacios residenciales.
- E.C.4.** Los aspectos que más determinan tanto la calidad del aire interior como el consumo energético asociado son:
- La infiltración de la envolvente, sobre todo las carpinterías exteriores.
 - El sistema de ventilación con que se realice la renovación del aire interior, en su mayoría:
 - Natural, dependiendo únicamente de las fuerzas naturales para realizar la renovación del aire interior.
 - Mecánica con extracción, formando diferencia de presión negativa en el interior.
 - Equilibrada, ecualizando los caudales de admisión y extracción.
 - El caudal de renovación que se prescriba para ventilar el espacio.
- E.C.5.** Las normativas que han tenido incidencia en España en cuanto a la ventilación en edificación residencial española (NTE ISV 75 y CTE DB HS3) tienen un nivel de exigencia en cuanto a la calidad del aire interior que no contempla explícitamente las concentraciones de contaminantes

interiores. Estas situaciones normativas pueden servir como base para un análisis de las condiciones de calidad de aire interior y la demanda energética asociada.

8.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE CARACTERIZACIÓN

Del capítulo de caracterización de la edificación residencial española, en cuanto a aspectos relevantes para la calidad del aire interior y la demanda energética asociada a la ventilación se pueden obtener las siguientes conclusiones:

8.2.1 CONCLUSIONES SOBRE LOS ESCENARIOS A CONSIDERAR

Tradicionalmente, en la investigación, la edificación residencial existente en bloque en España se clasifica en 5 periodos principales según la edad y los cambios constructivos y sociales:

1. Periodo desde 1900 a 1939; edificación superviviente a la guerra.
2. Periodo desde 1939 a 1960; periodo de recuperación de los medios y materiales de construcción, con gran profusión pero baja calidad.
3. Periodo desde 1960 a 1979; periodo de consolidación de medios constructivos modernos. Grandes desarrollos urbanísticos alrededor de las grandes ciudades con elevada densidad de viviendas y habitantes.
4. Periodo de 1979 al año 2005; periodo en el que se introducen las primeras normativas para garantizar la calidad de la construcción y las características térmicas de la envolvente. Periodo más numeroso en número total de viviendas existentes.
5. Periodo de 2005 a la actualidad; periodo en el que se introduce un salto cualitativo en la construcción, coincidente con la introducción del CTE.

En la tesis, sin embargo, se ha aplicado la siguiente clasificación de la edificación residencial en bloque en España, según la situación normativa en lo referente a ventilación:

1. La situación previa a la introducción de las Normas Tecnológicas de la Edificación, en concreto la NTE ISV 75, considerando su aplicación efectiva a partir de 1979.
6. La situación posterior, entre la aparición de la NTE ISV 75 y el Código Técnico de la Edificación (CTE) en su documento básico referente a salubridad y ventilación (CTE DB HS3).
7. La situación correspondiente a la edificación realizada tras la implementación del CTE.

Normativa	Periodo de referencia	Número de viviendas	Porcentaje
Situación previa a la NTE ISV 75	1951-1979	7.487.167	29,59%
NTE ISV 75	1980-2005	10.650.825	42,10%
CTE DB HS3	2006-2015	2.513.924	9,94%

Tabla 8.1. Relación entre construcción de la edificación residencial en España y normativa vigente en cuanto a ventilación. Elaborado por el autor con datos de INE y MVIV. (2015)

Estos periodos se han seleccionado como los representativos en cuanto a elementos constructivos que determinan el nivel de ventilación y calidad de aire interior. En ellos se ha caracterizado la edificación residencial más representativa, los sistemas de ventilación y sistemas constructivos con

incidencia en la ventilación, y la infiltración de aire. Asimismo, sirven de base para el análisis realizado. También se ha tomado como referencia la norma estándar europea EN 15251:2007 que categoriza la ventilación y calidad ambiental conforme al cálculo de la eficiencia energética, y servirá de contraste a las soluciones existentes.

	Norma de obligado cumplimiento	Admisión de aire	Extracción de aire	Cálculo y dimensionamiento	Nivel máximo de contaminantes	Caudal mínimo de ventilación	Espacio multizona
PRE NTE ISV 75	No	Ventanas (Ventilación + infiltración)	Ventanas	Ninguno	No	No	No
NTE ISV 75	No	Ventanas (Ventilación + infiltración)	Tiro Pasivo (T.P.) o mecánico (T.M.)	Aproximado. Por superficie y estancias y extracción	No	No	Si
CTE DB HS3	Si	Ventanas+a berturas (se reduce infiltración)	T.P. T.M. o híbrido. Caudal mínimo de extracción	Detallado. Por estancias y ocupantes. Caudal equilibrado	No	Si	Si
EN 15251	Si*	Ventanas+a berturas (se reduce infiltración)	T.P. T.M. o híbrido. Caudal mínimo de extracción	Detallado. Por superficie y ocupantes. Infiltración	Si, por niveles de calidad ambiental	Si, por niveles de calidad ambiental	Si

Tabla 8.2. Comparativa de normativas seleccionadas como representativas para el establecimiento de los escenarios de estudio y análisis.

Conforme a estos escenarios normativos se han establecido las características técnicas y constructivas conforme a las cuales se realizará el análisis.

8.2.2 CONCLUSIONES SOBRE EL BLOQUE DE REFERENCIA

Al mismo tiempo, como conclusión de este capítulo, se han establecido las características constructivas y tipológicas del bloque de viviendas medio en España, para tomarlo como referencia para el análisis numérico mediante software de simulación como experimental de toma de datos en edificio demostrador que cumpla con los requisitos de bloque de viviendas medio y representativo. Para el escenario del periodo correspondiente al CTE (CTE DB HS3) se han establecido zonas climáticas y ciudades de referencia, con el objetivo de cubrir todas las severidades (invernales y estivales) que establece la norma. Estas son:

Almería	Zona climática A4
Sevilla	Zona climática B4
Barcelona	Zona climática C2
Bilbao	Zona climática C1
Coruña	Zona climática C1
Madrid	Zona climática D3
Soria	Zona climática E1

En cuanto a las características tipológicas y constructivas, se establecen las siguientes características:

Periodo de construcción del bloque

En cuanto al periodo de construcción, la edificación media estaría situada entre el primer y segundo periodo normativo, (situación previa a la NTE y durante la vigencia de la NTE). De entre este periodo,

es de especial importancia el número de edificios de viviendas que se produjeron como respuesta a la migración a las grandes ciudades que dio lugar a desarrollos urbanísticos de vivienda social.

