UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS

APLICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN UNA INCUBADORA
COMERCIAL DE PERDIZ ROJA Y SUPERVISIÓN DE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA
MEDIANTE SENSORES INTELIGENTES

TESIS DOCTORAL

Javier Garcia-Hierro Navas

Licenciado en Química

Madrid, 2016

Departamento de Ingeniería Rural
Escuela Técnica Superior de Ingenieros
Agrónomos

APLICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN UNA INCUBADORA
COMERCIAL DE PERDIZ ROJA Y SUPERVISIÓN DE LA ACTIVIDAD BIOLÓGICA
MEDIANTE SENSORES INTELIGENTES

Doctorando: Javier García-Hierro Navas (Licenciado en Química)
Directores: Adolfo Moya González (Doctor Ingeniero Agrónomo)
José Ignacio Robla Villalba (Doctor en Ciencias Químicas)

Madrid, 2016

(D15)

Tribunal nombrado por el Magfco. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad
Politécnica de Madrid, el día de de 201

Presidente: _____

Secretario: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Vocal: _____

Suplente: _____

Suplente: _____

Realizado el acto de defensa y lectura de Tesis el día de de 201

En la E.T.S.I. Agrónomos

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

“...y fueron felices y comieron perdices.”

Los cuentos con finales felices aportan seguridad para superar las adversidades

Agradecimientos

Cuando se llega a este punto quiere decir que estás alcanzando el final de tu etapa como doctorando y por ello es el momento en el que debes recordar a todas las personas que han participado de una u otra forma en la realización de tu trabajo, así como acordarte de las personas que te han ayudado, soportado y regañado.

Comienzo estos agradecimientos con José Ignacio Robla, el cual ha sido el principal motivador de esta tesis. Me ha enseñado todo lo que ahora sé sobre sensores y siempre ha perseverado para que termine este trabajo.

Agradecer a Pilar Barreiro, primero su infinita paciencia conmigo y segundo su gran ayuda en orientar mi trabajo por el camino apropiado. Gracias a Adolfo Moya por dirigir mi Tesis y transmitirme continuamente confianza para terminar; siempre con buen humor.

Quiero agradecer especialmente la ayuda de Ángel López y Francisco Pérez de la Finca Cinegética Dehesa Vieja de Galapagar. Nunca han dudado en aportarnos sus amplios conocimientos sobre la cría de perdices y en facilitarnos sus instalaciones para nuestros experimentos. Paco siempre me ha echado una mano cuando lo he necesitado y gracias a él pudimos comenzar éste trabajo.

Muchas gracias a todos los componentes del departamento de Ingeniería Rural. Belén, Eva Cristina, Constantino, Luis, Miguel, Ángela, Tatiana, Blanca. Muchas gracias también a Ricardo Badía por la ayuda y los buenos ratos pasados en nuestros trabajos en Mercamadrid.

Gracias a mis compañeros del CENIM: Paco, Miguel, Iñigo, Nacho y Emilia. Porque en los momentos de flaqueza en los que pensaba abandonar este trabajo me animaban a continuar y terminar.

Gracias a mi madre por transmitirme esa confianza que tiene en mí, a mi padre por conseguir siempre motivarme (a su manera) y a mi hermana porque he tenido su apoyo en todos los momentos que lo he necesitado. A mi gran familia porque siempre confían en mí. No puedo nombrar a todos porque me quedaría sin espacio.

Gracias a mis pequeñajos, que son mi motivación. Dani, con su capacidad para hacer fácil lo difícil y difícil lo fácil y Leire con su sonrisa que desmonta a cualquiera. Y por supuesto a Mónica por todo su apoyo durante estos años y por compartir la ilusión de finalizar esta etapa de mi vida.

Índice General

Resumen.....	1
Abstract.....	3
1. Introducción	5
1.1. Producción Avícola.....	5
1.1.1. Producción avícola mundial.....	5
1.1.2. Caso de Especies cinegéticas	7
1.2. Uso de energía solar térmica.....	9
1.2.1. Potencial de la energía solar térmica a nivel mundial.....	9
1.2.2. Aplicación de la energía solar térmica en la industria.	13
2. Planteamiento del problema.....	17
3. Antecedentes	21
4. Objetivos	25
5. Estado del Arte.....	27
5.1. Proceso de incubación: factores físico-químicos	27
5.1.1. Temperatura	28
5.1.2. Humedad Relativa.....	31
5.1.3. Intercambio de Gases	33
5.2. Utilización de energía solar en procesos agroalimentarios	36
5.2.1. Temporalidad, potencia y temperatura de uso.	37
5.2.2. Aplicación a la industria avícola.....	38
6. Estructura del Documento.....	41
7. Materiales y Métodos	45
7.1. Sistema instrumental de medida	46
7.1.1. Descripción de dispositivos y sensores	46
7.1.2. Redes de sensores inalámbricos.....	59
7.1.3. Efecto del encapsulado de los sensores en la fiabilidad de las medidas	63
7.1.4. Sensores inteligentes	65

7.2.	Experimentos realizados en la incubadora	68
7.2.1.	Entorno y factores ambientales	68
7.2.2.	Seguimiento de incubaciones estándar	70
7.2.3.	Verificación del sistema de aporte solar	72
7.3.	Métodos de análisis de la información	73
7.3.1.	Mapeado espacial de los datos	73
7.3.2.	Modelos de crecimiento	75
7.3.1.	Evaluación de la estabilidad térmica	76
7.3.2.	Análisis termodinámico	77
8.	Resultados	79
8.1.	Diseño y modificación del aporte solar en una incubadora	79
8.1.1.	Incubadora comercial	79
8.1.2.	Sistema de aporte solar	81
8.2.	Determinación de la estabilidad térmica y de la humedad relativa en el interior de la incubadora durante procesos estándar de incubación	88
8.3.	Monitorización de la actividad biológica durante la incubación de perdiz roja	93
8.3.1.	Evolución del CO ₂ durante los procesos de incubación	94
8.3.2.	Modelización de la producción de CO ₂	98
8.3.3.	Relación entre la concentración de CO ₂ a 20 días y la tasa de nacimientos	99
8.4.	Evaluación de la contribución solar en una incubadora híbrida (solar/eléctrica) de huevos de perdiz	101
8.4.1.	Caracterización térmica de incubaciones estándar	101
8.4.2.	Análisis de la contribución eléctrica y solar	103
8.4.3.	Evaluación del sistema híbrido de calefacción	107
8.4.4.	Análisis de la eficiencia del sistema de aporte de energía solar	110
8.4.5.	Evaluación de la estabilidad térmica	112
9.	Discusión	115
9.1.	Sobre el seguimiento de la actividad biológica mediante CO ₂	115
9.1.1.	Control del CO ₂ vs seguimiento	115

9.1.1.	Parámetros fisiológicos y su relación con el CO ₂	116
9.1.2.	Potencial del CO ₂ para monitorización de ciclos vitales.....	117
9.2.	Sobre el empleo de energía solar en la incubación de huevos	117
9.2.1.	Potencia y temperatura de uso en la producción avícola	117
9.2.2.	Temporalidad y acumulación de energía	118
9.2.3.	Tasas de eficiencia y de éxito.....	119
9.3.	Uso y explotación de la información generada.....	119
10.	Conclusiones.....	121
11.	Propuesta de trabajos posteriores.....	123
12.	Bibliografía	125
13.	Anexos	135

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Producción mundial de carne de pollo en el año 2014 (miles de Toneladas)(Fuente: Foreign Agricultural Service/USDA Office of Global Analysis).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Distribución de explotaciones avícolas por especies en España (diciembre 2014). Fuente S.G. Estadística MAGRAMA (MAGRAMA, 2015)</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3. Distribución de granjas de perdiz en España, por Comunidades Autónomas (01/12/2014). Fuente: Registro General de Explotaciones Ganaderas (MAGRAMA, 2015).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4. Evolución del número de explotaciones avícolas con estado de alta en España. Fuente: Registro General de Explotaciones Ganaderas (MAGRAMA, 2015).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5. Países con mayor capacidad total instalada de energía solar térmica y distribución según el tipo de colector (Mauthner and Werner, 2014)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6. Países con mayor capacidad instalada de energía solar térmica por 1000 habitantes. (Mauthner and Werner (2014))</i>	<i>11</i>
<i>Figura 7. Mapa solar en España. La cifra superior representa la energía solar incidente (KWh/m²) por año. La cifra inferior es el número de horas de sol al año.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 8. Países de la U.E. con mayor superficie de energía solar térmica instalada.(Mauthner and Werner (2014)).....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 9. Nacedora Danki (imagen izq.) y nacedora Victoria (imagen dcha.) situadas en la sala de incubación</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10. Ejemplo de sala de cría de perdices</i>	<i>18</i>
<i>Figura 11. Influencia de los factores ambientales sobre distintos parámetros de calidad de la incubación (elaboración propia)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 12. Transición de la membrana corioalantoidea a la respiración pulmonar (Fuente: www.bmeditores.mx).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 13. Vista interna de un huevo de ave (Fuente: www.infovisual.info)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 14. Clasificación de los secaderos y modos de calentamiento, según Leon et al. (2002).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 15. Incubadora con aporte de energía solar térmica empleada por Bolaji (2008)</i>	<i>40</i>
<i>Figura 16. Esquema de trabajo</i>	<i>45</i>
<i>Figura 17. Imagen sonda Pt100</i>	<i>46</i>
<i>Figura 18. Dimensiones del sensor de temperatura y humedad relativa Sensirion® SHT7x (izquierda y centro) y SHT1x (derecha).</i>	<i>49</i>
<i>Figura 19. Conexión típico del sensor Sensirion SHT7x, incluyendo resistencia pull up</i>	<i>50</i>
<i>Figura 20. Esquema de conexionado del sensor EE82 (Fuente: www.epluse.com).....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 21. Curva de calibrado del sensor de CO₂ E+E Elektronik EE82-5C2.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 22. Sensor de oxígeno Figaro KE-50.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 23. Funcionamiento de un sensor electroquímico de oxígeno.</i>	<i>52</i>

<i>Figura 24. Recta de calibración bajo condiciones estándar (Fuente: www.figarosensor.com).....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 25. Imagen de la placa para conexión de hasta 28 sensores Sensirion.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 26. Esquema básico de la placa de conexión de sensores Sensirion SHTx.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 27. Esquema general módulo ADAM 4015 y conexión de sensor RTD de 3 hilos.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 28. Esquema general módulo ADAM 4019+.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 29. Esquema general módulo ADAM 4055 y conexión con contacto mojado (izq-arriba) y seco (izq-abajo).</i>	<i>58</i>
<i>Figura 30. Esquema general módulo ADAM 4068 y conexiones en forma A (izq-arriba) y forma C (izq-abajo).</i>	<i>59</i>
<i>Figura 31. TurboTag RFID data-logger de temperatura.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 32. Distribución de sensores en cámaras frigoríficas con distinta distribución.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 33. Dispositivo Nlaza modificado con sensor Sensirion SHT75 con montaje aéreo (1), interruptor de conexión (2) y clema de conexión de sensor (4). Emplea un procesador MicaZ(3).</i>	<i>64</i>
<i>Figura 34. TurboTags T700 y T702. En la parte inferior, vista sin encapsulado donde se aprecia la antena RFID (1), el sensor de temperatura (2) y la batería (3).....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 35. Esquema de secadero solar CONA SOLAR 1) colector solar, 2) ventilador, 3) cámara de secado, 4) trampilla de recirculación, 5) entrada de aire caliente a la cámara. Posicionamiento de sensores S1 a S8 y T1 a T5.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 36. Cantidad de agua extraída (W) a lo largo de un ciclo de secado, estimada con SMART-1 (línea sólida) y cantidad de agua extraída medida experimentalmente mediante gravimetría (línea de trazos).....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 37. Radiación solar media mensual durante horas de sol (Fuente: J. I. González de la Blanca)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 38. Flujo de trabajo para análisis tridimensional de datos</i>	<i>74</i>
<i>Figura 39. Ejemplo de cámara frigorífica supervisada durante los trabajos realizados en Mercamadrid (Madrid, junio de 2009).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 40. ΔT_n y V_n en el interior de una cámara frigorífica de hortalizas</i>	<i>75</i>
<i>Figura 41. Foto del interior de la incubadora. 1) Ventilador de aspas, 2) rodillo de humectación, 3) circuito de enfriamiento de emergencia, 4) resistencias de calefacción, 5) bandeja de agua, 6) panel de control</i>	<i>80</i>
<i>Figura 42. Esquema original sistema de calefacción y enfriamiento de la incubadora</i>	<i>81</i>
<i>Figura 43. Dimensiones del colector solar.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 44. Curva de rendimiento del captador (fuente: Solar Electric S.L.)</i>	<i>82</i>
<i>Figura 45. Colector solar de tubos de vacío, instalado en el tejado de la sala de incubación.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 46. Modificación y adaptación de sistema de calentamiento con energía solar a la incubadora comercial.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 47. Sistema de electroválvulas y bomba de circulación para la regulación de entrada al intercambiador de agua calentada con energía solar</i>	<i>85</i>
<i>Figura 48. Caja con sistema de control. Vista exterior (izq) y vista interior (der).....</i>	<i>86</i>

<i>Figura 49. Caja con dispositivo ADAM 4015 para conexión de sensores PT100 y fuente conmutada de alimentación para los módulos ADAM.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 50. Programa diseñado para la monitorización y control del sistema de aporte de energía solar térmica</i>	<i>87</i>
<i>Figura 51. Programa diseñado para la monitorización de temperatura y gases durante la incubación</i>	<i>87</i>
<i>Figura 52. Distribución de los sensores en el interior de la incubadora</i>	<i>89</i>
<i>Figura 53. Colocación de sensores Sensirion en el interior de la incubadora</i>	<i>89</i>
<i>Figura 54. Variación continua de la temperatura de la incubadora, en comparación con la temperatura ambiental externa y la temperatura de la sala de incubación, durante la incubación realizada entre el 28 de mayo y 18 de junio de 2011.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 55. Mapa tridimensional de la temperatura media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona delantera y lateral izquierda de la incubadora)</i>	<i>91</i>
<i>Figura 56. Mapa tridimensional de la temperatura media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona trasera y lateral derecho de la incubadora)</i>	<i>91</i>
<i>Figura 57. Mapa tridimensional de la humedad relativa media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona delantera y lateral izquierdo de la incubadora)</i>	<i>92</i>
<i>Figura 58. Mapa tridimensional de la humedad relativa media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona trasera y lateral derecho de la incubadora)</i>	<i>93</i>
<i>Figura 59. Ensayo para determinar la estabilidad del sensor de CO₂ frente a variaciones de temperatura en condiciones normales de funcionamiento normal de la incubadora</i>	<i>94</i>
<i>Figura 60. Imagen de los sensores de CO₂ (1) y de O₂ (2) instalados en la parte superior del interior de la incubadora</i>	<i>94</i>
<i>Figura 61. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 13 Marzo-4 Abril de 2012, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 62. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 6 -27 Abril de 2012, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz</i>	<i>96</i>
<i>Figura 63. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 30 Abril - 19 Mayo de 2012, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz.....</i>	<i>96</i>