Características tipológicas y configuración constructiva

- C.C.1.** La configuración media en cuanto a número de plantas de bloque es **de 5 a 8 alturas**.
- C.C.2.** La superficie media de la vivienda es de **entre 60 m² y 90 m²**.
- C.C.3.** **El número de estancias de la vivienda media, incluyendo el salón y la cocina, es 5.**
- C.C.4.** Elementos de fachada: la construcción media corresponde a la fachada de **doble hoja de fábrica de ladrillo y cámara de aire, sin aislamiento térmico entre capas**. La infiltración por fachada es elevada, debido a la ocurrencia frecuente de grietas y fisuras en el llagueado de la capa de ladrillo y la falta de hermeticidad entre las carpinterías y la fachada.
- C.C.5.** Carpinterías: En cuanto a la configuración de las carpinterías y los huecos, por la edad del parque edificatorio, **la carpintería más frecuente**, al haberse sustituido muchas de las originales de acero, es la **de aluminio sin rotura de puente térmico. Corredera, y con una sola hoja**. En cuanto al vidrio, se considera la solución más extendida la de una lámina de vidrio de 4, 5, o 6 mm, generalizándose el empleo del doble vidrio en la década de los 90, con composiciones tipo 4/6/4 mm de espesor con cámara de aire.
- C.C.6.** Los sistemas de ventilación medios son:
 - a. Admisión de aire por ventanas
 - b. Extracción de aire por ventanas
 - c. Introducción de conductos verticales de extracción, tipo tiro natural, a partir del año 1975. De dimensionado según NTE ISV 75 (200x200 mm en tiros de hasta 7 alturas, que sirven a dos viviendas por planta, en una de las estancias de extracción, es decir, máximo 16 salidas por conducto vertical).
 - d. Infiltración de carpinterías elevada, (permeabilidad al aire a 100 Pa de entre 200 y 130 m³/h•m²).

8.2.3 CONCLUSIONES SOBRE EL EDIFICIO DEMOSTRADOR

Se ha contado con la posibilidad de realizar mediciones de calidad del aire, consumo energético y comportamiento de ocupantes en un bloque de viviendas que cumple con los requisitos marcados en el apartado anterior, como parte de la investigación realizada por el autor dentro del proyecto SIREIN+¹⁴⁹. Se ha escogido un edificio dentro del ARI (Área de Rehabilitación Integral) de Ciudad de los Ángeles, distrito de Villaverde, Madrid. Este distrito fue construido entre finales de los años 50 y principio de los años 60, cuenta con unas 8.000 viviendas en 485 edificios de similar tipología a la descrita en el párrafo anterior y tiene una población aproximada de 24.250 habitantes. El barrio y el edificio son de protección pública, y el poder adquisitivo de los habitantes es correspondiente a clase media baja. Formó parte de las intervenciones urbanísticas de finales de los 50 y principios de los años 60 como respuesta a la migración hacia las grandes urbes y el abandono del ámbito rural. En este edificio se ha realizado una intervención de rehabilitación de envolvente mediante insuflado de borra de lana de vidrio. Se han realizado los estudios previos, toma de datos, simulaciones, además de la monitorización previa y posterior a la intervención en este edificio.

¹⁴⁹ "SIREIN+: Sistema Integral de Rehabilitación Energética" (IPT-2011-1980-920000). Entidad financiadora: MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN dentro del programa INNPACTO 2011. Entidades participantes: SAINT GOBAIN, UPM, TECNALIA, EMVS, R7 CONSULTORES, KOMMERLING, ENERES-Fernández Molina.

Fig. 8.1. Vista sur del edificio demostrador

8.3 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE ANÁLISIS

Dentro del capítulo de análisis se pueden establecer los siguientes apartados en cuanto a conclusiones:

8.3.1 CONCLUSIONES DE VALIDACIÓN DE MODELOS CON DATOS DE MONITORIZACIÓN

La primera parte del capítulo de análisis se ha dedicado a validar el proceso de modelizado, contrastando los mismos con la medición en tres viviendas del edificio demostrador, que se ha tomado como referencia para realizar el modelizado. Para ello se ha desarrollado un modelo, aproximándolo tanto en sus características constructivas (permeabilidad, ventanas, ocupantes, fuentes de emisión, superficies, volúmenes...) al edificio real y se han realizado las simulaciones con datos climáticos tomados in situ y obtenidos de bases de datos climáticos. Se han comprobado los siguientes aspectos, importantes para la comprobación, de cara a la tesis:

- Amplitud de concentraciones de CO₂ en el salón.
- Tiempo en cada categoría de calidad de aire según norma EN 15251:2007 en cuanto a concentración de CO₂ (huella de calidad ambiental).

Como resultado de la comparación entre el escenario de simulación y las mediciones en los salones obtenemos las siguientes conclusiones:

1. En la vivienda con las características más similares al escenario de simulación se ha conseguido un 77,35% de coincidencia en porcentaje de tiempo en los distintos niveles y una precisión en la concentración máxima dentro de los periodos del 96,24%.

Fig.8.2.. Huellas ambientales basadas en medidas de CO₂. Diferencia entre modelo y medición en 7º izquierda.

2. Las mayores diferencias provienen de la diferencia entre la simulación del comportamiento del usuario y la conducta real del individuo.
3. En las otras viviendas las similitudes eran menores, debido a que durante el tiempo de medición las condiciones interiores de temperatura y humedad de consigna que establece cada usuario eran muy diferentes; la presencia y el número de ocupantes en el salón variaba entre las viviendas; y el régimen de ventilación que se realizó en la estancia era distinto.

La conclusión más importante de este apartado es que se valida el análisis utilizando como herramienta **el software CONTAM. Lo que indica que es adecuado para conducir el resto de las simulaciones con una cierta confianza en la fiabilidad de los resultados.**

8.3.2 CONCLUSIONES EN CUANTO A CALIDAD DEL AIRE INTERIOR

En cuanto a la calidad del aire interior utilizando la simulación mediante el software CONTAM se han obtenido las siguientes conclusiones:

- C.A.1.** El escenario previo a la normativa (PRE NTE ISV 75) es el que presenta una menor capacidad de adaptación al número de ocupantes, siendo el que presenta mayor porcentaje de tiempo por encima del umbral establecido de 1200 ppm de CO₂.
- C.A.2.** La huella de calidad ambiental empeora conforme aumenta el número de ocupantes. Para el escenario de NTE ISV 75 y CTE DB HS3, el tiempo de superación del umbral de 1200 ppm de CO₂ es similar para 4 ocupantes, y empeora para 5 y 6 en los dos casos. Las concentraciones máximas relativas son mayores en el escenario de NTE ISV 75.
- C.A.3.** La inclusión de los datos de viento en la simulación influye de manera significativa en el análisis. Por tanto es necesario variar la simulación conforme el edificio se encuentre expuesto o no a presión de viento considerable.
- C.A.4.** El único escenario que garantiza una huella de calidad del aire óptima para ocupación máxima (6 personas) es el que corresponde a la calidad I de la norma UNE EN 15251.
- C.A.5.** Considerando la media de concentración de CO₂, los únicos escenarios que superan los 900 ppm, que se proponen como límite en la normativa revisada del CTE, son el PRE NTE ISV 75 y la calidad III de UNE EN 15251.
- C.A.6.** La zona climática influye en el tiempo de superación de umbrales, superándose en mayor medida el umbral de 1200 ppm en las zonas E y D, de mayor severidad invernal. Las zonas A B y C presentan condiciones similares.

C.A.7. La edad del aire disminuye en el escenario del CTE DB HS3 conforme se aumentan los ocupantes, pues aumenta el caudal de renovación.

C.A.8. La concentración máxima de los otros contaminantes (HCHO y TVOCs) se encuentra en dormitorios, donde la proporción de superficie de emisión es mayor con respecto al volumen.

8.3.3 CONCLUSIONES EN CUANTO A DEMANDA ENERGÉTICA

En cuanto a la demanda energética, se han realizado simulaciones de los mismos escenarios que en el apartado de calidad de aire, en un modelo realizado reproduciendo el edificio de referencia. Las variaciones entre escenarios se han limitado a la permeabilidad de la envolvente (ventanas e infiltración) y el caudal de renovación (sistema natural o mecánico). No se han variado las transmitancias ni las características físicas que afectan a ganancias por radiación. Se ha utilizado el software DesignBuilder con su módulo de cálculo de EnergyPlus. Se han obtenido las siguientes conclusiones:

D.E.1. Los escenarios que peor comportamiento presentan y mayor demanda tienen son los correspondientes a PRE NTE ISV 75, NTE ISV 75 y calidad I de UNE EN 15251. En el primero de los casos, se debe a la alta infiltración, que produce grandes pérdidas. En el segundo, a la falta de control del caudal de renovación de aire interior. En el caso de la calidad I de UNE EN 15251, se debe al elevado caudal de renovación, de media anual $1,57 \text{ h}^{-1}$.

Fig. 8.3. Energía primaria asociada al acondicionamiento térmico. 4 ocupantes ($\text{kWh/m}^2\cdot\text{a}$)

D.E.2. Existe una diferencia sustancial de demanda energética en el escenario CTE DB HS3 en función del número de ocupantes, debido al aumento de caudal de renovación según normativa (de $79,79 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ a $87,09 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{a}$ de 4 a 6 ocupantes).

D.E.3. Existen diferencias debidas a la orientación del bloque, pero independientes de la ventilación (la carga de infiltración y ventilación es la misma). Son debidas a la radiación solar incidente en las fachadas.

D.E.4. La demanda energética varía de manera sustancial respecto de las zonas climáticas en el escenario CTE DB HS3. Se puede extrapolar este resultado para el resto de los escenarios.

D.E.5. El porcentaje de demanda debida a la infiltración es de alrededor del 30% para los escenarios previos al CTE y sube con respecto al total en el CTE DB HS3 y UNE EN 15251. El porcentaje sube en zonas climáticas con inviernos suaves. La zona climática influye en la demanda energética asociada a la ventilación. Para las zonas climáticas con severidad invernal suave la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico es menor, pero el porcentaje sobre el total que representa la ventilación y la infiltración es mayor.

Fig. 8.4. Porcentaje de infiltración y ventilación sobre demanda energética (%) en energía primaria. 4 ocupantes.

D.E.6. El aprovechamiento del enfriamiento nocturno aumenta en la orientación Este-Oeste y a mayor caudal de renovación.

D.E.7. La zona climática influye en el caudal de renovación. Así, para zonas con climatología invernal severa, el caudal de renovación es menor. Lo mismo sucede para zonas con severidad climática de verano suave.

Fig. 8.5. Caudal medio anual de renovación de aire interior (h^{-1})

D.E.8. La proporción menor (óptima) entre caudal de renovación y demanda energética asociada a acondicionamiento térmico la encontramos en el escenario CTE DB HS3 para alta ocupación (6 ocupantes) y UNE EN 15251 en calidad I.

8.3.4 CONCLUSIONES EN CUANTO A COMPARACION INTEGRADA DE CALIDAD DE AIRE INTERIOR Y DEMANDA ENERGÉTICA

Uno de los aspectos con mayor relevancia en el desarrollo de esta tesis es el desarrollo de una metodología que permite evaluar conjuntamente de manera comparativa la eficiencia energética de la ventilación en una normativa y la calidad del aire en una escala cualitativa.

En el transcurso del análisis se ha llegado a esta aproximación, por un lado, mediante la obtención del porcentaje de tiempo de superación de umbrales y, por otro, el cálculo de la demanda energética asociada a acondicionamiento térmico y ventilación.

En el objeto de la tesis está el de analizar la edificación española existente, y en ese sentido se han establecido escenarios de comparación teórica sobre un modelo de referencia tomado como tipológicamente representativo. De la comparación de los distintos escenarios con respecto al número de ocupantes obtenemos, mediante la gráfica comparativa integrada, el siguiente resultado:

Los escenarios previos al Código Técnico de la Edificación (CTE DB HS3) se caracterizan por una mayor demanda asociada al acondicionamiento térmico por la ventilación y una calidad ambiental similar. En condiciones de poca ocupación (hasta 4 personas) el escenario NTE ISV 75 tiene una mejor calidad del aire, pero este dato es penalizado por la elevada demanda que supone (unos 40 kWh/m²·a más que la solución correspondiente al escenario del CTE DB HS3). El escenario PRE NTE ISV 75 es, según el estudio, realizado el que tiene un peor comportamiento tanto en calidad del aire como en demanda energética.

La alta ocupación penaliza para todos los escenarios tanto la calidad del aire como la demanda energética pero relativamente la diferencia es menor en el escenario del CTE DB HS3.

Fig.8.6. Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa y número de ocupantes.
Todos los escenarios de edificación residencial existente.

Los escenarios de distintas categorías de calidad de la norma europea EN 15251 obtienen los siguientes resultados:

Fig. 8.7 Relación entre demanda energética y calidad del aire por normativa, categoría de calidad y número de ocupantes UNE EN 15251

En cuanto a demanda energética, la categoría de calidad I resulta en una demanda elevada. Sin embargo, también obtiene la mejor calidad del aire, obteniéndose para 4 y 5 ocupantes 0% de tiempo de superación del umbral de 1200 ppm de CO₂.

La categoría de calidad II sería equiparable con el escenario correspondiente con el CTE DB HS3 en resultados, salvo en demanda energética, siendo ligeramente superior la demanda para el primero de ambos escenarios. La categoría de calidad III obtiene una demanda de energía reducida, pero la calidad del aire se ve reducida en exceso.

Como conclusión de este apartado, establecemos el objetivo de conseguir una calidad de aire similar a la categoría de calidad I y una demanda energética reducida, correspondiente a la categoría de calidad III de la UNE EN 15251.

8.3.5 CONCLUSIONES EN CUANTO A MEDICIÓN EXPERIMENTAL

La estrategia de toma de datos se ha desarrollado en dos vertientes: la de obtención de datos puntuales en un corto periodo de medición para establecer tomas de muestras en distintas viviendas construidas en distintos periodos, como muestra del parque edificatorio residencial español. Bajo estas líneas se exponen las mediciones realizadas. En naranja se marcan las celdas que superan los umbrales establecidos y en verde las que no los superan. En el caso de CO₂ el umbral es la media que se baraja introducir en la normativa española.