<i>Figura 64. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 19 Marzo - 9 Abril de 2013, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 65. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 16 Abril -7 Mayo de 2013, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 66. Correlación entre la estimación de la concentración de CO₂ en el día 20 y el número de pollos nacidos.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 67. Caracterización térmica de incubación estándar 6: 20,5 días y 8262 huevos.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 68. Caracterización térmica de incubación estándar 7: 21,1 días y 9070 huevos.....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 69. Experimento 1. Temperatura en 5 puntos del circuito de aporte de energía solar y en el interior de la incubadora, con la incubadora vacía y empleando únicamente energía solar.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 70. Evolución de la temperatura en 5 localizaciones (según Figura 46) del circuito de agua del sistema de aporte de energía solar, durante un periodo de contribución solar en el Experimento 1</i>	<i>107</i>
<i>Figura 71. Experimento 2. Temperaturas en 5 puntos del circuito de aporte de energía solar y en el interior de la incubadora, con la incubadora vacía empleando el sistema híbrido de calentamiento con energía solar y eléctrica. A y B son ciclos de calentamiento eléctrico y 1, 2, 3, 4 y 5 periodos de calentamiento con energía solar.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 72. Representación de la derivada de la temperatura de la incubadora suavizada empleando el algoritmo de Savitzky-Golay con una ventana de 3 y 9 elementos (3 y 9 minutos de desfase, respectivamente). A y B son ciclos de calentamiento eléctrico y 1, 2, 3, 4 y 5 periodos de calentamiento con energía solar.....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 73. Experimento 3. Temperaturas en 5 puntos del circuito de aporte de energía solar y en el interior de la incubadora, con la incubadora llena al 69%, empleando el sistema híbrido de calentamiento con energía solar y eléctrica. A y B son periodos de calentamiento eléctrico y 1 es el periodo con calentamiento con energía solar.....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 74. Diagrama de espacio de fase de los cinco test realizados para td=9. Cada nube representa los datos con menor dispersión, cuya área representa el 90% del total</i>	<i>112</i>
<i>Figura 75. Diagrama de espacio de fase para la temperatura de la incubadora durante el desarrollo del Experimento 2 donde se aprecia los periodos de calefacción con energía solar y con resistencias eléctricas</i>	<i>113</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Número de explotaciones avícolas de caza en las distintas Comunidades Autónomas (sólo con estado de alta). Fuente: Registro General de Explotaciones Ganaderas (01/12/2014)</i>	<i>8</i>
<i>Tabla 2. Fuentes de energía renovable. Producción anual y demanda global (Cesare, 2001)</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 3. Temperatura de procesos en diversas industrias (Kalogirou, 2003).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4. Temperaturas recomendadas y periodos de incubación delas aves de cría más comunes (Fuente:www.elsitioavicola.com).....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 5. Resumen de trabajos más relevantes sobre la influencia de la temperatura del huevo (cascarón) en el proceso de incubación de aves.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 6. Resumen de trabajos sobre la influencia de la HR en el proceso de incubación</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 7. Publicaciones derivadas del desarrollo de la Tesis Doctoral.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 8. Tolerancias de 4 clases de PT100 especificadas en la norma DIN/IEC751:2008</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 9. Características técnicas del sensor Sensirion® SHT7x y SHT1x (Fuente: www.sensirion.com).</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 10. Características técnicas del sensor de CO₂ EE82</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 11. Especificaciones técnicas sensor Figaro KE-50 (fuente:www.figarosensor.com)</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 12. Especificaciones técnicas del sensor Apogee SP-215.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 13. Resumen de especificaciones técnicas de los módulos de adquisición de datos.</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 14. Porcentaje de paquetes perdidos de datos del dispositivo Crossbow MTS400 y su desviación estándar asociada.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 15. Tiempo de estabilización (en segundos) de los distintos sensores ensayados.</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 16. Descripción de los modelos matemáticos propuestos para el desarrollo de sensores inteligentes.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 17. Temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales, para el periodo comprendido entre el año 2012 y 2014</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 18. Resumen de incubaciones reales supervisadas y sensórica instalada. Se indican la temperatura media de la incubadora y la sala de incubación, junto a su desviación estándar, entre paréntesis.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 19. Resumen de ensayos relativos al análisis del empleo de energía solar térmica como fuente de energía de apoyo en el sistema de calefacción de la incubadora comercial.</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 20. Parametrización de los modelos logístico y Gompertz.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 21. Características de incubadora Victoria V-I-36.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 22. Características del colector solar de tubos de vacío.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 23. Control de temperatura de la incubadora con aporte de energía solar.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 24. Temperatura media (T) y humedad relativa media (HR) en el interior de la incubadora. Entre paréntesis, posición del sensor según la Figura 52.....</i>	<i>88</i>

<i>Tabla 25. Parámetros de ajuste de los modelos de Gompertz y logístico para el análisis de la concentración de CO₂ durante los ensayos.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 26. Resultados de ajuste de los datos representados en la Figura 66 ('y' corresponde al número de pollos nacidos y 'x' a la concentración de CO₂ en ppm).....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 27. Correlación entre los parámetros obtenidos en los ajustes empleando los modelos logístico y de Gompertz.</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 28. Resumen de la temperatura de la incubadora y la sala de incubación durante los ensayos</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 29. Cálculo de los periodos de activación de las resistencias eléctricas</i>	<i>104</i>
<i>Tabla 30. Contribución solar durante los experimentos 1,2 y 3</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 31. Análisis de la temperatura, el calor y el rendimiento del circuito de calefacción solar. El tanque colector y las temperaturas ambientales medias (T₁ y T_e, respectivamente) promedio se calculan para períodos de sol.....</i>	<i>111</i>

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolo	Descripción	Unidades
T	Temperatura	°C
HR	Humedad relativa	%
T_{huevo}	Temperatura del huevo	°C
T_{inc}	Temperatura de la incubadora	°C
H_{emb}	Calor producido por el embrión	W
H_{agua}	Calor de la evaporación de agua	W
S_{huevo}	Superficie del huevo	m ²
K_{huevo}	Conductancia térmica del huevo	W/m ² ·°C
R	Resistencia eléctrica	Ω
R_0	Resistencia a la temperatura de referencia	Ω
ΔT	Diferencia de temperatura	°C
α	coeficiente de temperatura de conductor entre 0°C y 100°C	K ⁻¹
R_{Pt}	Resistencia del elemento sensor de platino	Ω
R_c	Resistencia de los cables	Ω
SE	Error estándar	-
SD	Desviación Estándar	-
R	Coeficiente de correlación	
r^2	Coeficiente de determinación	
CV	Coeficiente de variación	%
V	Volumen	l
$\dot{m}_w$	caudal másico de agua	kg/min
M_w	masa de agua	kg
$\dot{V}_w$	caudal volumétrico de agua	m ³ /min
ρ_w	densidad del agua	kg/m ³
$\dot{Q}$	Caudal de calor	kJ/min
C_p	Calor específico	kJ/kg·K
Q	Calor	kJ
ΔT_n	Temperatura normalizada	
T_c	Temperatura de consigna	°C
H	Rendimiento del colector	
G	Radiación solar incidente	W/m ²

Abreviatura	Descripción
AECID	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
ASCII	Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información (American Standard Code for Information Interchange)
CNMC	Comisión Nacional del Mercado de Valores
FAOSTAT	División de Estadística de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura
GNA	Algoritmo de Gauss-Newton
GPB	Estándar bus de datos digital de corto rango desarrollado por Hewlett-Packard
I ² C	Bus de comunicaciones en serie (Inter-Integrated Circuit)
IDEA	Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía
LMA	Algoritmo de Levenberg-Marquardt
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España
Modbus/RTU	Protocolo de comunicaciones basado en la arquitectura maestro/esclavo o cliente/servidor, para la conexión de un ordenador de supervisión con una unidad remota
NDIR	Sensor de Infrarrojo No Dispersivo (Non Dispersive Infrared Detector)
OTP	One-Time Programmable
PTAT	Proporcional a Temperatura Absoluta
REE	Red Eléctrica de España
RFID	Identificación por Radiofrecuencia (Radio Frequency Identification)
RJ11	Tipo de conector de 4 contactos, empleado para enlazar redes
RS232	Estándar Recomendado 232 (Recommended Standard 232)
RS485	Estándar Recomendado 485 (Recommended Standard 485)
RTD	Detector de Temperatura Resistivo (Resistance Temperature Detector)
SEO/Birdlife	Sociedad Española de Ornitología
WSN	Red Inalámbrica de Sensores (Wireless Sensor Network)

Resumen

La perdiz roja es la especie cinegética por excelencia en la península ibérica, cuya cría en cautividad y suelta controlada comenzó a regularse en los años 70 con la aparición del ICONA. La incubación controlada de huevos de perdiz es imprescindible, con fines cinegéticos y de preservación de la especie, y se desarrolla con incubadoras comerciales de pequeña y mediana escala, distribuidas en zonas rurales con acceso limitado y/o deficiente al suministro eléctrico. En nuestras latitudes el aporte de energía solar térmica se perfila como una posibilidad de mejorar la eficiencia energética de éstas y otras instalaciones y de reducir la dependencia energética exterior.

Hay diversos factores físico-químicos que influyen en la calidad de la incubación: temperatura, humedad relativa, y concentración de gases, de los cuales sólo los dos primeros son habitualmente supervisados y controlados en este tipo de incubadoras.

Esta Tesis surge en el marco de dos proyectos de cooperación con la AECID, y tiene como objetivos: la caracterización espacial de variables relevantes (temperatura (T), humedad relativa (HR)) en la incubadora comercial durante el proceso de incubación, la determinación de la relación existente entre la evolución de variables ambientales durante el proceso de incubación y la tasa de nacimientos (35-77%), así como el diseño y evaluación del sistema de apoyo solar térmico para determinar su potencial de utilización durante las incubaciones comerciales. La instalación de un número limitado de sensores permite la monitorización precisa del proceso de incubación de los huevos.

Los resultados más relevantes indican que en incubaciones comerciales los gradientes de T y HR han sido despreciables (1°C de diferencia entre las posiciones con mayor y menor T media y un 4,5% de diferencia entre las posiciones con mayor y menor HR), mientras que el seguimiento y ajuste (mediante modelos de crecimiento) de la concentración de CO₂ (r^2 entre 0,948 y 0,987 en las 5 incubaciones, para un total de 43315 huevos) permite valorar la actividad fisiológica de los huevos e incluso predecir la tasa de éxito (nacimientos), basándose en la concentración de CO₂ estimada mediante modelos de crecimiento en el día 20 de incubación (r^2 entre 0,997 y 0,994 según el modelo de estimación empleado). El sistema ha sido valorado muy positivamente por los productores (Finca Cinegética Dehesa Vieja de Galapagar).

El aporte térmico se ha diseñado (con mínima intrusión en el sistema comercial) sobre la base de un sistema de enfriamiento de emergencia original de la incubadora, al que se han incorporado un colector solar, un depósito, un sistema de electroválvulas, una bomba de circulación y sensores de T en distintos puntos del sistema, y cuyo control ha sido

automatizado. En esta Tesis se muestra que la contribución solar puede aportar hasta un 42% de las demandas de energía en nuestras condiciones geográficas para una temperatura de consigna dentro de la incubadora de 36.8°C, sin afectar a la estabilidad de la temperatura. Además, el rendimiento del colector solar se ha acotado entre un 44% y un 85%, de acuerdo con los cálculos termodinámicos; valores que se mantienen dentro del rango aportado por el fabricante (61%). En el futuro se plantea evaluar el efecto de distintas estrategias de control, tales como controladores difusos, que incorporan el conocimiento experto al control automático.

Abstract

The partridge is the quintessential game species in the Iberian Peninsula, which controlled breeding and release, began to be regulated in the 70s with the emergence of ICONA. The controlled incubation of eggs is essential, and takes place in commercial incubators of small and medium scale, distributed in rural areas with limited and/or inadequate access to power. In our latitudes the contribution of solar thermal energy is emerging as a possibility to improve the energy efficiency of the facilities and to reduce external energy dependence.

There are various physicochemical factors influencing the quality of incubation: temperature, relative humidity and concentration of gases, of which only the first two are typically monitored and controlled in such incubators.

This PhD comes within the framework of two cooperation projects with AECID and aims: the spatial characterization of relevant variables in a commercial incubator (temperature (T), and relative humidity (HR)), determining the relationships in the changes in environmental variables during incubation and birth rates (35-77%) as well as the design and evaluation of solar thermal support system to determine its potential use during commercial incubations; the installation of a limited number of sensors has allowed accurate monitoring of incubation of eggs.

The most relevant results indicate that in commercial incubations, the gradients in T and HR have been negligible (1°C difference between the highest and lowest positions T and average 4.5% difference between the highest and lowest positions HR), while monitoring and fit using growth models of the concentration of CO₂ (r^2 between 0.948 and 0.987 in 5 incubations, for a total amount of 43,315 eggs) allows assessing the physiological activity of the eggs and even predict the success rate (hatchability), based on the estimated concentration of CO₂ by using growth models on day 20 of incubation (r^2 between 0.997 and 0.994 depending on the fit model). The system has been highly valued by producers (Finca Cinegética Dehesa Vieja de Galapagar).

The hybrid heat system is designed (with minimal intrusion into the commercial system) based on an emergency cooling device, original in the incubator. New elements have been incorporated: a solar collector, a tank, a system of solenoid valves, a circulating pump and T sensors at various points of the system, whose control has been automated. This PhD shows that the solar contribution is responsible for up to 42% of energy demands in our geographical conditions for a setpoint temperature inside the incubator of 36.8°C, without questioning the stability of the temperature. Furthermore, the efficiency of the solar collector has been bounded between 44% and 85%, according to thermodynamic calculations; values

remain within the range provided by the manufacturer (61%). In the future it is proposed to evaluate the effect of different control strategies, such as fuzzy controllers, which incorporate the expertise to automated control.

1. Introducción

1.1. Producción Avícola

1.1.1. Producción avícola mundial

Desde la década de 1990, la producción avícola ha aumentado de forma continuada y aunque en los últimos años la producción se ha desacelerado, existen estimaciones de que la producción de carne de pollo en países en desarrollo aumentará en torno al 3,6% al año (Narro et al., 2014). El 44% del total de la producción animal corresponde a pollo. El 80% de la producción avícola corresponde a carne de pollo pero también ha aumentado la producción de carne de pato y ganso (USDA, 2015), lo cual implica que en torno al 55% de la producción de carne a nivel mundial es de origen avícola. Como se aprecia en la Figura 1, EEUU, China y Brasil son los líderes mundiales en la producción de aves de corral acaparando hasta el 50% de la producción mundial de carne de pollo.

Figura 1. Producción mundial de carne de pollo en el año 2014 (miles de Toneladas)(Fuente: Foreign Agricultural Service/USDA Office of Global Analysis)

En la actualidad, la industria avícola en países desarrollados y en gran parte de países en vías de desarrollo se ha dirigido hacia la creación de grandes plantas de cría y engorde. La producción a baja escala puede continuar subsistiendo en países en desarrollo debido al empleo de mano de obra familiar valorada por debajo del precio de mercado. A su vez, en estos países en vías de desarrollo continúa siendo importante la producción doméstica de aves para el autoconsumo.

Por otro lado existen estimaciones en el sector de la producción avícola que estiman el consumo de energía en torno a los 0,71kWh por ave. En términos de la demanda global de energía de una explotación de cría de aves, la calefacción tanto en las incubadoras como en los recintos de cría supone más del 80% del consumo energético total, es por lo tanto en este aspecto donde se puede realizar un mayor énfasis para conseguir una mejora en términos económicos y medioambientales.

España es el vigésimo país del mundo en producción de carne de pollo según FAOSTAT con una producción total de 1.171.695 de toneladas métricas en el año 2013. Según el censo de explotaciones avícolas en España (Figura 2), la mayor parte de ellas está dedicada a la producción de aves para consumo de carne: pollo, pavos, patos y ocas. La producción de pollo en España se lleva a cabo en explotaciones de gran escala, pero en el caso del resto de especies, las explotaciones suelen tener un tamaño más reducido.

Figura 2. Distribución de explotaciones avícolas por especies en España (diciembre 2014). Fuente S.G. Estadística MAGRAMA (MAGRAMA, 2015)

1.1.2. Caso de Especies cinegéticas

La Ley 4/1989 de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestres establece que la caza sólo podrá realizarse sobre las especies que reglamentariamente se declaren como piezas de caza. En la literatura cinegética es común encontrar a la perdiz roja (*Alectoris rufa*) como “la reina” de la caza menor en España con entre 2-3 millones de ejemplares abatidos anualmente en España (Viñuela Madera et al., 2013), a pesar de ser una de las especies que ha sufrido mayor disminución de abundancia en los últimos años (según datos de SEO/Birdlife (2013) se ha producido una reducción de la población del 16,2% desde 1998 a 2012). España tiene un papel primordial en la conservación de la perdiz roja, ya que su área de distribución natural está actualmente restringida a la Península Ibérica, sur de Francia y noroeste de Italia, donde las poblaciones silvestres sufrieron un gran declive durante las décadas de los 70 y 80 (Aebischer and Potts, 1994).