NORMATIVA	REHABILITADO	OCUPADO	TVOC MEDIA ACOTADA (ppm)	CO MEDIA ACOTADA (ppm)	HCHO MEDIA ACOTADA (ppm)	CO ₂ MEDIA ACOTADA (ppm)
NTE ISV 75 . Año 1980	SI	SI	0,23	0,83	0,107	1111
PRE NTE ISV 75. Año 1960	NO	SI	0,41	1,04	0,061	1340
PRE NTE ISV 75 . Año 1960	NO	NO	0,2	0,41	0,039	476
NTE ISV 75 Año 1978	NO	SI	0,43	1,42	0,104	1214
NTE ISV 75 2003	NO	SI	0,25	0,79	0,124	1118
NTE ISV 75 2003	NO	SI	0,21	0,69	0,019	1026
NTE ISV 75 2003	NO	SI	0,26	0,64	0,106	675
NTE ISV 75 2003	NO	SI	0,18	0,58	0,035	1120
NTE ISV 75 2003	NO	NO	0,22	0,4	0,02	415
CTE DB HS3 2011	NO	SI	0,19	0,78	0,107	1111

Tabla 8.3. Mediciones medias acotadas de los distintos contaminantes en las muestras de medición.

De las mediciones de concentración de los 4 compuestos caracterizados se puede concluir:

M.E.1. Se superan los umbrales en todas las muestras de las viviendas, de los marcadores TVOC. Se superan los umbrales de formaldehído en el 50% de las muestras y la media de CO₂ se supera en el 70% de las viviendas muestreadas. Todos los umbrales se superan, salvo el monóxido de carbono (CO). Esto plantea la cuestión de si nuestras viviendas están bien acondicionadas y los niveles son demasiado exigentes, o si, por el contrario, debemos plantear en términos de exigencia estas recomendaciones y mejorar las condiciones de calidad del aire de las viviendas construidas.

M.E.2. Identificar las fuentes de contaminantes domésticos y minimizar los provenientes de los acabados interiores y mobiliario sería un trabajo deseable. El objetivo sería el establecer, como en otros países de nuestro entorno, limitaciones de emisión de contaminantes en los productos de construcción, especialmente los que corresponden a los acabados interiores.

M.E.3. La medición puntual de concentración de contaminantes y de CO₂ permite diagnosticar el funcionamiento de la ventilación y la calidad del aire de manera satisfactoria.

En cuanto a las mediciones realizadas en un periodo de medición más prolongado, las conclusiones obtenidas son:

M.E.4. La medición en un periodo prolongado permite evaluar la huella ambiental de la calidad del aire de la vivienda. Asimismo, la colocación de sensores de CO₂ permitiría identificar los periodos de no ocupación de cara a establecer horarios de uso optimizado

Fig. 8.8. Gráficos de huella de calidad de aire de las viviendas monitorizadas.

M.E.5. La diferencia entre distintos hábitos de distintos ocupantes supone variaciones de mucha importancia tanto en la calidad del aire interior como en la demanda energética asociada a la ventilación.

M.E.6. La medición continuada permite validar los modelos de simulación generados por el software CONTAM.

8.4 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO DE OPTIMIZACIÓN

El capítulo de optimización establece un estudio teórico de actuaciones en el edificio medio y vivienda tipo caracterizada y analizada con anterioridad, de cara a mejorar sustancialmente las condiciones de calidad del aire interior y reducir la demanda energética asociada a la ventilación y al acondicionamiento del aire.

A este estudio teórico se ha añadido además la aproximación teórica a una posible valoración económica del sistema y las actuaciones a realizar, y una previsión de amortización utilizando el método del coste óptimo, referido en el Reglamento Delegado 244/2012/UE, que desarrolla la EPBD.

Las conclusiones de este capítulo son:

8.4.1 CONCLUSIONES EN CUANTO A LA REDUCCIÓN DE DEMANDA ENERGÉTICA

En relación a la demanda energética obtenemos las siguientes conclusiones:

O.D.E.1. En todos los escenarios se reduce en porcentajes significativos la demanda energética asociada al acondicionamiento térmico del aire y a la ventilación, como se puede observar en la gráfica bajo estas líneas.

Fig. 8.9. Comparación de demanda con recuperación de calor (R.C.) y optimización de horario según ocupación (O.H.) – Aplicación a los distintos escenarios existente con 6 ocupantes y orientación norte-sur.

O.D.E.2. En cuanto a orientación del bloque, las diferencias se deben en gran medida a la radiación incidente y no influye de manera sustancial en la optimización, en ninguno de los escenarios contemplados.

O.D.E.3. En cuanto a la zona climática, contemplada en el escenario CTE DB HS3, se comprueba que la influencia es grande, no tanto en cuanto a porcentaje de reducción de demanda, sino en términos absolutos de reducción en kWh/m²·a, que penaliza las zonas climáticas con inviernos más suaves, donde la reducción es menor. Para las zonas climáticas con severidad invernal elevada (D y E) la solución reduce respectivamente de 14,50% a 28% y de 17,85% a 30,45% según ocupación.

O.D.E.4. Claramente los escenarios en los que la optimización obtiene una reducción de demanda mayor son las situaciones anteriores al CTE, escenarios PRE NTE ISV 75 y NTE ISV 75, con porcentajes de hasta el 40%.

8.4.2 CONCLUSIONES EN CUANTO A LA CALIDAD DEL AIRE

Una vez examinados los resultados en cuanto a demanda energética se comprueba la efectividad en cuanto a mejora de la calidad del aire interior. En todos los escenarios, la mejoría es sustancial, manteniéndose para todos ellos la concentración de CO₂ por debajo del umbral de 1200 ppm y obteniendo la huella ambiental conforme a lo previsto en la norma UNE EN 15251:2008 como se observa en las gráficas de la figura 8.10 para 4, 5 y 6 ocupantes bajo estas líneas.

Fig. 8.10. Huellas de calidad de escenario optimizado por número de ocupantes. Madrid.

Para el resto de contaminantes, pese a que los periodos de no ocupación hacen aumentar la concentración de formaldehído y compuestos orgánicos volátiles, debido a la reducción de los caudales de renovación a $0,2 \text{ h}^{-1}$, se comprueban dos aspectos:

1. La concentración durante los periodos de ocupación es menor que en los escenarios previos a la optimización.
2. Las concentraciones no superan en la teoría los umbrales recomendados en las guías de calidad ambiental.

8.4.3 CONCLUSIONES EN CUANTO A LA AMORTIZACIÓN ECONÓMICA

El apartado de amortización económica realiza el análisis desde el punto de vista que se ha establecido en la Unión Europea para seleccionar las actuaciones de rehabilitación energética más viables basándose en la comparación de los escenarios. Aplicando la metodología descrita detalladamente en el capítulo 7 al sistema de optimización definido y a la valoración realizada, se obtienen las siguientes conclusiones:

- O.A.E.1.** La optimización en términos de amortización económica es viable para los escenarios previos a la implantación del CTE (escenarios PRE NTE ISV 75 y NTE ISV 75). Para los escenarios del CTE DB HS3 la amortización se desplaza mucho en el tiempo hasta más allá de los 20 años.
- O.A.E.2.** Para las zonas climáticas de severidad invernal elevada dentro del escenario de CTE DB HS3, la amortización es, aunque tardía, posible, pero en las zonas climáticas de severidad invernal más suave (A, B y C) la amortización en términos de ahorro no es viable.