Debido a la gran presión cinegética es necesaria la cría intensiva en granjas ubicadas principalmente en el centro y sur de la península, por ser su hábitat natural. La cría en cautividad y la suelta en campo comenzaron a desarrollarse en España a mediados del siglo XX al amparo del antiguo ICONA (Sánchez et al., 2009) y en la actualidad es una práctica muy extendida. Actualmente se sueltan en España al menos 3-4 millones de ejemplares al año, lo cual fomenta el desarrollo de un importante negocio alrededor de la cría, suelta y caza de perdices procedentes de granja (Garrido, 2012). La alta productividad de la especie y su relativa adaptabilidad a la cautividad, facilitaron su cría en granja, llevándose a cabo

programas de cría intensiva (Sánchez et al., 2009). Las granjas dedicadas a la cría de perdiz y otras aves de interés cinegético son explotaciones de pequeño tamaño comparado con las explotaciones dedicadas a la producción de pollos. Estas explotaciones están distribuidas por toda la geografía española (Figura 3) y se trata por lo general de pequeñas granjas familiares con capacidades de producción de en torno a los 30000 especímenes al año.

Figura 3. Distribución de granjas de perdiz en España, por Comunidades Autónomas (01/12/2014). Fuente: Registro General de Explotaciones Ganaderas (MAGRAMA, 2015)

Tabla 1. Número de explotaciones avícolas de caza en las distintas Comunidades Autónomas (sólo con estado de alta). Fuente: Registro General de Explotaciones Ganaderas (01/12/2014)

	Codornices	Faisanes	Perdices
Andalucía	208	117	370
Aragón	19	3	14
Asturias	41	45	30
Islas Baleares	26	4	26
Canarias	17	4	11
Cantabria	14	15	13
Castilla la Mancha	37	39	118
Castilla y León	57	80	101
Cataluña	99	48	111
Extremadura	187	154	311
Galicia	36	40	44
Madrid	14	21	19

	Codornices	Faisanes	Perdices
Murcia	2	1	17
Navarra	4	7	14
País Vasco	6	2	6
La Rioja	2	1	4
Comunidad Valenciana	12	15	25
Ceuta	0	0	0
Melilla	1	1	1

Las dos comunidades autónomas con mayor cantidad de granjas dedicadas a la cría de aves de interés cinegético son Andalucía y Extremadura (Tabla 1). El número de granjas de este tipo censadas en toda España ha crecido progresivamente durante los últimos años (Figura 4), duplicándose el número total de granjas desde el año 2007 al año 2014.

Figura 4. Evolución del número de explotaciones avícolas con estado de alta en España. Fuente: Registro General de Explotaciones Ganaderas (MAGRAMA, 2015)

1.2. Uso de energía solar térmica

1.2.1. *Potencial de la energía solar térmica a nivel mundial*

La energía solar térmica se ha introducido en aplicaciones domésticas y en edificios, pero su uso aún no se ha extendido su uso a nivel industrial debido a algunos problemas como la intermitencia de la energía y la baja potencia generada, los cuales generan inseguridad en el

sector. A finales del año 2012, existía una capacidad total instalada en operación de 269,3 GW_{th}¹ que corresponden a un total de 384,7 millones de metros cuadrados de área de colector en 58 países registrados en el informe SOLAR HEAT WORLDWIDE 2012 (Mauthner and Werner, 2014). La mayor parte de la capacidad instalada se encuentra en China (180,4GW_{th}) y Europa (42,8GW_{th}) que acumulan hasta un 83% de la totalidad de la potencia instalada. En los últimos años, China es claramente el país que está apostando por nuevas instalaciones de energía solar térmica. Así, en el año 2012, el principal instalador de nuevos paneles solares fue China con una potencia total instalada de 44,7 GW_{th}, por los 3,7 GW_{th} de Europa. Entre ambos acumularon el 92% del total de colectores instalados en el año 2012. Curiosamente en los países europeos se apuesta mayoritariamente por la instalación de colectores planos, mientras que en China se instalan básicamente colectores de tubos de vacío, siendo la causa de que el empleo de este tipo de colectores haya aumentado apreciablemente en los últimos años y llegando a representar el 64,6% de la potencia total instalada.

Es destacable que EEUU continúa siendo el segundo país con mayor potencia instalada con un gran porcentaje de paneles solares planos sin cubierta, los cuales tienen menor eficiencia y su uso es poco favorable en ambientes fríos. Un país como Turquía en una zona climática similar a la península Ibérica, es el cuarto país del mundo en cuanto a potencia instalada. (Figura 5).

Figura 5. Países con mayor capacidad total instalada de energía solar térmica y distribución según el tipo de colector (Mauthner and Werner, 2014)

¹ th= thermal heating. Para comparar la capacidad instalada de colectores solares térmicos con otras fuentes de energía, los expertos de energía solar térmica acordaron una metodología para convertir el área en la capacidad instalada de colector solar térmico en una reunión conjunta del Programa de SHC AIE y asociaciones del comercio de energía solar térmica celebrada en Gleisdorf, Austria en septiembre del año 2004. Las asociaciones representadas de Austria, Canadá, Alemania, los Países Bajos, Suecia y Estados Unidos, así como la Federación de la Industria Solar Térmica Europea (ESTIF) y el Programa de SHC IEA acordaron utilizar un factor de 0,7 kW_{th} / m² para calcular la capacidad nominal de la zona de colectores instalados.

La producción energética global de los colectores solares térmicos durante el año 2012 fue de 227,8 TWh o 820 PJ; lo cual corresponde a un ahorro energético equivalente a 24,5 millones de toneladas de petróleo y a una reducción de emisiones de 79,1 millones de toneladas equivalentes de CO₂.

Aunque China es el país con mayor potencia instalada, destaca un país en la zona mediterránea, como Chipre, con la mayor superficie colectora instalada por cada 1000 habitantes (Figura 6)(Mauthner and Werner, 2014).

Figura 6. Países con mayor capacidad instalada de energía solar térmica por 1000 habitantes. (Mauthner and Werner (2014))

La energía solar térmica es la fuente de energía renovable más empleada a nivel mundial, por encima de la energía geo-termoeléctrica y energía geotérmica (Tabla 2).

Tabla 2. Fuentes de energía renovable. Producción anual y demanda global (Cesare, 2001)

Fuente renovable de energía	Producción anual (TJ)	% Demanda Global
Solar térmica	228720	0,523
Solar termoelectrica	1200	0,003
Solar fotovoltaica	630	0,001
Geotérmica	128060	0,292
Geo-termoelectrica	151390	0,345
Eólica	35760	0,082
Mareomotriz	2160	0,005
Total	547920	0,806

➤ Caso particular de España

España presenta un amplio potencial de desarrollo de la energía solar térmica, con una media de 2500 horas de sol aseguradas al año. La poca nubosidad, la baja humedad ambiental, el

clima seco y la incidencia de los rayos solares, hacen que España tenga los valores de radiación directa más elevados de la U.E. Aun así, existen diferencias evidentes entre las distintas regiones españolas propiciadas por la variedad de zonas climáticas en el interior de la Península Ibérica. Según los datos disponibles, existe un gran contraste entre las comunidades del Cantábrico, que rondan las 1700 horas de sol al año, y las mediterráneas, que alcanzan las 2750 horas de sol anuales (Figura 7).

Figura 7. Mapa solar en España. La cifra superior representa la energía solar incidente (KWh/m²) por año. La cifra inferior es el número de horas de sol al año

Así existen algunas zonas del norte de España que reciben menos horas de sol que algunas regiones del centro de Europa, como Viena (1890 horas de sol al año). A pesar del tremendo potencial de España como receptor de energía solar y del Plan de Energías Renovables 2005-2010 (que preveía alcanzar una superficie instalada de 4,9 millones de metros cuadrados en el año 2010), España en el año 2013 era el quinto país de la U.E. en capacidad solar térmica instalada, por detrás de Alemania, Austria, Grecia e Italia (Figura 8).

Figura 8. Países de la U.E. con mayor superficie de energía solar térmica instalada.(Mauthner and Werner (2014))

1.2.2. Aplicación de la energía solar térmica en la industria.

De entre todas las energías renovables, la energía solar es la que más expectativas de éxito ha creado, ya que es una energía abundante, limpia y “gratuita” que no produce ruidos ni ningún tipo de contaminación ambiental. La intermitencia de la energía solar debido a la climatología y a los periodos nocturnos hace necesario un correcto análisis de las necesidades energéticas de cada proceso a lo largo del día. Además es necesario almacenar el exceso de energía para que pueda ser aprovechada en los momentos en los que no existe insolación. La energía solar térmica funcionará como energía de apoyo y sólo en algunos casos se dispondrá de energía suficiente para realizar algunos procesos industriales.

Aunque la energía solar térmica en la actualidad se emplea principalmente a nivel doméstico (agua caliente sanitaria, climatización, calentamiento de agua de piscinas), existen diversos casos de éxito para su implementación en diversos sectores industriales. Algunas de las aplicaciones más habituales en la industria son la producción de agua caliente, vapor, procesos de secado y deshidratación, precalentamiento, concentración, pasteurización, esterilización, lavado, reacciones químicas, tratamiento de alimentos, etc. (Tabla 3).

Tabla 3. Temperatura de procesos en diversas industrias (Kalogirou, 2003).

Industria	Proceso	Temperatura (°C)
Leche	Presurización	60–80
	Esterilización	100–120
	Secado	120–180
	Concentrados	60–80
	Agua de alimentación de calderas	60–90
Conservas	Esterilización	110–120
	Pasteurización	60–80
	Cocinado	60–90
	Blanqueamiento	60–90
Textil	Blanqueado, tinte	60–90
	Secado, desengrasado	100–130
	Desengrasado	70–90
	Fijado	160–180
	Presión	80–100
Papel	Curado, secado	60–80
	Agua de alimentación de calderas	60–90
	Blanqueado	130–150
Productos Químicos	Jabones	200–260
	Caucho sintético	150–200
	Calor para procesos	120–180
	Precalentamiento de agua	60–90
Carne	Lavado, esterilización	60–90
	Cocinado	90–100
Bebidas	Lavado, esterilización	60–80
	Pasteurización	60–70
Harina y derivados	Esterilización	60–80
Madera y derivados	Termo-difusión	80–100
	Secado	60–100
	Agua precalentada	60–90
	Preparación de pulpa	120–170
Ladrillos y bloques	Curado	60–140
Plásticos	Preparación	120–140
	Destilación	140–150
	Separación	200–220
	Extensión	140–160
	Secado	180–200
	Mezclado	120–140

Existen varios procesos en la industria agroalimentaria que se llevan a cabo a temperaturas moderadas y que pueden ser fácilmente alcanzadas empleando sistemas de aprovechamiento de energía solar térmica sencillos como son los colectores planos con cubierta con los que se

pueden alcanzar entre 30°C y 80 °C y los colectores de tubos de vacío con los que se alcanzan entre los 50°C y 200°C (Mekhilef et al., 2011). Aunque con los colectores de tubos de vacío se pueden conseguir temperaturas más elevadas, su rendimiento es menor (máximo 65%) que el de los colectores de cubierta plana, y son recomendados parra lugares fríos en los que hay grandes diferencias entre la temperatura ambiente y la temperatura del colector (CENSOLAR, 2005). La incubación de huevos de aves se lleva a cabo a una temperatura en torno a los 37.5°C (Tabla 4), la cual es una temperatura fácilmente alcanzable mediante la utilización de energía solar térmica.

**Tabla 4. Temperaturas recomendadas y periodos de incubación delas aves de cría más comunes
(Fuente:www.elsitioavicola.com).**

Especie	Temperatura	Días de incubación
Gallina	37,4 - 37,6°C	21
Perdiz	37,4 - 37,8°C	23-24
Faisán	37,6 - 37,8°C	23-28
Codorniz	37,6 - 37,8°C	16-23
Pato	37,4 - 37,6°C	28
Ganso	37,4 - 37,6°C	28-32

2. Planteamiento del problema

La granja objeto del presente estudio es una explotación familiar de tamaño medio. Está dedicada a la cría y desarrollo de dos especies de interés cinegético: perdiz roja (*Alectoris Rufa*) y faisán (*Phasianus colchicus*). Los huevos de perdiz roja proceden de parejas productoras propias y los huevos de faisán son comprados a otros productores para su posterior incubación y cría.

La granja se divide en varias zonas:

- Zona de reproductoras: Jaulas con 692 parejas. Cada hembra pone un huevo cada 2 ó 3 días.
- Zona de incubación: Una sala cerrada sin climatización de 40m² contiene una incubadora Victoria I-36 (cuyas características técnicas se describen en la sección “Materiales y métodos”) con capacidad para 9072 huevos de perdiz, una nacedora Victoria H-12 (Figura 9 dcha.) para 3024 huevos de perdiz y una nacedora Danki (Figura 9 izq.) (LINCUI AVITEC S.L, modelo 3/3400, Valencia, España) con una capacidad de hasta 8840 huevos de perdiz.

Figura 9. Nacedora Danki (imagen izq.) y nacedora Victoria (imagen dcha.) situadas en la sala de incubación

- Zonas de cría: Hay dos zonas diferenciadas y ocupan la mayor extensión de la explotación. Cada parcela puede albergar en torno a los 2500 perdigones y constan de una zona cubierta (Figura 10) de unos 110 m², que está climatizada (mantenida a temperatura en torno a los 30°C) con calentadores que emplean gas butano y un terreno abierto cercado con maya. Los perdigones permanecen durante las 4 primeras semanas de crecimiento en la zona cerrada y la suelta se realiza de manera progresiva en la zona cercada, dependiendo de la climatología.

Figura 10. Ejemplo de sala de cría de perdices

- Zona de preparación y almacenamiento de piensos: la explotación posee silos para el almacenamiento de piensos y maquinaria para la preparación de sus propias mezcla de piensos.

La perdiz roja en libertad en la península ibérica, comienza a aparearse al final del invierno, cuando el clima empieza a suavizarse. La temperatura ambiente ideal para la cría está entre los 12 y 18°C. En este caso, la época de cría de la perdiz roja abarca desde la última semana de febrero hasta finales de junio, variando mucho tanto la cantidad de puesta de huevos como la incubabilidad de los mismos.

En la explotación se llevan a cabo entre 3 y 5 incubaciones al año durante ese periodo, suponiendo la incubación de entre 25000 y 36000 huevos de perdiz. En algunos casos se llevan a cabo incubaciones sin alcanzar el máximo de la capacidad de la incubadora, debido al ritmo de puesta de las reproductoras y a la necesidad de limitar el tiempo de almacenamiento de los huevos previo a su incubación (pérdida de incubabilidad directamente relacionada con el aumento del tiempo de almacenamiento).

Las incubadoras comerciales disponibles en la explotación emplean resistencias calefactoras para mantener la temperatura dentro del rango recomendado (entre 37°C y 37,8°C) durante 21 días (en la incubadora) las 24 horas del día. El funcionamiento de este tipo de resistencias (con una potencia media de 1,7 kW) conlleva un coste económico apreciable. Por ello se planteó la posibilidad de emplear energía solar térmica como energía de apoyo que permitiese reducir el tiempo de activación de las resistencias. Uno de los condicionantes introducidos por el responsable técnico de la explotación es la obligatoriedad de realizar el menor número de modificaciones posible en la incubadora comercial, de forma que no se alterase la funcionalidad original de la incubadora y no se afectase la actividad normal de la granja.

Una de las necesidades planteadas por el responsable de la explotación fue la de detectar posibles problemas durante el proceso de incubación y poder visualizar de algún modo que éste se está desarrollando de forma correcta mediante la definición de indicadores de actividad biológica que disparen algún tipo de alarma o se visualicen a través de una pantalla. En el estado inicial, durante la incubación, el productor debe confiar que el proceso de incubación se esté llevando adecuadamente, pero no puede detectar hasta el momento de la eclosión la aparición de problemas que conllevan retraso en el desarrollo del embrión o su muerte. Por ello se planteó la instalación de sensores de oxígeno y dióxido de carbono como herramienta de ayuda a la decisión para el productor y para la visualización de la marcha del proceso.

3. Antecedentes

Tanto el Laboratorio de Tecnologías Avanzadas en Sensores (LTAS) del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de la Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CENIM-CSIC), dirigido por el Doctor José Ignacio Robla Villalba, como el grupo de investigación de Técnicas Avanzadas en Agroalimentación (LPF-Tagralia) perteneciente a la E.T.S.I. de Ingenieros Agrónomos de la UPM, cuya responsable es en la actualidad la Doctora Belén Diezma Iglesias, llevan trabajando más de 15 años, en el desarrollo y caracterización de sensores basados en diferentes principios físicos, así como en su implementación en nuevas aplicaciones relacionadas con la industria agroalimentaria. Ambos grupos han participado en diversos proyectos de investigación, publicando los resultados obtenidos en numerosos trabajos científicos en congresos internacionales, revistas científicas, libros y tesis doctorales.