En resumen, existe un amplio espectro de edificación residencial (sobre todo el previo al Código Técnico) en el cual la implantación de la estrategia de optimización es amortizable en cuanto a ahorro relativo. En cuanto al resto de parámetros (reducción de demanda energética y calidad del aire) mejoran sustancialmente las situaciones previas. En términos de demanda energética, sin embargo, las zonas climáticas con invierno suave disminuyen la demanda en términos absolutos en valores bajos, por lo que la utilización del sistema es dudosa, pues un rendimiento menor del sistema podría resultar contraproducente en energía primaria.

8.5 CONCLUSIONES PARTICULARES.

Como parte de las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la tesis en los apartados relacionados con los objetivos particulares se puede concluir lo siguiente:

C.P.1. Se ha cumplido el objetivo de caracterizar y analizar parte de la edificación residencial española, en los aspectos que condicionan la calidad del aire interior y la demanda energética asociada a los sistemas de ventilación más representativos en la edificación residencial existente. Esta caracterización se ha producido tanto desde el punto de vista de simulación numérica, como con la toma de datos experimental.

Fig. 8.11. Dispersión de resultados de los distintos contaminantes analizados en las muestras tomadas.

C.P.2. Se ha cumplido el objetivo de **definir y aplicar una estrategia de optimización basada en los análisis y observaciones realizadas conciliando los objetivos contrapuestos de calidad de aire interior y de demanda energética asociada** aplicándola a las distintas normativas en el contexto conforme a las cuales se ha desarrollado la construcción de viviendas en España desde 1960.

Fig. 8.12. Análisis comparado del escenario aplicando la optimización definida frente a los distintos escenarios definidos en la tesis doctoral en función de la calidad del aire interior y la demanda energética asociada.

C.P.3. Se ha analizado para las distintas zonas climáticas definidas en el Código Técnico de la Edificación la aplicación de las medidas de **optimización en términos de calidad del aire y de demanda energética**. La conclusión de este apartado es que **la aplicación de una estrategia de optimización** basada en la introducción de un sistema local de extracción e impulsión con recuperación de calor y la optimización de su uso respecto a la ocupación **consigue mejorar de manera significativa ambos aspectos a conciliar**.

Fig. 8.13. Análisis comparado del escenario aplicando la optimización definida frente a las distintas zonas climáticas existentes en el CTE DB HE1 en función de la calidad del aire interior y la demanda energética asociada.

C.P.4. Se ha valorado la aplicación de las medidas de **optimización en términos de calidad del aire y demanda energética y también en términos de coste, mediante la aplicación de la metodología de coste óptimo.** La conclusión de este apartado es que aun resultando significativa la aplicación de la optimización en términos de calidad del aire interior y de reducción de la demanda energética, la actuación resulta rentable únicamente para los edificios de viviendas construidos con anterioridad al CTE. **Esto quiere decir que la actuación sería rentable a medio plazo para alrededor del 70% de los edificios de vivienda en bloque existentes, cuya construcción se ha realizado conforme a la normativa NTE ISV 75 o en la situación previa a esta normativa.**

Fig. 8.14. Análisis comparado de amortización de las medidas de optimización aplicándolas a los distintos escenarios normativos que se han dado en la construcción de viviendas en España.

8.6 CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS DOCTORAL. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

La hipótesis de la tesis establece: «Es posible mejorar de manera significativa las condiciones de calidad de aire interior en la edificación residencial existente en España y reducir la demanda energética asociada a los sistemas de acondicionamiento térmico y de ventilación».

En el desarrollo de la investigación realizada se ha perseguido el objetivo de **establecer una metodología de caracterización y de optimización de las necesidades de ventilación para los espacios residenciales existentes en España que aúne el doble objetivo de garantizar la calidad ambiental y reducir la demanda energética de los mismos.**

Para tal fin se ha establecido una metodología de investigación basada en:

- La caracterización y clasificación de la edificación residencial española, conforme a los aspectos con repercusión en lo referente a la calidad del aire interior y a la demanda energética asociada a la ventilación y acondicionamiento térmico del aire de renovación.
- El análisis basados en medios de simulación informática y de observación experimental con medición de las condiciones de calidad del aire y la demanda energética asociada.
- El establecimiento de una estrategia de optimización orientada a mejorar la calidad del aire interior y reducir significativamente la demanda energética asociada a la ventilación.
- Efectuar una valoración y un análisis de los resultados que permitan evaluar de manera conjunta la calidad del aire interior de los escenarios establecidos y la demanda energética asociada a la ventilación en ellos.
- Valorar económicamente la posible amortización económica de la inversión en establecer las medidas de optimización en una vivienda de referencia.

Como conclusión general, se ha establecido satisfactoriamente una metodología para caracterizar y optimizar las necesidades de ventilación en la edificación residencial existente en España, desde el punto de vista de la calidad del aire y de la demanda energética asociada.

Fig. 8.15. Metodología validada en la tesis doctoral.

De este objetivo, se destaca como resultado la gráfica relacional entre los dos vectores (calidad de aire y demanda energética) que se ha realizado para los distintos escenarios contemplados, pero que puede ser extensible al resto de tipologías y marcos normativos existentes en el ámbito de la edificación.

Fig. 8.16. Gráfica de relación entre calidad del aire y demanda energética para los distintos escenarios definidos en la tesis doctoral (construcción y normativa referente a ventilación en España) y el número de ocupantes en la vivienda.

La estrategia de optimización de la ventilación definida, se ha desarrollado conforme a distintos escenarios, basados en las características de las viviendas existentes y las normativas que se han ido sucediendo en la construcción en lo referente a ventilación en viviendas.

Esta estrategia consta de dos actuaciones:

1. **La instalación de un sistema de extracción mecánica con recuperación de calor en el baño de la vivienda.** Este sistema se convertirá al tiempo en extractor y distribuidor de aire al interior de la vivienda. Esta medida pretende reducir la demanda energética asociada con la renovación de aire con caudal elevado, correspondiente a la categoría de calidad I.
2. **La racionalización del caudal de renovación.** Se pretende optimizar la utilización de los medios mecánicos de extracción, manteniendo apagado el sistema en periodos de no ocupación y manteniendo en estos una ventilación de fondo por infiltración y tiro pasivo.

De la investigación realizada, y de los resultados y del análisis realizado se confirma la hipótesis inicial en los siguientes supuestos:

- Para la edificación construida previamente a la primera normativa (1980) sobre medios de ventilación en España, se pueden mejorar las condiciones de calidad de aire interior, reducir la demanda energética asociada y amortizar la intervención de optimización de los sistemas de ventilación, definidas en el desarrollo de la investigación.

- Para la edificación construida desde el año 1980 al año 2005, de vigencia de la NTE ISV 75 (guía normativa en aspectos de ventilación en edificación residencial) se consiguen resultados similares, tanto mejorando la calidad de aire interior como reduciendo la demanda energética asociada. También en este supuesto se consigue un escenario de optimización amortizable económicamente según la metodología de coste óptimo.
- Para la edificación realizada con posterioridad al año 2006, (en aplicación del Código Técnico de la Edificación) se cumplen igualmente la mejora de las condiciones interiores de calidad de aire interior y la reducción de la demanda energética asociada. En este caso, la amortización de las medidas de optimización no se consiguen salvo en zonas climáticas con severidad invernal elevada.