A continuación se refieren algunos de los proyectos más relevantes que suponen antecedentes directos del trabajo abordado en el marco de la presente Tesis Doctoral y que comprenden el desarrollo e implementación de sensores para la monitorización de procesos, la modelización de procesos y el empleo de energía solar, en el ámbito de la industria agroalimentaria; se resaltan en **negrita** los proyectos en los cuales el Doctorando ha participado activamente:

- “Desarrollo de sistemas de supervisión de la evolución post-recolección de frutas: sensores de gases. **SENSOGASES**” (Ref.: CAM 07G/0015/2003-1). Financiado por la Comunidad de Madrid en el año 2003.

- “Desarrollo de sistemas de supervisión de la evolución post-recolección de frutas y hortalizas mediante matrices de sensores basados en diferentes principios de detección. SENSOFRIGO (MCYT AGL2003-06073-C02-02), financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, durante el periodo 2003 a 2006.
- “Metodología y técnicas avanzadas para el análisis y control de las características de calidad y seguridad de los alimentos. TAGRALIA-CM” CAM S-0505/AGR/0187. Financiado por la Comunidad de Madrid, en el periodo 2005-2008.
- **“Sensórica Inteligente para el Control de la Calidad en Línea de Procesos Alimentarios. SMART-QC” (AGL2008-05267-C03-03); financiado por el Ministerio de ciencia e Innovación. Periodo 2009-2011.**
- **“Supervisión automatizada de secaderos de madera con aporte solar térmico con sensores de bajo coste” (Códigos: A/9586/07 y A/019197/08) financiados por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo en el año 2008-2009.**
- **“Plataforma de Control Logístico Avanzado para el Seguimiento de la Cadena de Frío de Productos Sanitarios y Agroalimentarios. CLARISA” (TSI-020100-2009-851), financiado por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, a través del plan Avanza en el periodo 2009-2011**
- **“Optimización de la eficiencia energética de un secadero solar mediante el almacenamiento de energía utilizando calentadores solares de agua. Desarrollo de aplicaciones en productos de interés agroindustrial” (Códigos: A/024307/09 y A/030569/10) financiados por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo en el periodo 2010-2012.**

La colaboración directa del doctorando en los mencionados proyectos ha resultado en su participación en diversas publicaciones, citándose a continuación las llevadas a cabo en artículos en revistas indexadas en el Journal Citation Reports (JCR):

- Eva Cristina Correa Hernando; Francisco Javier Arranz Saiz; Belén Diezma Iglesias; Eduardo Juliá; Robla José Ignacio; Luis Ruiz García; **Javier García-Hierro**; Pilar Barreiro Elorza. Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer. Computers and Electronics in Agriculture. 78 - 2, pp. 167 - 175. 09/2011. ISSN 0168-1699.
- R. Badía-Melis, **J. García-Hierro**, L. Ruiz-García, T. Jiménez-Ariza, J.I. Robla, P. Barreiro. (2014) Assessing the Dynamic Behavior of WSN Motes and RFID Semi-Passive Tags for Temperature Monitoring. Computers and Electronics in Agriculture 103: 11-16

- Badía-Melis, R.; Ruiz-Garcia, L.; **Garcia-Hierro, J.**; Villalba, J. Refrigerated Fruit Storage Monitoring Combining Two Different Wireless Sensing Technologies: RFID and WSN. Sensors 2015, 15(3), 4781-4795; doi:10.3390/s150304781.

4. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es la implementación de un sistema de apoyo mediante energía solar térmica con una herramienta de ayuda a la decisión que permita una mejor planificación de las actividades de cría, integrados en un sistema comercial para la incubación de huevos de perdiz.

Los objetivos específicos planteados son:

- Caracterización espacial de variables relevantes en la incubadora comercial durante el proceso de incubación (T, HR)
- Determinación de las relaciones existentes en la evolución de variables ambientales relevantes (T, HR y composición de la atmósfera) durante el proceso de incubación y la tasa de éxito. Generación de indicadores para la ayuda a la decisión.
- Evaluación del sistema de apoyo solar térmico para determinar su potencial de utilización durante las incubaciones comerciales. El cumplimiento de este objetivo comprende la determinación de parámetros de eficiencia, capacidad y autonomía en relación a las necesidades durante la incubación.

5. Estado del Arte

5.1. Proceso de incubación: factores físico-químicos

Durante el proceso de incubación de aves, a lo largo del cual se produce el desarrollo del embrión, existen factores determinantes que determinan el éxito del proceso, como son la temperatura, humedad relativa del aire y la composición gaseosa del ambiente. Estos factores tienen efecto sobre parámetros que determinan la calidad de la incubación (Figura 11).

Existen diversos parámetros que determinan la calidad de la incubación como son la tasa de nacimientos, el tiempo de incubación y el tamaño del pollo al nacer. Para determinar cómo afectan los factores ambientales, durante el proceso de incubación se miden determinados aspectos fisiológicos de los embriones, como son la composición gaseosa de la cámara de aire del huevo (O_2 y CO_2), PH de la sangre, los niveles hormonales en sangre (triyodotironina, tiroxina y corticosterona), reserva de glucógeno en el hígado, metabolitos en sangre (bicarbonato, lactato, glucosa, hematocrito, potasio, calcio, ácido úrico) y la cantidad de yema residual (Everaert et al., 2008; Gillespie and McHanwell, 1987; Han et al., 2011; King'ori, 2011; Maatjens et al., 2014a; Maatjens et al., 2014b; Peebles et al., 2001).

Figura 11. Influencia de los factores ambientales sobre distintos parámetros de calidad de la incubación (elaboración propia)

5.1.1. Temperatura

Ya en el siglo XIX, Fere (1894) publicó un estudio sobre la influencia de la temperatura en el proceso de incubación de pollos. Estudios iniciales de Romanoff (1934; 1935, 1936; 1960) demostraron que la temperatura influye en la velocidad de desarrollo del embrión y por lo tanto en el tiempo necesario para llevar a término la incubación, así como en la tasa final de nacimientos. La mayoría de las especies avícolas tienen una temperatura óptima de incubación de entre 37 y 38°C y pequeñas desviaciones de ese rango pueden tener un importante impacto en la tasa de nacimientos y en el correcto desarrollo embrionario (Wilson, 1991).

La temperatura óptima de incubación es definida como la requerida para conseguir la máxima tasa de nacimientos. Es necesario distinguir entre la temperatura de trabajo de la incubadora y la temperatura del huevo. En el sector de la producción avícola cuando se habla de temperatura de incubación, se refiere a la temperatura a la cual se mantiene la incubadora; pero como se ha visto en diversos trabajos científicos, esa temperatura difiere de la temperatura real del huevo. El huevo, como organismo vivo, tiene una producción de calor metabólico que hace variar su temperatura. Una forma no invasiva, que no provoca la muerte del embrión y aporta una temperatura aproximada del mismo es la medición de la temperatura del cascarón. Lourens (2001) encontró una temperatura media del cascarón de

37,8 °C con fluctuaciones de $\pm 5^{\circ}\text{C}$ dependiendo del estado de la incubación y de la posición del huevo en una incubadora comercial. French (1997) describió un modelo simple que describe la relación entre la temperatura del embrión, la temperatura de la incubadora, la producción de calor por el desarrollo embrionario y la conductividad térmica del huevo y el ambiente que le rodea. Según este modelo, la temperatura del embrión en desarrollo depende de 3 factores:

- la temperatura de la incubadora
- la facilidad de transferencia de calor entre la incubadora y el embrión
- el calor metabólico

El balance energético de la incubación ha sido modelizado por Kashkin (1961); Meijerhof and van Beek (1993); Sotherland et al. (1987); Turner (1991, 1994). Una forma simple de dicho modelo define:

$$T_{\text{huevo}} = T_{\text{inc}} + \frac{(H_{\text{emb}} - H_{\text{agua}})}{K_{\text{huevo}} \cdot S_{\text{huevo}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, T_{huevo} y T_{inc} son la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del huevo e incubadora, respectivamente, H_{emb} y H_{agua} son el calor producido por los embriones (W) y el calor perdido por la evaporación de agua (W), K_{huevo} es la conductancia térmica del huevo ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$) y S_{huevo} es la superficie media del huevo (m^2).

Por otro lado, la pérdida de calor por evaporación del agua es aproximadamente de 580 cal/g de agua (Schmidt-Nielsen, 1975) y la producción de calor de los embriones puede ser medida directamente midiendo la temperatura del cascarón o estimada en base al consumo de O_2 . Al inicio de la incubación no existe apenas desarrollo embrionario y por ello $T_{\text{huevo}} < T_{\text{inc}}$; ya que $H_{\text{emb}} < H_{\text{agua}}$, sin embargo al final del proceso de incubación $H_{\text{emb}} \gg H_{\text{agua}}$ y por lo tanto $T_{\text{huevo}} > T_{\text{inc}}$ (French, 1997). En el trabajo de Lourens et al. (2005) se describe como durante aproximadamente los primeros 6 días la temperatura de la incubadora es mayor que la de los huevos (en torno a $0,2^{\circ}\text{C}$) para posteriormente invertirse y llegar al final de la incubación con una T_{huevo} de $0,5^{\circ}\text{C}$ mayor que T_{inc} . Actualmente los trabajos que estudian la influencia de la temperatura en el proceso de incubación de aves, toma como referencia la temperatura del cascarón de huevo y es necesario una continua actuación sobre el control de la incubadora para corregir la temperatura de la misma y poder mantener T_{huevo} constante.

El trabajo de Molenaar et al. (2011), señala una reducción de un 10% de la tasa de nacimientos y de un 2% en el tiempo de incubación al aumentar 1°C la temperatura entre los días 7 y 19 de la incubación. Existen numerosos estudios sobre los efectos de pequeñas desviaciones frente al rango de temperatura óptima, que sobre todo se centran en temperaturas superiores a la recomendada durante la última semana de incubación. Durante

los primeros días de incubación el embrión es más resistente a esas pequeñas variaciones de temperatura. En resumen (Tabla 5), temperaturas por encima de la óptima durante los últimos días de incubación, provocan una reducción de la tasa de nacimientos y del tiempo necesario para la eclosión. Además el pollo recién nacido tiene un menor peso y sus órganos son de menor tamaño. Por el contrario, cuando la temperatura durante los últimos días de incubación es inferior a la óptima, aumenta el tiempo necesario para la eclosión, pero no afecta apreciablemente a la tasa de pollos nacidos ni al peso del pollo.

Tabla 5. Resumen de trabajos más relevantes sobre la influencia de la temperatura del huevo (cascarón) en el proceso de incubación de aves

Autor principal	Año	Diferencial frente a temperatura de control (días incubación)	Resultados relevantes
Lourens	2005	-1.1°C d1-7	Reduce hasta un 3.7% la tasa de nacimientos y un 2% el tamaño del pollo al nacer
		+1.1°C d15- 21	Reduce hasta un 7.8% la tasa de nacimientos. No hay una reducción relevante en el peso del pollo al nacer
Joseph	2006	-1.1°C d0-10	Reduce la tasa de nacimientos e incrementa el tamaño relativo del corazón y peso del pollo al nacer.
		+1.7°C d18-21	Altas T (en los tres últimos días de incubación) producen los efectos contrarios
Leksrisompong	2007	+1.3°C d14-21	Reducción del tiempo de incubación y disminución del peso del corazón
Lourens	2007	+1°C d9-19	Reduce el tiempo de incubación, el peso del pollo y el peso relativo del corazón
Tona	2008	+2°C 3h/día d16-18	No tiene efectos apreciables en la tasa de nacimientos pero sí que prolongó el tiempo de incubación, así como afectó a algunos parámetros fisiológicos
Willemssen	2010	+3°C d16-18.5	Una T tan elevada aumenta la mortalidad de los pollos y reduce el tamaño de los pollos nacidos y retrasa el nacimiento.
		-3°C d16-18.5	No afecta ni al tamaño ni a la tasa de nacimientos de los pollos, pero sí que retrasa también el nacimiento
Molenaar	2011	+1°C d7-19	Reduce la tasa de nacimientos desde un 96.8% a un 86.9%. En cambio reduce el tiempo de incubación un 2%
Maatjens	2014	+1°C d19-21	Un aumento de T provoca aumento de la concentración de glucógeno en el hígado tanto en el instante del “internal piping”, como en el nacimiento y a las 12h de vida con respecto a la T baja y normal. También produce una menor concentración de hematocrito y mayor de potasio en el nacimiento.
		-1°C d19-21	La baja temperatura provoca los efectos contrarios

La mayor parte de los trabajos publicados sobre la influencia de la temperatura en el proceso de incubación de aves, se refieren al desarrollo de embriones de gallina (*Gallus gallus*).

Los trabajos de (González-Redondo et al., 2012; Seperas, 1992) señalan que la temperatura óptima de incubación de la perdiz roja (*Alectoris rufa*) es de 37,8 °C durante 20 días en la incubadora y de 37,2-37,4°C los últimos 3 días en la nacedora.

5.1.2. Humedad Relativa

La HR es un factor determinante durante el proceso de incubación ya que influye en la pérdida de agua del huevo y por lo tanto en el desarrollo del embrión (Tabla 6). La pérdida de agua del huevo por evaporación es esencial para crear una cámara de aire suficiente que permita la ventilación pulmonar embrionaria después del picado interno.

La pérdida de masa en los huevos durante la incubación se debe esencialmente a la pérdida de agua (la pérdida total al final del proceso es del 15% del peso inicial del huevo). Según el trabajo de Ar and Rahn (1980), la fracción de agua que contienen los huevos de distintas especies es muy similar: 83% en especies altriciales, 83% en semi-altriciales, 78% en semi-precociales y 72% en precociales². Según el mismo autor, se consigue la mayor tasa de nacimientos en huevos de gallina cuando la cantidad total de pérdida de agua del huevo está entre el 12% y el 14% en el día 18 de incubación. La mortalidad del embrión aumenta cuando la pérdida de agua es inferior al 9,1% (Buhr, 1995; Davis and Ackerman, 1987) o superior al 18,5% (Buhr, 1995; Davis and Ackerman, 1987; Davis et al., 1988; Packard and Packard, 1993; Tullett and Burton, 1982). Se puede actuar sobre la pérdida de agua de los huevos mediante la modificación de la T o bien sobre la HR durante la incubación. La temperatura óptima de incubación ya se ha abordado en el anterior punto. Para aumentar la pérdida de agua de los huevos es necesario reducir la humedad relativa de la incubadora. Se puede establecer que la HR de la incubadora influye en la T del embrión porque la energía necesaria para evaporar el agua a través del cascarón es sustraída del huevo (van der Pol et al., 2013). Esto significa que puede incrementarse la pérdida de calor en huevos incubados a baja humedad relativa frente a alta, y por lo tanto variaciones en la humedad relativa

² En zoología los términos altricial, semi-altricial, semi-precocial y precocial, se refieren a determinadas características de las crías en el momento del nacimiento.

Altricial: crías que nacen ciegas, sin los conductos auditivos abiertos, sin pelo o pluma y con una movilidad muy limitada.

Semi-altriciales: crías sin movimiento al nacer, con los ojos abiertos al nacer o a los pocos días del nacimiento

Semi-precociales: crías con algo de movimiento al nacer, pero permanecen en el nido y son alimentados por sus progenitores

Precociales: crías que abandonan el nido momentos después del nacimiento y pueden alimentarse por sí mismas casi inmediatamente después del nacimiento.

requieren distintas temperaturas de funcionamiento de la incubadora para mantener constante la T del embrión.

En algunos trabajos que estudian los efectos de la HR sobre la tasa de nacimientos y la calidad del pollo, la temperatura de la incubadora se mantiene constante y varía la humedad relativa (Buhr, 1995; Davis et al., 1988; Hoyt, 1979; Tullett and Burton, 1982) . Los efectos observados pueden deberse, según se ha explicado anteriormente, a que provoca una variación en la T del huevo alejándolo de la temperatura óptima. Para establecer correctamente los efectos de la HR, la T de la incubadora se debe variar para mantener constante la T del huevo.