8.7 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Al tratarse de una temática en continua evolución y estar en estos momentos en la circunstancia previa a la rehabilitación profunda del parque edificatorio en España y en Europa, se hace necesario continuar con las líneas de investigación iniciadas y abrir otras que se apuntan como pertinentes. Estas son:

1. Continuar con la tarea de caracterizar el parque de viviendas en cuanto a ventilación, calidad del aire y demanda energética.
2. Poner en práctica la experimentación de la optimización definida y contrastar con el análisis realizado.
3. Continuar con la difusión e investigación de los resultados de la tesis.
4. Ampliar el espectro de tipo de edificación y de los sistemas de ventilación.
5. Continuar con la labor de investigación y promoción de proyectos de investigación orientados a mejorar la calidad de aire interior y reducir la demanda energética y emisiones de CO₂ a la atmósfera producidas por el sector de la edificación.

8.7.1 DIFUSIÓN DE INVESTIGACIÓN

Como difusión de la investigación realizada, destacaré los siguientes méritos:

Papers, y participaciones en conferencias nacionales e internacionales

1. **36th AIVC (Air Ventilation and Infiltration Center) congress. Madrid, septiembre 2015**
"Effective ventilation in high performance buildings"
Evaluation of ventilation and IAQ parameters measured in social housing in Madrid.
Autores: Sergio Rodríguez Trejo, Consuelo Acha Román, Sergio Vega Sánchez,
Conference Proceedings ISBN : 2-930471-45-X EAN: 9782930471457
2. **Congreso Internacional sobre Investigación y Tecnología Arquitectónicas.11-13 junio 2014**
Título de comunicación en congreso: "Sistemas de recuperación de calor y depuración pasiva de aire en el entorno residencial. Mejora de la calidad ambiental en la edificación."
Autores: Sergio Rodríguez Trejo, Julia Ayuso, Sergio Vega Sánchez, Consuelo Acha Román
Comunicación publicada en el II Congreso Internacional sobre Investigación y Tecnología Arquitectónicas.11-13 junio 2014
3. **II Congreso EECN, Edificios Energía Casi Nula. Mayo 2014**

Libro de Comunicaciones del II Congreso EECN, Edificios Energía Casi Nula. Mayo 2014. Libro de Comunicaciones, ISBN: AE-2014-14002976

Título de comunicaciones en congreso:

“Reducción de demanda energética asociada a cargas de ventilación mediante sistemas de pre tratamiento de aire y mejora de la calidad ambiental en el sector residencial”

Autores: Sergio Rodríguez Trejo, Belén Hernández Fenol, Sergio Vega Sánchez

“Edificios de ECN mediante el sistema combinado de inyección en cámara y solución de puentes térmicos. Demostrador a escala real: edificio de viviendas”

Autores: Sergio Rodríguez Trejo, Belén Hernández Fenol, Cristóbal Contreras Pedraza, Sergio Vega Sánchez,

Artículos en revistas indexadas.

1. " Energy efficiency evaluation of zero energy houses"

Autores: Edwin Rodriguez-Ubiñas, Sergio Rodriguez, Karsten Voss, Marija S. Todorovic,

Energy and Buildings, Volume 83, November 2014, Pages 23-35

ISSN 0378-7788, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.019>.

(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814005015>)

9 BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

9.1 NORMATIVAS

- AEN/CTN 100 Climatización, 2009. UNE-EN-15665. Ventilación de edificios. Determinación de los criterios de rendimiento para los sistemas de ventilación residencial. Norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 15665:2009.
- AEN/CTN 100, C., 2008. UNE-EN 15251:2008 Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido.p.46. Establecimiento de huella de calidad ambiental.
- AENOR, 2002.UNE-EN ISO 7726:2002 “Ergonomía de los ambientes Térmicos. Instrumentos de Medida de las Magnitudes Físicas”. Anexo F, Medición de Temperatura Superficial (pag.55).
- AENOR. Puertas y ventanas. Permeabilidad al aire. Clasificación. UNE EN 12207. Madrid. 2000.
- AENOR. Puertas y ventanas. Permeabilidad al aire. Clasificación. UNE EN 85208. Madrid. 1981.
- AENOR, 2006. Norma UNE EN ISO 7730:2006 Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica de la interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local. ASHRAE, 2009 ASHRAE Handbook: Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Available at:
<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-34248378404&partnerID=tZOtx3y1>.
- Artículos 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 modificados por la disposición final undécima de la Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbana (B.O.E. 27 junio 2013).
- Directiva de eficiencia energética (2012/27/EU)
- Directive 2002/91/Ec Of The European Parliament And Of The Council of 16 December 2002 on the Energy Performance of Buildings. Official Journal of the European Communities, 4.1.2003, pp L1/65 - L1/71.
- ISO 8996:2004. Ergonomics. Determination of metabolic heat production. International Standards Organization.
- Ley 6/1998, de 13 de abril, sobre régimen del suelo y valoraciones, Publicado en BOE núm. 89 de 14 de abril de 1998

- Norma Básica de la edificación“NBE-CT-79” sobre Condiciones Térmicas de los Edificios R.D. 2429/1979, de 6-jul, de la Presidencia del Gobierno B.O.E.: 22-OCT-79
- Parlamento Europeo, 2010. DIRECTIVA 2010/31/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de mayo de 2010 relativa a la eficiencia energética de los edificios. Diario Oficial de la Unión Europea, pp.13–35.
- Parliament, E., 2012. COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost- optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements”. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:081:0018:0036:EN:PDF> , pp.18–36.
- REAL DECRETO 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. Código técnico de la Edificación, Documento básico HE ahorro de energía, 2013, pp.1–70. Available at: <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/>.
- R.D.238/2013. B.O.E., 2013. Reglamento de Instalaciones Térmicas en la Edificación. RITE. R.D.238/2013 que modifica el R.D.1027/2007. , pp.1–15.
- UNE EN 15242:2007. Ventilación en edificios. Métodos de cálculo para la determinación de las tasas de los caudales de aire en edificios, incluyendo la infiltración.
- UNE-CEN/TR 15615:2012 IN Explicación de la relación general entre diversas normas europeas y la Directiva relativa a la eficiencia energética de los edificios (EPBD). Documento paraguas.
- UNE 28533:1985. Atmósfera normal.

9.2 TESIS DOCTORALES

- Arranz, B., 2013. *Tesis doctoral: “Optimización de la composición del hueco de fachada en materia de eficiencia energética. Propuesta de indicador como herramienta para el análisis integral del elemento acristalado”*, ETS de Arquitectura. Universidad politécnica de Madrid.
- Azpilicueta, E. 2004. *Tesis doctoral:” La construcción de la arquitectura de postguerra en España (1939-1962)”*. Tesis doctoral. ETS de Arquitectura. Universidad politécnica de Madrid.