La HR recomendada para la incubación de huevos se encuentra en torno al 55-60% durante la etapa de incubación y entre el 70-75% en la etapa de nacimiento. Es necesario elevar la HR durante los últimos días del proceso ya que es necesario evitar el desecamiento de las membranas de la cáscara y del plumón de las crías en fase de eclosión. Peebles et al. (2001) sugirieron que existe una depresión en la embriogénesis cuando se reduce la HR al 43%. Según los autores, esto puede acentuar un desarrollo inadecuado después de la eclosión y también puede determinar problemas de calidad y desarrollo de los polluelos, causados por la humedad alta o baja en la incubadora. Debido a las diferentes características del cascarón de los huevos de gallinas ponedoras jóvenes o maduras, en particular en lo que se refiere a la conductancia, Tullett and Burton (1982) y French and Tullett (1991) sugieren la posibilidad de ajustar la HR en función de la edad de las ponedoras. De acuerdo con Vick et al. (1993), las mejores HR para la incubación de huevos de reproductoras de pollos de engorde, jóvenes y maduras, son 50 y 58%, respectivamente. Esto se debe a que la cáscara de huevo de las ponedoras jóvenes ofrece una mayor resistencia a la difusión de gases y vapor de agua que la de los huevos de ponedoras viejas. Según Decuyper et al. (2003) y Meir and Ar (2008), una HR demasiado baja, provoca una pérdida excesiva de humedad de los embriones, perjudicando al proceso de eclosión y resulta en polluelos pequeños y deshidratados. Por otro lado, si la HR es demasiado alta, los embriones tienden a eclosionar precozmente. En casos extremos, los polluelos pueden eclosionar antes de alcanzar su pleno desarrollo. King'ori (2011) señala que las consecuencias indeseables de la utilización de niveles inadecuados de HR durante el proceso de incubación también pueden extenderse al período de cría de las aves de corral, ya que la calidad de los polluelos se ve comprometida.

Tabla 6. Resumen de trabajos sobre la influencia de la HR en el proceso de incubación

Autor principal	Año	HR (%) (días de incubación)	Resultados relevantes
Peebles	2001	43 (d16-21) 53 (d0-21)	Cambios en la HR entre el 43% y 63% dificulta la embriogénesis sin tener efectos sobre la humedad del embrión ni efectos consistentes sobre el contenido en grasa cruda y proteína del embrión.

		63 (d16-21)	
		43 (d17-21)	
Bruzual	2011	53 (d0-21)	No se apreció influencia de la HR durante la incubación en la tasa de nacimiento, pero sí que se observó una mortalidad mayor en pollos incubados a baja HR durante los primeros días de crianza.
		63 (d17-21)	
Van der Pol	2013	30-35 (d0-18)	Baja HR provoca un aumento de la pérdida de peso del huevo (+3%) y decrece la tasa de nacimientos (-2,9%) comparada con la HR alta. En cambio no produce cambios en la duración de la incubación y en la calidad del pollo nacido
		55-60 (d0-18)	
Barbosa	2015	48 (d0-21)	Los mejores resultados de tasa de nacimientos se obtienen con HR del 56% independientemente de la edad de las progenitoras. HR por debajo o por encima del 56% reducen la tasa de nacimientos. El peso del pollo al nacer no sufre diferencias significativas, pero la ganancia de peso a las 12 semanas aumenta cuando la HR de incubación es mayor.
		56 (d0-21)	
		64 (d0-21)	

5.1.3. Intercambio de Gases

El intercambio de gases se ha mostrado como un factor muy relevante durante la incubación, siendo fundamental para el desarrollo del embrión. La concentración de gases como el O₂ y el CO₂ en la atmósfera alrededor de los huevos durante su almacenamiento e incubación incide directamente sobre la supervivencia del embrión y el número de pollos finalmente nacidos. Estudios recientes sugieren que los requerimientos de gases por parte de los embriones en desarrollo varían durante la incubación (Onagbesan et al., 2007). El intercambio gaseoso entre el embrión y la atmósfera se produce a través de la membrana corioalantoidea (Figura 12 y Figura 13), que es una estructura altamente vascularizada, en conjunción con la porosidad de la cáscara. Ambas estructuras permiten el intercambio de O₂ y CO₂ entre la atmósfera y la sangre del embrión. Este intercambio resulta de fundamental importancia para el desarrollo del embrión durante la incubación y puede afectar la viabilidad del embrión (Tullett, 1990). Existen diversos estudios en pollos que han intentado establecer los niveles óptimos de gases durante los distintos periodos de incubación que permitan un desarrollo óptimo del embrión.

Figura 12. Transición de la membrana corioalantoidea a la respiración pulmonar (Fuente: www.bmeditores.mx)

Figura 13. Vista interna de un huevo de ave (Fuente: www.infovisual.info)

➤ El papel del oxígeno durante la incubación

Durante la incubación, el consumo de oxígeno por parte del huevo se incrementa exponencialmente durante las dos primeras semanas de rápido crecimiento del embrión (Gefen and Ar, 2001). Múltiples trabajos han valorado los efectos de la hipoxia o hiperoxia en distintas fases de la incubación de huevos de gallina, cuyos resultados han demostrado un incremento de la tolerancia a ambas durante el transcurso de la incubación. Los efectos de la hipoxia son especialmente perniciosos cuando se producen en las primeras fases de la incubación: los primeros estudios realizados (Cruz and Romanoff, 1944; Taylor et al., 1956) revelaron una elevada sensibilidad de los huevos en fases tempranas de la incubación (d1-5 y d1-4 respectivamente) a niveles de hipoxia moderados ya que el número de nacimientos se veía reducido por debajo de un 18% de O_2 , agudizándose en concentraciones de hipoxia aguda (por debajo del 10% de O_2) en las que se produce una muerte de embriones significativa.

En fases posteriores de la incubación (d5-8 y d9-12), los estudios realizados por Taylor and Kreutziger (1965) (1966) determinaron que el número de nacimientos se veía afectado con

concentraciones de O_2 por debajo del 15%, con graves efectos por debajo del 12,5% lo que sugiere un aumento de la tolerancia a la hipoxia a medida que la incubación se acerca a la mitad de su duración. Durante el siguiente periodo de incubación (d13-16) el cambio más notable es el incremento de tolerancia a la hiperoxia ya que los huevos pueden tolerar niveles de O_2 de hasta un 85% sin que se vea afectada la tasa de nacimientos (Taylor and Kreutziger, 1969). Éste es el periodo en el cual los huevos son capaces de tolerar mayores concentraciones de oxígeno durante la incubación. Durante la última fase de la incubación (d17-21) niveles de O_2 por debajo del 16% producen un retraso en el crecimiento embrionario y reducen la tasa de nacimientos (Taylor et al., 1971).

➤ *El papel del dióxido de carbono durante la incubación*

El CO_2 es liberado de forma natural por los huevos durante la incubación. En una primera fase la principal fuente es el reservorio del albumen, siendo la producción metabólica por parte del embrión limitada, y posteriormente la principal fuente de emisión de CO_2 pasa a ser la actividad metabólica del embrión (Onagbesan et al., 2007), siendo la emisión procedente del albumen limitada con respecto a la primera. Los estudios realizados por Taylor y colaboradores (Taylor and Kreutziger, 1965, 1966, 1969; Taylor et al., 1971; Taylor et al., 1956) demuestran que los embriones de pollo soportan niveles de hipercapnia más elevados según avanza el proceso de incubación. Así, los niveles de CO_2 necesarios para reducir la tasa de nacimientos se van incrementando durante la incubación desde un 1% durante los primeros días de incubación, pasando al 3% entre los días tres a cinco, 6% entre los días nueve a doce, 8% entre los días trece a dieciséis para mantenerse hasta el final de la incubación en más de un 7%. En este sentido, existen trabajos recientes que indican que concentraciones de CO_2 por encima del 4% durante la segunda mitad del proceso de incubación no tienen incidencia en el crecimiento del embrión y en la tasa de nacimientos, pero sí que determinan el futuro desarrollo del pollo, reduciendo su tamaño (Everaert et al., 2007; Everaert et al., 2012).

Estudios más recientes han mostrado que un incremento gradual de CO_2 hasta el 1,5% durante los primeros diez días de la incubación acelera el crecimiento del embrión, adelantan el momento de nacimiento y mejoran la tasa de nacimiento en huevos de gallina y pavo (Buys et al., 1998; De Smit et al., 2008; De Smit et al., 2006; Gildersleeve and Boeschen, 1983; Tona et al., 2007).

➤ *Interacción entre los niveles de oxígeno y dióxido de carbono durante la incubación*

El estudio llevado a cabo por Andrewartha et al. (2011) demuestra la interacción existente entre los niveles de O_2 y CO_2 , analizando los ritmos cardíacos de embriones sometidos a

diferentes condiciones de hipoxia y combinadas con hipercapnia, determinando elevados índices de mortalidad cuando se combinan condiciones de hipoxia e hipercapnia severas.

➤ *Concentración de gases como estimador indirecto de la actividad metabólica*

Diversos estudios apuntan a que el consumo de oxígeno durante el proceso de incubación en aves está íntimamente relacionado con la actividad metabólica del embrión y ésta a su vez con la masa del embrión en un tiempo dado, siendo el consumo instantáneo de oxígeno por unidad de masa un parámetro característico de cada especie (Hoyt and Rahn, 1980), y a su vez con la tasa de crecimiento del embrión (Pearson et al., 1996). Adicionalmente, y debido a que prácticamente todo el combustible metabólico empleado por parte del embrión para su crecimiento es la grasa, la cantidad de dióxido de carbono producido durante el metabolismo es proporcional a ésta actividad metabólica (Hoyt and Rahn, 1980). Existe correlación entre el consumo de O_2 y la producción de calor metabólico (French, 1981), el cual se ha estimado en 4,69 kcal por litro de O_2 consumido (Vleck and Vleck, 1980). La producción de calor en una incubación a temperatura normal, calculada en base al consumo de oxígeno, la masa del huevo y su capacidad calorífica, sigue una función exponencial (Tzschentke, 2008).

No se han encontrado estudios en la bibliografía dedicados a la estimación de la actividad metabólica a partir de los niveles de O_2 y CO_2 presentes en la incubadora pero sin duda presentan un claro potencial si resulta posible valorar los posibles efectos de renovación de aire o la producción de CO_2 derivada del reservorio en el albumen.

5.2. Utilización de energía solar en procesos agroalimentarios

En las últimas décadas se ha introducido de forma satisfactoria el empleo de energías renovables en aplicaciones domésticas y en edificios. En la actualidad se introducen normativas estatales para regular el empleo de energía solar térmica en la construcción de nuevos edificios. El uso a nivel industrial no está habitualmente establecido debido a la inseguridad que genera en el sector (Philibert, 2006).

De los 58 trabajos revisados publicados entre 2005 y 2015, cabe destacar una gran parte dedicados al análisis de la viabilidad de introducir el aporte de energía solar en la climatización de invernaderos (18 de ellos), 22 se han dirigido al análisis de secado mediante energía solar (9 a secado de cereales, 7 a secado de madera y 6 al proceso de secado en general). Desde el año 2005 se han publicado 6 trabajos relacionados con el empleo de energía solar para la calefacción de granjas de cría de pollos y 3 enfocados al diseño de incubadoras solares de huevos.

Satisfacer la demanda de un suministro de alimentos de alta calidad en un contexto de cambio climático y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero

presenta un gran desafío para la comunidad agrícola (Caslin et al., 2011). La gestión de los recursos de energía juega un papel clave para evitar problemas ambientales, y por lo tanto, la combinación de mejoras de eficiencia energética y el desarrollo e implementación de las energías de tipo renovable tienen que ser aceptados por la industria agroalimentaria (Quijera et al., 2011). Existen diversos sectores de la industria agroalimentaria donde se trabaja para introducir la tecnología solar térmica, como son el secado de cereales, frutas y madera, en el sector de la producción de leche, la calefacción de invernaderos y para la calefacción de salas de pollos de engorde. Sharma et al. (2009) destacan el potencial de uso de la energía solar para el secado de cereales y frutos, particularmente en países en desarrollo. La tecnología de secado en países industrializados requiere grandes instalaciones con un coste elevado que los productores de los países en desarrollo no pueden afrontar. Es por ello que las áreas en las que inicialmente puede ser interesante la penetración de esta tecnología pueda ser el secado en pequeñas explotaciones de cultivo de tabaco, té, café, uvas pasas, cardamomo, chiles, semillas de cilantro, jengibre, cúrcuma, pimienta negra, cebolla, y ajo, etc. Existen distintas tipologías de secaderos solares dependiendo de la forma de circulación del aire, el tipo de transferencia de calor y la forma del secadero (Figura 14).

Figura 14. Clasificación de los secaderos y modos de calentamiento, según Leon et al. (2002)

Existe un amplio número de trabajos sobre el empleo de energía solar en la climatización de invernaderos en los que se consigue un importante ahorro energético frente a las fuentes de energía tradicionales. En este sentido, un trabajo reciente de Bouadila et al. (2014) consigue un ahorro de un 30% de energía en los periodos nocturnos mediante el empleo de energía solar con acumulación de calor latente en un invernadero situado en Túnez.

5.2.1. Temporalidad, potencia y temperatura de uso.

La energía solar es una fuente de energía limpia, segura y gratuita disponible en la totalidad de la superficie terrestre. La radiación solar es una fuente de energía periódica con fuertes variaciones diarias y su utilización requiere la incorporación de sistemas de almacenamiento para su funcionamiento en periodos nocturnos (Enibe, 2002). La radiación solar incidente

depende de las condiciones ambientales, la época del año y de la zona geográfica. En el caso de la energía solar térmica (aprovechamiento de la radiación solar para el almacenamiento de calor), se han sugerido diversos sistemas de almacenamiento de dicho calor (Duffie and Beckman, 1980), como son el almacenamiento en forma de calor sensible (agua, rocas, etc.), almacenamiento de calor mediante reacciones químicas reversibles o el almacenamiento mediante calor latente de materiales con cambio de fase (parafinas, sales inorgánicas hidratadas y ácidos grasos).

La ubicación, el tipo de colector, el fluido de trabajo, el tamaño del sistema y el volumen de almacenamiento son los factores que deben tenerse en cuenta para aplicaciones específicas para determinar el tamaño del intercambiador de calor y la carga (Kalogirou, 2003; Mekhilef et al., 2011). Los colectores solares comerciales emplean aire o agua como medio de transferencia de calor. Sin embargo, cada colector está dedicado a una aplicación específica. Tanto los colectores solares de tipo de placa plana y del tipo de tubos de vacío están diseñados para ser utilizados en aplicaciones de temperatura baja o media (30-200°C).

5.2.2. *Aplicación a la industria avícola*

El uso de fuentes renovables de energía durante el proceso de incubación ayudará a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la cadena de producción en la industria de aves de corral (Pelletier, 2008).

Se ha incidido mucho en el estudio de la climatización de salas de cría de pollos empleando sistemas de aporte de energía solar. Los primeros trabajos se realizaron en una época de crisis energética (alza en los precios del petróleo) e incremento de la preocupación medioambiental. Los trabajos de Brewer et al. (1978, 1981); Brewer et al. (1975); Flood et al. (1981); Flood et al. (1979) y Reece (1981) se centran en cálculos de ahorro energético y económico sin profundizar en el diseño y simulación. Según las recomendaciones de ASHRAE (2011) y ASABE (2008) sobre la cría de pollos, se requiere una temperatura de entre 30°C y 33°C durante la primera semana de vida, decreciendo paulatinamente esta temperatura hasta los 21°C a la sexta semana de vida. Reece (1981) muestra un ahorro de entre un 73% y un 95% de la energía consumida (originalmente empleando gas licuado de petróleo) en una granja de pollos de engorde; con una superficie instalada de 6,7m² de paneles solares de placa plana por cada 1000 pollos.

En un trabajo reciente, Fawaz et al. (2014) implementó con éxito un sistema de aporte de energía solar, basado en un concentrador parabólico, para la calefacción y ventilación de gallineros. Con temperaturas externas en torno a 6°C se consiguió un ahorro medio de energía (basada originalmente en gasóleo) del 74%. El porcentaje de carga energética que cubrió el sistema de aporte de energía solar estuvo en el rango entre el 73,8% y el 91,9%.

Kapica et al. (2015) han simulado la climatización de salas de cría de pollos empleando energías renovables en la zona de centro Europa, para la reducción de la huella de CO₂. Para una granja con capacidad para 2400 aves, situada en Lublin (Ucrania), determinaron que para cubrir la práctica totalidad de la energía necesaria necesitarían una superficie colectora de 80m² o una turbina de 20m de diámetro. Es muy interesante el trabajo de Cordeau and Barrington (2011) en el cual se emplearon colectores solares sin aislamiento de vidrio para precalentar el aire de entrada a granjas de cría de pollos en Canadá, con capacidad para hasta 6400 pollos, consiguiendo un ahorro energético de hasta el 64,1% durante los meses de noviembre y diciembre.

La incubación de aves necesita temperaturas relativamente bajas (37-38°C), que se pueden alcanzar fácilmente con sistemas de calefacción solar. La incubación de huevos empleando energía solar se ha estudiado fundamentalmente en África, donde el acceso a energía eléctrica es deficiente y su precio es elevado para pequeños productores. En este sentido, se han realizado varios estudios centrados en el diseño y construcción de incubadoras con aporte de energía solar, tanto térmica como fotovoltaica. Kisaalita et al. (2010) diseñaron con éxito un sistema de aporte de energía fotovoltaica para la alimentación de incubadoras comerciales de pequeño tamaño (para entre 70 y 90 huevos) con el fin de abastecer a granjeros de pequeña producción en la zona centro-africana. Kuye et al. (2008) construyeron un prototipo de incubadora para 30 huevos empleando un colector solar de plano con acumulación de agua caliente. Por otro lado Bolaji (2008), diseñó una cámara de incubación (con forma similar a las cámaras de secado de fruta y cereales) atemperada exclusivamente con aire caliente (Figura 15) que emplea un colector plano con un área efectiva de absorción de 0,66m² y almacenamiento de calor en rocas.

1) Chimenea de ventilación, 2) Cámara de incubación, 3) Entrada aire caliente a incubadora, 4) Cubierta transparente del colector, 5) Entrada de aire al colector, 7) Patas, 8) Controlador del flujo de aire caliente, 9) Colector solar

Figura 15. Incubadora con aporte de energía solar térmica empleada por Bolaji (2008)

Durante los periodos nocturnos o sin radiación solar, el calor almacenado en las rocas es transmitido al aire que es conducido hacia la cámara de incubación, consiguiendo una eficiencia térmica del colector del 68,7% y una tasa de nacimientos del 78,8% (Bolaji, 2008). En los trabajos analizados, se aprecia la ausencia de un seguimiento exhaustivo del funcionamiento de la incubadora durante todo el proceso. A día de hoy es interesante el rediseño de incubadoras comerciales de pequeño y mediano tamaño con las modificaciones necesarias para acoplar sistemas de aporte de energía solar que reduzcan el consumo de energía eléctrica, y/o se empleen en la producción de especies de interés cinegético en zonas con acceso limitado a la energía eléctrica.

6. Estructura del Documento

Este documento estructura la labor de investigación de esta Tesis Doctoral: 9 trabajos que aportan la metodología necesaria para trabajos posteriores y 4 artículos con resultados relativos al empleo de redes de sensores y a la incubación de huevos con aporte solar térmico (Tabla 7). La primera publicación data de 2010 y las últimas están previstas para 2016. El avance de la Tesis corresponde cronológicamente con el desarrollo de 4 proyectos de investigación, ya referidos en antecedentes, de ahí la amplia variedad de métodos desarrollados relacionados con: el desarrollo de sensores inteligentes y herramientas de análisis de entornos climatizados, el análisis de la respuesta dinámica de sensores de temperatura y el desarrollo de sensores e instrumentación para procesos con aporte solar térmico. Por otra parte, las publicaciones relacionadas con los resultados más relevantes de esta Tesis se refieren al diseño y análisis de una incubadora comercial y adaptación para un aporte solar térmico.

Las publicaciones originales más relevantes se han incluido en anejos, mientras que este documento se ha diseñado con una estructura tradicional, donde todos los materiales y métodos están aglutinados en un solo capítulo, procediéndose de forma análoga para los resultados.

Tabla 7. Publicaciones derivadas del desarrollo de la Tesis Doctoral.

Ámbito de trabajo	Publicaciones
Desarrollo de sensores inteligentes y herramientas de análisis de entornos climatizados	<ul style="list-style-type: none"> - Badia-Melis, R.; Ruiz-Garcia, L.; Garcia-Hierro, J.; Villalba, J. Refrigerated Fruit Storage Monitoring Combining Two Different Wireless Sensing Technologies: RFID and WSN. <i>Sensors</i> 2015, 15(3), 4781-4795; - P. Barreiro, E. Correa-Hernando, F.J. Arranz, B. Diezma, L. Ruiz-Garcia, M. Villarroel, J.I. Robla, J. Garcia-Hierro (2011). Smart Sensing Applications in the Agriculture and Food Industry. In: Smart Sensors and Sensing Technology. Nova Science Publishers, Nueva York, EEUU, pp. 1-33. ISBN 978-1-61209-242-3 - J. Garcia-Hierro, P. Barreiro, L. Ruiz-Garcia, J.I. Robla. Development of Smart Sensing Devices for Ubiquitous Supervision of the Cold Chain: Application to Persishable Commodities. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 2010. Clermont-Ferrant (Francia) - H.T. Jiménez, J. Garcia-Hierro, B. Diezma, P. Barreiro, E. Correa Hernando, J.I. Robla Registro y análisis del historial térmico durante el almacenamiento y el transporte refrigerado de productos mínimamente procesados. VI Congreso Ibérico de AgroIngeniería, 5 al 7 de Septiembre de 2011, Évora, Portugal.
Análisis de la respuesta dinámica de sensores de temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - R. Badía-Melis, J. García-Hierro, L. Ruiz-García, T. Jiménez-Ariza, J.I. Robla, P. Barreiro. (2014) Assessing the Dynamic Behavior of WSN Motes and RFID Semi-Passive Tags for Temperature Monitoring. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> 103: 11-16 - R. Badia-Melis; J. Garcia-Hierro; L. Ruiz-Garcia; T. Jiménez-Ariza; J. I. Robla Villalba; P. Barreiro. The counteractive effect of the sensor housing on unit sensitivity across a series of dynamic temperature profiles. Florida State Horticultural Society Annual Meeting. June 2-4, 2013 in Sarasota, Florida (USA)
Desarrollo de sensores e instrumentación para procesos con aporte solar térmico	<ul style="list-style-type: none"> - E. Correa-Hernando, F.J. Arranz, B. Diezma, E. Juliá, J.I. Robla, L. Ruiz-Garcia, J. Garcia-Hierro, P. Barreiro (2011). Development of Model Based Sensors for the Supervision of a Solar Dryer. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> 78(2): 167-175 - E. Correa-Hernando, F.J. Arranz, B. Diezma, H.T. Jimenez, J.I. Robla, L. Ruiz-Garcia, J. Garcia-Hierro, P. Barreiro, C. Valero. Development of Smart Sensors for the Supervision of a Solar Dryer: Agro-products Dehydration Application. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 2010. Clermont-Ferrant (Francia) - A. Abakarov, H. T. Jiménez Ariza, E. Correa-Hernando, B. Diezma, F.J. Arranz, J. García-Hierro, J.I. Robla, J. P. Barreiro. <i>Smart Fuzzy</i>

Ámbito de trabajo	Publicaciones
	Control of a Solar Dryer Through Using Low Cost Model Based Sensors. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 2012. Valencia (España)
Diseño y análisis de una incubadora comercial y adaptación para un aporte solar térmico	<ul style="list-style-type: none"> - J. García-Hierro, J.I. Robla, P. Barreiro, B. Diezma, E. C. Correa. Plataforma de control de bajo coste para incubadoras de aves basada en sensores ambientales y de gases. VII Congreso de Agroingeniería y Ciencias Hortícolas 2013. Madrid (España) - J. García-Hierro, J.I. Robla, P. Barreiro, E. C. Correa-Hernando, B. Diezma. Design of a Solar Incubator. Part 1: Monitoring Temperature and Enthalpy Gradients Under Commercial Production. International Conference on Agricultural Engineering AgEng 2012. Valencia (España) - J.García-Hierro, P. Barreiro, A. Moya-Gonzalez, J.I. Robla. Prospectives of monitoring biological activity in a red-legged partridge incubator with a carbon dioxide probe. Aceptada y pendiente de publicación CIGR journal . - J.García-Hierro, A. Moya-Gonzalez, J.I. Robla. P. Barreiro, Evaluation of the solar contribution in a hybrid incubator of partridge eggs. En proceso de revision en COMPAG

7. Materiales y Métodos

En este apartado se aborda el desarrollo del sistema instrumental de medida; el diseño y la modificación del aporte solar en una incubadora industrial; los experimentos realizados en la incubadora; y los métodos de análisis de la información (Figura 16). El sistema instrumental, especialmente en lo que refiere a los sensores inteligentes, se ha evaluado en distintos entornos: secadero solar, cámaras de conservación e incubadora. El proceso de desarrollo y no solo el resultado final, han sido fundamentales en la aplicación final. Por ello se incluyen en este apartado.

Figura 16. Esquema de trabajo

7.1. Sistema instrumental de medida

En este apartado se incluye todos los equipamientos evaluados de cara a su posterior uso en el sistema de control de la incubadora, aunque no todos ellos hayan sido empleados en la configuración definitiva. En todo caso, para cada tecnología evaluada se establecen unas conclusiones relativas a las especificaciones e idoneidad de uso en incubadoras.

7.1.1. Descripción de dispositivos y sensores

En el desarrollo de la Tesis se han empleado una amplia variedad de sensores y dispositivos para la adquisición y transformación de datos; así como para la automatización de procesos.

➤ Sensores

Sondas PT100 para medición de temperatura.

Para la medición de temperaturas se han empleado sondas Pt100. Estas sondas son sensores tipo RTD (detector de temperatura resistivo), basados en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura (Ecuación 2).

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Ecuación 2

, donde:

R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia (T_0), ΔT es la diferencia de temperatura ($T - T_0$) y α es el coeficiente de temperatura del conductor entre 0°C y 100°C (0.00385 K^{-1} para el platino).

Figura 17. Imagen sonda Pt100

El incremento de R frente a T realmente no es lineal pero sí creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde. Normalmente las sondas Pt100 industriales son elementos encapsulados en un tubo de acero inoxidable u otro material (vaina) (Figura 17). En un extremo se encuentra el

elemento sensible (alambre de platino de sección y longitud perfectamente establecida) y en el otro extremo se encuentra los terminales eléctricos de los cables.

Aunque las sondas Pt100 son sensores algo más costosos y mecánicamente no tan robustos como los termopares, los superan en precisión y estabilidad en aplicaciones a bajas temperaturas (-100°C a 200°C)

Existen 3 modos de conexión para las Pt100, cada uno de ellos requiere un dispositivo de lectura distinto, aunque en todos los casos el objetivo es determinar exactamente la resistencia eléctrica R_{Pt} del elemento sensor de platino sin que la resistencia de los cables R_c influya en la lectura.

- Con 2 hilos: El modo más sencillo de conexión (pero menos recomendado) es con solo 2 cables. En este caso las resistencias de los cables R_{c1} y R_{c2} que unen la Pt100 al instrumento se suman generando un error inevitable. El lector medirá el total $R_{Pt}+R_{c1}+R_{c2}$ en vez de R_{Pt} . Lo único que se puede hacer es usar cable lo más grueso posible para disminuir la resistencia de R_{c1} y R_{c2} y así disminuir el error en la lectura.

- Con 3 hilos: Es el modo más común de conexión y resuelve bien el problema del error generado por los cables. El único requisito es que los 3 cables tengan la misma resistencia eléctrica pues el sistema de medición se basa casi siempre en el puente de Wheatstone.

- Con 4 hilos: El método de 4 hilos es el más preciso de todos, los 4 cables pueden ser distintos (distinta resistencia) pero el instrumento lector es más costoso. Por los cables 1 y 4 se hace circular una corriente (I) conocida a través de R_{Pt} provocando una diferencia de potencial (V) en los extremos de R_{Pt} . Los cables 2 y 3 están conectados a la entrada de un voltímetro de alta impedancia luego por estos cables no circula corriente y por lo tanto la caída de potencial en los cables R_{c2} y R_{c3} será

cero y el voltímetro medirá exactamente el V en los extremos del elemento R_{Pt} . Finalmente el instrumento de medida obtiene R_{Pt} al dividir V medido entre la I conocida.

En nuestro caso, **empleamos sondas Pt100 de 3 hilos debido a la limitación del dispositivo de medida**. Las sondas Pt100 empleadas son **clase A**, con suficiente precisión para nuestra aplicación (Tabla 8) y muy buena estabilidad en ambientes industriales. Estas sondas Pt100 han sido instaladas en el interior del depósito solar (T_1), a la salida (T_2) y entrada (T_3) del serpentín del depósito solar, y a la entrada (T_4) y salida (T_5) del intercambiador de calor de la incubadora; así como en el interior de la incubadora (T_6) (Figura 46).

Tabla 8. Tolerancias de 4 clases de PT100 especificadas en la norma DIN/IEC751:2008

Clase AA	$\pm(0.10+0.0017 \cdot [T])$ °C
<u>Clase A</u>	$\pm(0.15+0.0020 \cdot [T])$ °C
Clase B	$\pm(0.30+0.0050 \cdot [T])$ °C
Clase C	$\pm(0.60+0.0100 \cdot [T])$ °C

Sensores digitales de temperatura y humedad relativa

Durante el desarrollo de la Tesis se ha empleado con frecuencia el sensor de temperatura y humedad relativa Sensirion (Sensirion AG, Staefa, Suiza) en distintos modelos: SHT71, SHT75, SHT11, cuya diferencia radica en su precisión y su tipo de montaje (aéreo o de superficie).

Los Sensirion® SHT son pequeños dispositivos que integran el elemento sensor y la circuitería electrónica para el procesamiento de la señal en un encapsulado de formato compacto (Figura 18), proporcionando una salida digital calibrada. Un sensor capacitivo mide la humedad relativa, mientras que para medir la temperatura emplea un sensor de banda prohibida de silicio PTAT (Proporcional a Temperatura Absoluta), basado en la diferencia de potencial eléctrico producida entre las uniones p-n de un transistor en función de la temperatura. Ambos sensores están acoplados a un conversor analógico-digital de 14bit y a un circuito de interfaz. Por ello son dispositivos sensores que proporcionan una señal digital de gran calidad con un buen tiempo de respuesta y una baja sensibilidad a las perturbaciones externas. Cada sensor se calibra individualmente en una cámara de humedad de precisión y los coeficientes de calibración son programados en una memoria OTP en el propio chip.

Figura 18. Dimensiones del sensor de temperatura y humedad relativa Sensirion® SHT7x (izquierda y centro) y SHT1x (derecha).

Según la Tabla 9, el sensor tiene una precisión de $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ (en el caso del modelo SHT75) y un rango de funcionamiento entre -40°C y 123.8°C , con lo cual es óptimo para aplicaciones de baja temperatura. En el caso de la humedad relativa, su precisión es mucho menor $\pm 1.8\%$ y además la exposición durante periodos prolongados a condiciones fuera del rango recomendado ($>80\%$ HR) pueden causar una desviación temporal de la señal de HR. Además la exposición al vapor de agua así como la condensación en la superficie del sensor, puede provocar un malfuncionamiento o incluso la rotura del mismo. En ocasiones el sensor se puede reacondicionar llevando a cabo un calentamiento a $100-105^{\circ}\text{C}$ y $<5\%$ HR durante 10 horas y una posterior rehidratación del sustrato polimérico a $20-30^{\circ}\text{C}$ y entorno al 75% HR.

Tabla 9. Características técnicas del sensor Sensirion® SHT7x y SHT1x (Fuente: www.sensirion.com).