- Järnström, H., 2007. *Tesis doctoral: "Reference values for building material emissions and indoor air quality in residential buildings"*. Espoo 2007. VTT publications 672. 73 p. + app. 63 p.
- Ros Garcia, Juan ,2004. *Tesis doctoral: "Origen e influencia constructiva del sistema de muro de doble hoja en la historia y composición de obras de fabrica de cerramientos en la arquitectura contemporánea residencial madrileña entre los años 1910 a 1958"*. ETS de arquitectura. Universidad politécnica de Madrid.
- Acha Román, C.A, 2005. *Tesis doctoral: "Estudio experimental de las condiciones de confort relacionadas con parámetros higrotérmicos y calidad del aire"*. Tesis doctoral. ETS de arquitectura. Universidad politécnica de Madrid.
- Giancola, E., 2010. *Tesis doctoral: "El comportamiento energético de una fachada ventilada de juntas abiertas."* Universidad politécnica de Madrid.
- Tejero González, A., 2011 *Tesis doctoral : "Reducción del consumo energético y emisiones enfriamiento evaporativo , enfriamiento gratuito y recuperación de energía en sistemas todo aire"*. Universidad de Valladolid.
- Vaquero de la Hoz, M.T., 2011. *Tesis doctoral "Calidad del aire interior (IAQ) en las edificaciones hospitalarias."* Universidad de Valladolid.
- Wang, L.L., 2007. *Tesis doctoral : "Coupling of multizone and CFD programs for building airflow and contaminant transport simulations"*. Purdue University.

9.3 LIBROS, MONOGRAFÍAS PROYECTOS E INFORMES

- NEILA GONZÁLEZ, F.J. BEDOYA FRUTOS, C., Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. ISBN: 84-89150-20-6. Madrid: Munilla-Lería. 1994.
- NEILA GONZÁLEZ, F.J., Arquitectura bioclimática. ISBN: 84-89150-64-8. Madrid: Munilla- Lería. 2004.
- Spengler, John D., Jonathan M.S., 2000. Indoor air quality handbook,
- Laura Ruiz Ruiz. María Peñahora García Sanz, 2010."Calidad Del Ambiente Interior". Centro Nacional de Nuevas Tecnologías. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.
- Ghiaus, C. & Allard, F., 2005. Natural ventilation in the urban environment: assessment and design, p. 95. Available at:
<http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=q1eWw8B4cwoC&oi=fnd&pg=PR7&dq=natural+ventilation+in+the+urban+environment+:+assesment+and+design&ots=GyfdaLPS7q&sig=RvIv3h2wBvEtdt0HSJQX-NRGbCM>.

- Guía IDAE: Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3, IDAE, julio 2012.
- Guyot G., Carrié F.R, Schild P., ASIEPI Project : Stimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD, Final technical report, 50 p.,<http://www.asiepi.eu/wp-5-airtightness/available-reports.html>
- Holsteijn, Rob van et al., 2012. Final Report Task 3 User Requirements , Infrastructure Ventilation Systems. Sustainable Industrial Policy –Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems Contract No. ENTR / 2009/ 035/ LOT6/ SI2.549494 , pp.1–88.
- IDAE, unidad de Eficiencia energética de APPLUS, grupo Termotecnia de AICIA- Universidad de Sevilla, Instituto I. Cerdá, IETCC, U. de edificación y ordenación del territorio de L.. ., 2012. Manual de fundamentos técnicos de calificación energética de edificios existentes CE3,
- IEA. 1996. Annex 23: Multizone Air Flow Modelling. Evaluation of Comis. Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne LESO. PB, Institute of Building Technology. Páginas VII y VIII.
- Economidou, M. et al., 2011. Europe’s buildings under the microscope. A country-by-country review of the energy performance of buildings. BPIE.
- ECA (European Collaborative Action on "Urban Air, Indoor Environment and Human Exposure"), 2000 Risk Assessment In Relation To Indoor Air Quality, Report No 22. EUR 19529 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities
- ECA (European Collaborative Action) Working group 1 (MOLINA, C, PICKERING, C, ANTHONY, C, VALBJORN O, DE BORTOLI, M., 1989. INDOOR AIR QUALITY & ITS IMPACT ON. Report 4.Sick Building Syndrome. , (4).
- ECA (European Collaborative Action), 2000. “Risk Assessment in relation to indoor air quality”, Report No 22.
- Energy Efficiency Plan 2011, Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social Committee and the committee of the regions, European Commission, 2011.
- IEE Project TABULA (2009 - 2012)"Typology Approach for Building Stock Energy Assessment",
- Informe Proyecto SECH-SPAHOUSEC. IDAE. 2011.
- DG Energy, E., 2014. EU energy in Figures. Statistical Pocketbook 2014

- Dirección General de Sostenibilidad y Planificación de la Movilidad, 2014. “Calidad del aire. 2014”.
- AICIA-Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de ingenieros industriales de Sevilla, 2009. Condiciones de aceptación de Procedimientos alternativos a LIDER y CALENER.
- Asiepi, 2010. The final recommendations of the ASIEPI project: How to make EPB-regulations more effective? , (March 2010), p.121.
- Awbi, H.B., 1998. Chapter 7—Ventilation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2(1-2), pp.157–188. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403219800015X> [Accessed November 10, 2015].
- Eichhammer , W. et al, 2010. Financing the Energy Efficient transformation of the Building Sector in the EU. Lessons from the ODYSSEE-MURE project.
- Feustel, H.E. et al., 2005. COMIS 3.2 - User Guide.
- Feustel, H.E., 1998. COMIS — An International Multizone Air-Flow and Contaminant Transport Model COMIS
- Fürbringer, J.-M. et al., FINAL REPORT EVALUATION OF COMIS Appendices,
- Paricio, I., 2006. La fachada Ventilada y ligera: Bisagra.
- PPM Technologies Ltd., 2011. A summary of several Formaldemeter performance studies. , 46(10), pp.1–5.
- Programa de Actuación Urbanística (PAU) es, en España, el marco legal de desarrollo urbanístico de barrios completos definido en el Real Decreto 2159/1978 de 23 de junio
- Proyecto Odyssee. Key performance indicators. Proyecto Odyssee/Mure. <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/online-indicators.html>
- Proyecto SECH-SPAHOUSEC. Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Informe Final. IDAE. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. 16 de julio de 2011.
- Roulet, C.-A., 2008. Ventilation and Airflow in Buildings: Methods for Diagnosis and Evaluation
- Ministerio de Fomento, 2010. “Catálogo de Elementos Constructivos”, CTE, 2010.
- Walton, G.N. & Dols, W.S., 2006. NISTIR 7251 CONTAM 2.4 User Guide and Program Documentation,

World Health Organization, 2010. “WHO guidelines for IAQ: Selected Pollutants”.

World Health Organisation Regional Office for Europe, 2000. Indoor Air Quality Guidelines for Europe, 2nd Edition (Available on CD, and also downloadable from <http://www.euro.who.int/eprise/main/who/progs/aiq/activities/200206201>)

Devoe, H., 2012. Thermodynamics and Chemistry Second Edition, Available at: <http://www2.chem.umd.edu/thermobook/>.