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±3.0		%RH
	max	see Figure 2			
Accuracy ² SHT75	typ		±1.8		%RH
	max	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time ³	tau 63%		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT71	typ		±0.4		°C
	max	see Figure 3			
Accuracy ² SHT75	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁶	tau 63%	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.4	0.05	0.05	%RH
		8	12	12	bit
Accuracy ² SHT10	typical		±4.5		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy ² SHT11	typical		±3.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Accuracy ² SHT15	typical		±2.0		%RH
	maximal	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Non-linearity	linearized		<<1		%RH
Response time ³	τ (63%)		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift ⁴	normal		< 0.5		%RH/yr

Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution ¹		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy ² SHT10	typical		±0.5		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy ² SHT11	typical		±0.4		°C
	maximal	see Figure 3			
Accuracy ² SHT15	typical		±0.3		°C
	maximal	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time ⁶	τ (63%)	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

El sensor utiliza dos pines para alimentación en el rango entre 2,4V y 5,5V (recomendado a 3,3V) y dos pines para comunicación vía protocolo I²C. El sensor se conecta a un microcontrolador según el esquema mostrado en la Figura 19

Figura 19. Conexión típico del sensor Sensirion SHT7x, incluyendo resistencia pull up

Sensor de dióxido de carbono

A lo largo de los ensayos se instaló un sensor de dióxido de carbono (modelo EE82-5C2, E+E ELEKTRONIK GES.M.B.H., Engerwitzdorf, Austria) con tecnología NDIR para monitorizar la producción de CO₂ durante el proceso de incubación. Este dispositivo está diseñado para aplicaciones en condiciones ambientales desfavorables. Incorpora un sensor de doble longitud de onda para compensar los efectos de envejecimiento, es insensible a la contaminación y ofrece una excelente estabilidad a largo plazo. Además cuenta con un filtro especial para que pueda ser instalado en zonas con gran cantidad de partículas en suspensión, como pueden ser establos de ganado, silos, invernaderos o incubadoras de aves. Su ajuste de fábrica a múltiples temperaturas hace que sea fiable en un amplio rango de trabajo. Existen modelos que pueden trabajar en rangos de 0 hasta 2000, 5000 o 10000ppm, variando su precisión.

Figura 20. Esquema de conexión del sensor EE82 (Fuente: www.epluse.com).

El dispositivo debe ser alimentado a 24 V según su esquema de conexión (Figura 20) y tiene una masa común (GND) para alimentación y señal de salida. **El modelo empleado tiene un rango de medida de entre 0 y 5000ppm con una señal analógica de salida lineal entre 0 y 5 V** (Figura 21). Por lo tanto empleando cualquier dispositivo de medida de señales analógicas (p.e. multímetro) se puede obtener una medida de la concentración de CO₂. La Tabla 10 resume las características técnicas del dispositivo.

Tabla 10. Características técnicas del sensor de CO₂ EE82

Rango de medida	0-5000ppm
Precisión a 25°C y 1013mbar	< ±50ppm + 3% del valor medido
Tiempo de respuesta (τ_{63})	Estándar: 300s
Dependencia de la temperatura	1ppm CO ₂ /°C entre -20y 45°C
Tiempo muestreo	Aprox 15s
Voltaje salida	0-5V
Voltaje alimentación	15-35V AC
Tiempo de precalentamiento	< 5 min
Consumo	Estándar: 15mA + corriente de salida
Condiciones de trabajo	-20...60°C 0-100% RH sin condensación

Figura 21. Curva de calibrado del sensor de CO₂ E+E Elektronik EE82-5C2

Sensor de oxígeno

Para registrar el consumo de oxígeno durante el proceso de incubación se ha empleado un sensor de tipo electroquímico de oxígeno (modelo KE50, FIGARO USA, INC, Arlington Heights, E.E.U.U) (Figura 22). Este tipo de sensores se desarrolló en Japón en el año 1985 (www.figarosensor.com). Sus mayores ventajas son: su nula sensibilidad a otros gases como CO₂, CO, H₂S, NO_x o H₂, la estabilidad de su señal, que no requieren una fuente de alimentación ni un periodo de precalentamiento y que son sensores con un bajo coste. Por el contrario, sus desventajas son el tiempo de vida limitado (entre 2 y 10 años en función de la concentración a la que está expuesto), su débil señal de salida (unas decenas de mV) y su limitado rango de temperatura de trabajo (entre 5 y 40°C). Este tipo de sensores tiene gran aplicabilidad en diversos sectores: medicina (respiradores y enriquecedores de oxígeno), biotecnología (incubadoras de oxígeno) industria agroalimentaria (cámaras frigoríficas e invernaderos), seguridad (aires acondicionados, detectores de oxígeno, detectores de incendio) etc.

Figura 22. Sensor de oxígeno Figaro KE-50

Figura 23. Funcionamiento de un sensor electroquímico de oxígeno.

Tabla 11. Especificaciones técnicas sensor Figaro KE-50 (fuente:www.figarosensor.com)

Rango medida	0...100%	
Precisión	2% del total de escala	
Condiciones de operación:	Presión atmosférica	811hPa...1216hPa
	Temperatura	5...40°C
	Humedad Relativa	10...90% HR sin condensación
	Tiempo de respuesta (90%)	Aprox 60s
Voltaje de salida (400 ppm O ₂) en condiciones estándar		47~ 65mV
Presión atmosférica	1013±5hPa	
Temperatura	25 ± 1°C	
Humedad Relativa	60 ± 5% HR	
Tiempo de vida esperado a 20°C en ambiente normal		Aprox 10 años

El funcionamiento de éste tipo de sensores implica las moléculas de oxígeno penetren a través de la membrana permeable hasta el cátodo. Gracias a la composición del cátodo, tiene lugar una reacción química en él, formándose iones OH⁻. Estos iones migran al ánodo a través del electrolito, creando un flujo de corriente proporcional a la concentración de O₂ (Figura 23). La caída de tensión producida sobre una resistencia situada en el circuito sirve como señal de medición que se utiliza en el procesado electrónico posterior. Normalmente se trata de una resistencia con coeficiente de temperatura negativo (NTC), para compensar los efectos de la temperatura, garantizando así que el sensor permanezca estable frente a los cambios de temperatura. La salida de voltaje a través de dos hilos debe ser medida con un instrumento con una precisión apropiada y empleando la curva de calibración se podrá estimar la concentración de oxígeno (Figura 24).

Figura 24. Recta de calibración bajo condiciones estándar (Fuente: www.figarosensor.com)

Piranómetro

Con el objetivo de tener una medición real in situ de la radiación solar incidente sobre el colector solar, se instaló un piranómetro Apogee (modelo SP-215, Apogee Instruments, Inc, Logan, E.E.U.U.). Se trata de un piranómetro con señal amplificada calibrado para medir la radiación de onda corta. Un piranómetro ideal mide la totalidad del espectro solar, entre los 208 y los 2800 nm. Sin embargo, en torno al 90% de la radiación solar se encuentra entre los 300 y los 1100 nm. Éste modelo se ha calibrado durante un periodo de múltiples días frente a un radiómetro de precisión de referencia Kipp & Zonen modelo CM21.

El principio de funcionamiento de los piranómetros es la termopila: la radiación entrante es absorbida casi en su totalidad por una superficie horizontal ennegrecida, para una gama de longitudes de onda muy amplia. El incremento de la temperatura resultante se mide a través de termopares conectados en serie o en serie/paralelo para conformar la termopila.

Las uniones activas (calientes) se sitúan por debajo de la superficie ennegrecida del receptor y utilizan la radiación absorbida por el revestimiento negro para calentarse. Las uniones pasivas (frías) de la termopila mantienen un contacto térmico con la carcasa del piranómetro, que actúa como disipador térmico. En los últimos años, los piranómetros de mayor rendimiento utilizan un módulo Peltier, también termoelectrónico, aunque los distintos metales del termopar/termopila se sustituyen por distintos semiconductores. Es necesario proteger el revestimiento negro del detector de las influencias externas que pueden afectar a las mediciones, como las precipitaciones, la suciedad o el viento. Casi todas las cúpulas semiesféricas individuales o dobles de los piranómetros utilizan un cristal de calidad óptica. El piranómetro Apogee SP-215 en cambio tiene una lente acrílica que reduce el rango del espectro solar en el cual puede medir.

Tabla 12. Especificaciones técnicas del sensor Apogee SP-215

		45°	de	ángulo
Respuesta	(coseno)	cenital:±1%		
direccional		75°	de	ángulo
		cenital:±5%		
Precisión absoluta		±5%		
Repetitibilidad		±1%		
Condiciones	de	-25 a 55°C		
operación		0 a 100% HR		
Voltaje de salida		0-5V	(4.4V	máxima
		irradiación	1100W/m ²	
Alimentación		5-5,5V DC		
Sensibilidad		Calibrada	a	0,25W/m ²
		por mV		
Consumo eléctrico		285µA		

Según sus especificaciones (Tabla 12), el sensor tiene una respuesta lineal entre los 0 y 1100W/m² de irradiación aportando una corriente de salida entre 0 y 4,4V. El sensor debe ser alimentado a 5V DC, debido a su electrónica de amplificación de señal. Es un sensor con una precisión aceptable y de muy bajo consumo. Está diseñado para su correcto funcionamiento en exteriores e incluso en inmersión en agua, pero debido al envejecimiento del disco difusor y sus cambios en la transparencia óptica, pueden producirse incrementos en su señal de salida en torno al 1% al año.

➤ *Dispositivo de conexión de sensores Sensirion*

Fruto de la colaboración conjunta entre el Grupo de Energías Renovables Aplicadas de la Universidad de Oriente de Santiago de Cuba y el Laboratorio de Técnicas Avanzadas de Sensores (en el cual desarrollo mi trabajo) del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas perteneciente al CSIC dentro del proyecto AECID A/019197/08, se desarrolló una placa de adquisición de datos para la conexión de hasta 28 sensores SENSIRION SHTx (Figura 25). Esta placa está basada en el microcontrolador PIC18LF4620 (Microchip Technology Inc., Chandler, E.E.U.U.). Dicho microcontrolador ha sido programado basado en su lenguaje propio de programación para transformar y acondicionar la señal digital de los sensores y transferirla a un PC a través de puertos RS-232 o RS-485. En la Figura 26 se presenta un esquema básico del dispositivo, Los terminales SCK, V+ y GND son comunes para los 28 sensores y el terminal DATA de cada uno de los sensores está conectado a los pines 2 a 10, 16 a 29 y 33 a 40 del PIC.

Figura 25. Imagen de la placa para conexión de hasta 28 sensores Sensirion

La señal de los distintos sensores debe ser acondicionada, transformada y registrada. Para ello se emplean módulos de adquisición de datos conectados a un ordenador en el cual se ejecuta para adquirir todos los datos. Los módulos empleados son de la marca Advantech Co.Ltd (Taipéi, China), cuyas especificaciones técnicas se resumen en la Tabla 13. Estos módulos cuentan con su propio software de configuración, monitorización y control: ADAM Utility®. Cuando estos módulos son conectados al PC a través de la pasarela adecuada (convertor RS-485 a RS-232 o USB) deben configurarse individualmente con direcciones distintas para que no existan conflictos en la comunicación. Posteriormente hay que configurar los distintos canales de los módulos para determinar el tipo de entrada/salida que se conecta en ese canal. Toda esta configuración se puede realizar a través de cualquier programa hiperterminal de comunicación a través de los puertos del PC sin necesidad de acceder a la aplicación ADAM Utility, enviando los comandos determinados que indica el manual de usuario.

		Módulo					
		ADAM 4015		ADAM 4019+		ADAM 4055	
						ADAM 4068	
Número de canales	de 6	8		16		8	
Tipo de entrada/salida	Pt100:	-50 a 150°C	V:	±1V,±2,5V,	4 canalesForma A		
		0 a 100°C		±5V, ±10V,	8 entradas10~50V	relé	
		0 a 200°C	mV	±100mV,	digitales	4 canalesForma C	
		0 a 400°C		±500mV	8 salidas5~40VDC	relé	
		-200 a 200°C	mA	±20mA,	digitales	AC	125V@0,6
	Pt1000:	-40 a 160°C		4~20mA			A

	Balco 500:	-30 a 120°C	Termopar			250V@0.3
	Ni 50 RTD:	-80 a 100°C	J	0 a 760°C		A
	Ni 508 RTD:	0 a 100°C	K	0 a 1370°C	DC	30V@2A
			T	-100 a 400°C		110V@0,6
			E	0 a 1000°C		A
			R	500 a 1750°C		
			S	500 a 1750°C		
			B	500 a 1800°C		
Protocolos soportados	ADAM	ASCII	y	ADAM ASCII	ADAM ASCII	ADAM ASCII
Interface	MODBUS/RTU					
	RS-485					
Tasa de muestreo	10 muestras/s					
Resolución	16bit					
Resolución	±0.1%					
Voltaje Alimentación	+10~30V DC					
Consumo	1,2W (24VDC)		1,0W (24VDC)			2,2W (24VDC)

- ADAM 4015: Es un módulo con 6 canales de entrada para la conexión de distintos tipos de sensores RTD (Pt,Ni, Balco) conectados a 2 o 3 hilos (Figura 27). Además cuenta con la detección de hilo roto, para evitar la toma de medidas erróneas. Este dispositivo recibe la señal de las sondas Pt100 y las digitaliza con una resolución de 16 bit. Puede emplear tanto protocolo de comunicación empleando comandos ASCII, como Modbus/RTU. Tiene una capacidad de muestreo de hasta 10 muestras por segundo. El interface de comunicación es vía RS-485 y necesita una alimentación externa de entre 10 y 30 VDC.

Figura 27. Esquema general módulo ADAM 4015 y conexión de sensor RTD de 3 hilos

- ADAM 4019+: es un módulo universal de entradas analógicas de 8 canales en el que se pueden conectar de forma independiente dispositivos con distintos tipo de señales analógicas (Figura 28): señal de voltaje en distintos rangos ($\pm 1V$, $\pm 2,5V$, $\pm 5V$, $\pm 10V$, $\pm 100mV$, $\pm 500mV$) entrada de corriente ($\pm 20mA$, $4\sim 20mA$) y termopares (tipos J, K, T, E, R, S y B).

Figura 28. Esquema general módulo ADAM 4019+.

- ADAM 4055: ofrece 8 canales aislados para entradas digitales y otros 8 canales para salidas digitales (Figura 29). Las entradas digitales pueden tener configuración de contacto seco o húmedo.

Figura 29. Esquema general módulo ADAM 4055 y conexión con contacto mojado (izq-arriba) y seco (izq-abajo).

- ADAM 4068: es un módulo muy versátil con 8 canales, cada uno correspondiente a un relé interno. Son dispositivos muy útiles para aplicaciones de control automático ON/OFF (Figura 30).

Figura 30.Esquema general módulo ADAM 4068 y conexiones en forma A (izq-arriba) y forma C (izq-abajo).

Además de los módulos de adquisición de datos, es necesario un interface de conversión de puerto tipo RS-485 a puerto RS-232 o puerto USB para poder transferir los datos a un PC. En este caso se ha elegido un módulo ADAM-4561 de la misma marca. Es un dispositivo compatible con USB v2.0 con una velocidad de transmisión de hasta 115,2Kbps. No necesita fuente de alimentación externa ya que es alimentada a través del cable USB. Tiene la posibilidad de convertir RS-232, RS-422 o RS-485 a USB. Se pueden conectar hasta 127 dispositivos distintos, que deben ser previamente configurados con distintas direcciones.

➤ *Software de programación*

Para la monitorización y registro de los datos enviados por los sensores instalados y la automatización de los elementos actuadores se ha realizado un programa empleando el software CEC Testpoint V7 (2001, Capital Equipment Corporation, Billerica, E.E.U.U.). Es una herramienta de programación que incluye funciones para el control de hardware externo, la creación de interfaces de usuario, procesamiento y visualización de datos, la creación de archivos de informes, ect. Soporta dispositivos GPIB, RS232 y RS485.