DesignBuilder software, Sol-arq, Aurea consulting, 2014. Manual de ayuda DesignBuilder en español.

Summary of the impact assessment accompanying document to the proposal for a recast of the energy performance of buildings directive (2002/91/EC).

PROYECTO SIREIN+: Sistema Integral de Rehabilitación Energética” (IPT-2011-1980-920000). Entidad financiadora: MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN dentro del programa INNPACTO 2011. Entidades participantes: SAINT GOBAIN, UPM, TECNALIA, EMVS, R7 CONSULTORES, KOMMERLING, ENERES-Fernández Molina.

9.4 ARTÍCULOS CIENTÍFICOS Y REFERENCIAS WEB

A. Blomsterberg, “Air Leakage in Dwellings”, Dept. Bldg. Constr. Report No. 15, Swedish Royal Institute of Technology, 1977.

Bakó-Biró Z., Clements-Croome., D.J., Kochhar, N., Awbi, H.B., Williams, M.J. (2012) Ventilation rates in schools and pupils’ performance. Build. Environ. 48, 215–223.

Brasche S, Bischof W. Daily time spent indoors in German homes--baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants. Int J Hyg Environ Health. 2005;208(4):247-53. PubMed PMID: 16078638.

EeB.NMP.2013-4 Integrated control systems and methodologies to monitor and improve building energy performance

Eeig, I., 2010. Estimulating increased energy efficiency and better building ventilation,

Gatley, D., 2004. Psychrometric Chart Celebrates 100th Anniversary. ASHRAE Journal, (November), pp.16–20.

Guyot G., Carrié F.R, Schild P., ASIEPI Project : Estimulation of good building and ductwork airtightness through EPBD, Final technical report, 50 p.,<http://www.asiepi.eu/wp-5-airtightness/available-reports.html>

<http://ecoeiciente.es/climas-cte2013-en-epw/>

- Kang, D.H. et al., 2012. Household materials as emission sources of naphthalene in Canadian homes and their contribution to indoor air. *Atmospheric Environment*, 50, pp.79–87. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.060>.
- L. Molhave. 1990, Volatile organic compounds, indoor air quality and health. 5th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Toronto, Vol. 5; pp. 15–33.
- Liddament, M. W. (1986) *Air Infiltration Calculation Techniques: An Application Guide*, Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK
- M.H. Sherman “Estimation of Infiltration from Leakage and Climate Indicators”, *Energy and Buildings*, 1987
- M.S. Sherman and D.T. Grimsrud, *Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data*, Lawrence Berkeley Laboratory, UCA, 1980.
- Nucete, E. et al, 2010. Potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO₂ del parque residencial existente en España en 2020. WWF España
- Orme, M., Estimates of the energy impact of ventilation and associated financial expenditures, *Energy and Buildings* 33 (3) (2001) 199–205.
- Persily, A. K., and J. Axley. 1990. Measuring Airflow Rates with Pulse Tracer Techniques. In *Air Change Rate and Airtightness in Buildings*, STP 1067, M. H. Sherman (Ed.). ASTM, Philadelphia, pp. 31–51.
- Sambricio, C. (Ed), VV.AA., *Un siglo de vivienda social (1903-2003)*, (Dos tomos), Catálogo de la
- Sandberg, M., 1984, The multi-chamber theory reconsidered from the viewpoint of air quality studies, *Building and Environment*, vol. 19, pp. 221–233.
- Sandberg, M., and M. Sjöberg, 1983, The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms, *Building and Environment*, vol. 18, pp. 181–197.
- Santamouris, M. (1998) ‘Prediction methods’, in Allard, F. (ed), *Natural Ventilation in Buildings*, James and James, London
- Säteri, J., 2004.. *Performance Criteria of Buildings for Health and Comfort*, (292), pp.1–68.
- Seifert B. (1990): Regulating indoor air. In: Walkinshaw D. (Ed.): *Proceedings “Indoor Air '90”*,
- Sekine, Y. & Nishimura, A., 2001. Removal of formaldehyde from indoor air by passive type air-cleaning materials. *Atmospheric Environment*, 35(11), pp.2001–2007.

- Sherif, S.A., 2002. Overview of psychrometrics. *ASHRAE Journal*, (July), pp.33–39.
- Sherman, M.H. & Dickerhoff, D.J., 1998. Airtightness of U.S. dwellings. *ASHRAE Transactions*, 104, pp.1359–1367.
- Smith K.R., 2003 The global burden of disease from unhealthy buildings: preliminary results from a comparative risk assessment, *Proceedings of healthy buildings 2003*, Singapore.
- Straube, J.F., Ueno, K. & Schumacher, C.J., 2012. Measure guideline: internal insulation of masonry walls, (July), pp.1–112.
- Sutcliffe, H. C., 1990, A guide to air changes efficiency, AIVC Technical Note 28, Bracknell, UK. Order at inive@bbri.be.
- Swami, M. V. (1987) 'Procedures for calculating the natural ventilation airflow rates in buildings'. *ASHRAE Research Project 448-RP, Final Report FSEC-CR-163-86*, Florida Solar Energy Centre, Cape Canaveral, USA
- Tenorio, J.A: Jiménez, C, Linares, P., 2015 Indoor Air Quality regulations. The Spanish case. *Proceedings 36th AIVC congress*.
- Uhde, E. & Schulz, N., 2015. Impact of room fragrance products on indoor air quality. *Atmospheric Environment*, 106, pp.492–502. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231014008796> [Accessed April 6, 2015].
- Wang, L., Sakurai, M. & Kameyama, H., 2009. Study of catalytic decomposition of formaldehyde on Pt/TiO₂ alumite catalyst at ambient temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 167(1-3), pp.399–405.
- Wang, L.L., Dols, W.S. & Chen, Q., 2010. Using CFD Capabilities of CONTAM 3.0 for Simulating Airflow and Contaminant Transport in and around Buildings. *HVAC&R Research*, 16(6), pp.749–763.
- Wargocki, P., Wyon, D. (2013) Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Build. Environ.*, 59, 581-589.
- Wolkoff, P. et al., 2006. Organic compounds in office environments - Sensory irritation, odor, measurements and the role of reactive chemistry. *Indoor Air*, 16, pp.7–19.
- M. Sandberg, What is ventilation efficiency? *Building and Environment* 16 (1981) 123–135.
- Rodriguez et al. 2014. "Edificios de ECN mediante el sistema combinado de inyección en cámara y solución de puentes térmicos. Demostrador a escala real: edificio de viviendas". Comunicación publicada en el II Congreso EECN, Edificios Energía Casi

Nula.

Fanger, P.O., 1989. The new comfort equation for indoor air quality. ASHRAE Journal (10): 33-38

Information about the international research project , performed from 2009 to 2012 with the support of Intelligent Energy Europe

Persily, A. K. 1993. Ventilation, Carbon Dioxide and ASHRAE Standard 62-1989. ASHRAE Journal, 35(7): 40–44..