7.1.2. *Redes de sensores inalámbricos*

➤ *Evaluación de distintas tecnologías inalámbricas*

En los estadios iniciales del desarrollo de la presente Tesis, se evaluó la utilización de sensores inalámbricos para la monitorización de la T y la HR en cámaras frigoríficas para la conservación de frutas y hortalizas. Se caracterizó el comportamiento de 3 tipos de dispositivos basados en tecnología WSN y RFID. Se instalaron 90 tarjetas RFID semipasivas TurboTag T700® (Sealed Air, New York, NY, US) con capacidad para almacenar hasta 702 datos de temperatura, con una frecuencia de muestreo programable (Figura 31). Las TurboTags poseen un sensor de temperatura (KSW Microtec, Dresden, Germany) con un

rango de funcionamiento de entre -30°C y 50°C con una precisión de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Se instalaron durante al menos 4 días en 3 cámaras frigoríficas del mismo tamaño (26x6x12m equivalentes a 1848m³), pero con distintas configuraciones (divisiones interiores, número de pilas de almacenamiento, temperatura de consigna, etc.)(Figura 32). Es necesaria la recogida de datos de forma periódica mediante la aproximación de un receptor RFID, que a su vez está conectado a un PC a través de un puerto USB.

Estos sensores se emplearon para construir una red tridimensional y obtener un mapa tridimensional de la distribución de temperatura en el interior de las cámaras frigoríficas.

Figura 31. TurboTag RFID data-logger de temperatura.

Simultáneamente se instalaron 2 dispositivos (Mote) (Crossbow®, modelo MTS400, Milpitas, CA, USA) con tecnología ZigBee/IEEE 802.15.4³, que contienen sensores de temperatura y humedad relativa (Sensirion SHT40, Staefa, Switzerland), presión barométrica y temperatura (Intersema MS5534B, Hampton, VA, USA), intensidad de luz (TAOS TSL2550D, Plano, TX, USA) y un acelerómetro de dos ejes (ADXL202JE, Norwood, MA, USA). Estos dispositivos se colocaron junto a la puerta de entrada a la cámara frigorífica; uno en el interior y otro en el exterior, con el fin de analizar el intercambio de calor entre el interior y el exterior de la cámara. El dispositivo receptor MIB520 (Crossbow®, Milpitas, CA, USA) pasarela ZigBee/USB, recibe los datos de ambos motes y los transfiere a un PC donde se almacenan para su posterior análisis. Los dispositivos están programados con una frecuencia de una medida cada 180s.

³ ZigBee/IEEE 802.15.4: es un estándar que define el nivel físico y el control de acceso al medio de redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (low-rate wireless personal area network, LR-WPAN). En 2007, la actual revisión del estándar se aprobó en 2006. El grupo de trabajo IEEE 802.15 es el responsable de su desarrollo (Fuente: www.wikipedia.org)

El número de paquetes de datos perdidos es un factor importante en la elección de la tecnología para la toma de datos. Las paredes tipo sándwich de doble capa metálica y espuma de poliuretano con un espesor total de 16cm, hacen que la conexión ZigBee entre el dispositivo sensor, que se encuentra en el exterior de la cámara, y el dispositivo receptor (situado en el interior de la cámara frigorífica) sea débil y se pierda en varios momentos, sin una pauta clara.

El porcentaje de paquetes perdidos es la relación entre la diferencia de paquetes de datos requeridos por el receptor (m) (según la frecuencia de muestreo) y paquetes recibidos (n); y en este caso ese porcentaje de paquetes perdidos se encuentra en torno al 1% y 0.25% para los motes situados en el exterior e interior de la cámara, respectivamente. El error estándar (SE) asociado a la ratio de paquetes perdidos es calculado en base a la distribución binomial expresada en la Ecuación 4, donde n es el número total de paquetes recibidos y p es la ratio de paquetes perdidos durante el experimento.

$$\% \text{ paquetes perdidos} = \frac{m - n}{m} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$SE = \sqrt{\frac{p \cdot (1 - p)}{n}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Tabla 14. Porcentaje de paquetes perdidos de datos del dispositivo Crossbow MTS400 y su desviación estándar asociada.

Experimento	m	Mote en el interior	Mote en el exterior
1	6117	0,26 ± 0,01	1,25 ± 0,01
2	3244	0,24 ± 0,02	0,89 ± 0,02
3	1846	0,21 ± 0,02	0,70 ± 0,02

Figura 32. Distribución de sensores en cámaras frigoríficas con distinta distribución.

➤ *Decisiones estratégicas de cara a la instrumentación de una incubadora solar*

Las tarjetas RFID de adquisición de datos de temperatura puede ser un instrumento útil para registrar las variaciones de temperatura en espacios cerrados gracias a la sencillez de su colocación y programación, pero no son dispositivos útiles para la monitorización en tiempo real. Tienen limitación de 702 datos registrados, con lo cual si queremos una frecuencia de muestreo normal (1 medida/minuto), su capacidad se agotaría a los 702 minutos (11,7 horas) y habría que descargar los datos periódicamente. La descarga de datos y configuración suponen un lapso de tiempo durante el cual se interrumpe la monitorización. Es por ello que este tipo de sensores no se consideran útiles para la monitorización de temperaturas de incubación.

Por otro lado, los dispositivos de tecnología WSN, pueden ser de gran utilidad por la versatilidad que proporcionan los dispositivos inalámbricos. Los motes Crossbow integran sensores de temperatura y humedad relativa, que son dos parámetros básicos en el proceso de incubación. El resto de sensores no proporcionan datos interés en el proceso de incubación (presión barométrica, intensidad de luz y movimiento) y se ha detectado que existe pérdida de datos debido a la atenuación de señal producida por obstáculos entre los dispositivos con sensores y el dispositivo receptor. Esta señal se ve muy influenciada por la existencia de paredes metálicas; situación que se encuentra en la gran mayoría de incubadoras

comerciales. Es por ello que se opta por descartar el empleo de este tipo de dispositivos inalámbricos para la monitorización de datos en la incubadora.

7.1.3. *Efecto del encapsulado de los sensores en la fiabilidad de las medidas*

➤ *Análisis de la respuesta dinámica de sensores de temperatura*

La respuesta dinámica de los sensores empleados en cualquier proceso de medida es un factor determinante para la obtención de una medida fiable. Esta respuesta dinámica determina el tiempo necesario para que el sensor alcance el valor final del parámetro objeto de medición. El factor determinante en la velocidad de respuesta del sensor es su encapsulado. Las características del sensor y del ambiente en el que se realizan las medidas, normalmente obligan a encapsular dicho sensor para prolongar su vida útil.

En trabajos desarrollados durante la presente Tesis, se estudió la respuesta dinámica de distintos sensores inalámbricos con el fin de estimar su utilidad en procesos agroindustriales. Se emplearon 3 temperaturas distintas, con 3 dispositivos Crossbow MTS400 como referencia:

- 5°C en frigorífico.
- temperatura ambiente.
- 35°C en estufa.

Se caracterizaron 3 tipos de dispositivos:

- Tarjetas TurboTag T700 y T702-B originales y sin encapsular (Figura 34).
- Dispositivo inalámbrico con tecnología ZigBee de la compañía NLAZA con sensor Sensirion SHT15 de montaje superficial y otro dispositivo modificado con sensor Sensirion SHT75 de montaje aéreo (Figura 33).
- Dispositivo ZigBee Crossbow MTS400, con sensores Sensirion SHT71 e Intersema MS5534B de montaje superficial.

Todos los sensores se estabilizaron en el frigorífico a 5°C durante 20min y transcurrido este tiempo se trasladaron a una estufa a 35°C. Después de 20min, los sensores se volvieron a introducir en el frigorífico para recuperar los 5°C.

Se puede apreciar en la Tabla 15, que el encapsulado de las tarjetas tienen una influencia importante en la respuesta dinámica de los sensores; tanto en procesos de calentamiento como enfriamiento. A su vez, los sensores de montaje superficial en placa de NLAZA y Crossbow tienen un tiempo de estabilización mucho más elevado que cualquier sensor de montaje aéreo, debido a la mayor superficie de contacto con el ambiente y al calentamiento

derivado del funcionamiento de la electrónica. De todo ello se deduce que el encapsulado ha de ser tan reducido como sea posible y el transductor ha de estar alejado de la electrónica.

Tabla 15. Tiempo de estabilización (en segundos) de los distintos sensores ensayados.

	Calentamiento (35°C)		Enfriamiento (5°C)	
	Media	SD	Media	SD
T700 sin encapsulado	10.4	1.9	17.5	1.2
T700 con encapsulado	60.0	7.5	38.6	4.6
T702-B sin encapsulado	22.1	3.9	13.8	2.8
T702-B con encapsulado	65.1	3.7	55.9	6.7
NLAZA montaje aéreo	14.2	1.7	12.7	2.0
NLAZA montaje superficial	55.9	12.2	50.7	4.2
Crossbow Sensirion	83.4	8.0	171.1	24.5
Crossbow Intersema	93.9	12.0	212.4	34.1

Figura 33. Dispositivo NLAZA modificado con sensor Sensirion SHT75 con montaje aéreo (1), interruptor de conexión (2) y clema de conexión de sensor (4). Emplea un procesador MicaZ(3)

Figura 34. TurboTags T700 y T702. En la parte inferior, vista sin encapsulado donde se aprecia la antena RFID (1), el sensor de temperatura (2) y la batería (3).

➤ *Requerimientos para la supervisión de una incubadora solar*

Las incubadoras comerciales de tamaño medio, como la que es objeto de estudio en la presente Tesis, basan su funcionamiento en sensores de temperatura del tipo termistor. Estos termistores tienen una constante de tiempo baja, pero se ve aumentada por el tipo de encapsulamiento. Las condiciones ambientales en el interior de la incubadora no son agresivas (en torno a 37.5°C y 40% de humedad relativa), pero son suficientemente desfavorables para que los sensores sufran posibles procesos de oxidación o mal funcionamiento por condensación de agua en su superficie y acumulación de polvo. Por otro lado, la monitorización de la temperatura del circuito de calentamiento con aporte de energía solar se debe realizar con sensores que soporten la inmersión en agua a temperaturas de hasta 90-100°C. Por todo ello, el tipo de sensores que se emplea en este tipo de casos son sensores RTD (Pt100) con una vaina protectora.

7.1.4. *Sensores inteligentes*

➤ *Diseño y desarrollo*

Según Corsi (1995), el término sensor inteligente (Smart sensor), se refiere a aquellos elementos que contienen capacidad sensórica, procesamiento de la señal y la comprensión para la toma de decisión; con objetivos que engloban desde la simple visualización hasta tele-observación, vigilancia, búsqueda y seguimiento, robótica y aplicaciones de inteligencia artificial. En algunos contextos los sensores inteligentes se denominan asimismo sensores basados en modelos.

Durante la elaboración de la presente Tesis se realizaron diversos trabajos en los que se incidió en la puesta en marcha y desarrollo de sensores inteligentes:

➤ *Aplicación a un secadero solar de madera*

Durante el verano de 2009, se realizaron experimentos en un secadero solar (CONA SOLAR, Ried im Traunkreis, Austria), con una capacidad de 0,3 m³ (Figura 35). Está equipado con un colector solar de cuerpo negro de 2m² que emplea aire como fluido caloportador. El aire caliente atraviesa el colector y es llevado hacia la cámara de secado empleando un ventilador de 12VDC. La cámara está equipada con varias estanterías metálicas donde puede ser colocada la muestra a secar. Se colocaron 8 sensores Sensirion SHT71; en la entrada y salida del colector solar (S1 y S2), en la entrada y salida de la cámara de secado (S3 y S8) y 4 en distintas posiciones del interior de la cámara (S4 a S7). Además se introdujeron 5 termopares tipo T (T1 a T5) en los distintos estantes de la cámara de sacado y un solarímetro (RD009 G.I.S. Ibérica) para medir la radiación incidente con una resolución de 1W/m² y una precisión de ±10 W/m².

Figura 35. Esquema de secadero solar CONA SOLAR 1) colector solar, 2) ventilador, 3) cámara de secado, 4) trampilla de recirculación, 5) entrada de aire caliente a la cámara. Posicionamiento de sensores S1 a S8 y T1 a T5

Se monitorizó el proceso de secado de tableros de pino (*Pinus sp.*) y los datos se analizaron empleando herramientas matemáticas programas en entorno MATLAB (MathWorks®, Massachusetts, EEUU) así como el modelo psicométrico descrito en la norma ASAE D271.2. (ASABE, 2006), entre otros. Estos datos condujeron a la propuesta de 3 modelos de sensor inteligente, resumidos en la Tabla 16.

Tabla 16. Descripción de los modelos matemáticos propuestos para el desarrollo de sensores inteligentes

	SMART-1	SMART-2	SMART-3
Tipo de modelo	Empírico	Analítico	Analítico
Magnitud estimada	Humedad de la madera	Humedad de la madera	Eficiencia energética del secadero y humedad de la madera
Magnitud medida	Temperatura y humedad relativa del aire de entrada y salida del secadero	Temperatura y humedad relativa del aire en distintas posiciones del secadero	Radiación solar y temperatura de la madera en distintas posiciones
Tipo y número de sensores	Sensirion (S3 y S8)	Sensirion (S1, S2, S4-S7)	Solarímetro y Termopares (T1 a T5)
Parámetros en el modelo	Ninguno	Coefficiente de difusión de referencia y Energía de Activación	Energía de unión madera-agua
Argumentos de entrada	Flujo de aire de entrada al secadero y humedad inicial de la madera	Área de madera a secar, masa de la madera seca, sección transversal para la circulación de aire de secado, humedad inicial de la madera y espesor medio de los tableros.	Humedad inicial y final de la madera y masa de la madera seca

SMART-1			SMART-2	SMART-3
Necesidad de retroalimentación con otro sensor inteligente	No	No	No	Diariamente la humedad inicial y final de la madera obtenida de SMART-1 o SMART-2

Como se aprecia en la Figura 36, la cantidad de agua extraída a lo largo de un ciclo de secado, estimada a partir del modelo SMART1 es del mismo orden que la obtenida experimentalmente mediante gravimetría.

Figura 36. Cantidad de agua extraída (W) a lo largo de un ciclo de secado, estimada con *SMART-1* (línea sólida) y cantidad de agua extraída medida experimentalmente mediante gravimetría (línea de trazos)

➤ *Aplicación a cámaras frigoríficas de conservación de fruta y verdura*

El análisis de datos de T y HR de dos sensores situados en el interior de la cámara frigorífica, junto al empleo del modelo psicrométrico desarrollado en la norma ASAE D271.2. (ASABE, 2006), puede ser empleado para realizar estimaciones del consumo energético de la cámara frigorífica, y la posibilidad de identificación de errores en la facturación de consumo de la cámara. Se estudiaron las mismas cámaras frigoríficas que las descritas en el punto 7.1.2.. La instalación de frío industrial está basada en evaporadoras de glicol. El propietario de la instalación factura al arrendatario de cada una de las cámaras el consumo energético en base al tiempo de apertura de la válvula que deja pasar glicol frío al refrigerador de la cámara. En ocasiones se han detectado errores en la facturación causados por el funcionamiento incorrecto de estas válvulas.

El sensor inteligente se desarrolla considerando que la entalpía del aire de la cámara está directamente relacionada con el consumo energético del refrigerador (ver Anexo 1). Se ha establecido que puede existir mal funcionamiento de la válvula de entrada de glicol frío cuando la diferencia entre el consumo energético (W) y la entalpía del aire (H) está fuera del rango en el que estadísticamente se encuentra el 98% de los valores:

$$Dif(Kcal) = W(Kcal) - H(Kcal)$$

$$\text{límite sup} = \bar{x} + t \cdot s$$

$$\text{límite inferior} = \bar{x} - t \cdot s$$

Siendo $\bar{x}$ = media de Dif, s = desviación estándar de Dif y

$$t = t \text{ de Student } \begin{cases} 1,96 \text{ para el } 95\% \\ 2,32 \text{ para el } 98\% \end{cases}$$

➤ Decisiones relativas al desarrollo de sensores inteligentes en una incubadora solar

El empleo de energía solar térmica como energía de apoyo en el proceso de incubación requiere el empleo de sensores para la monitorización, supervisión y automatización del proceso. Además, el empleo de sensores de temperatura en el circuito de agua caliente se puede utilizar para determinar la eficiencia del captador solar y del intercambiador de calor existente en el interior de la incubadora. Los sensores de gases en incubadoras se emplean actualmente a nivel industrial para la introducción de atmósferas controladas que mejoran el rendimiento de las incubaciones. También se emplean a escala laboratorio para determinar el efecto de distintas concentraciones de gases en la fisiología de los embriones y en la calidad de la incubación. Sin embargo, es posible emplear ese tipo de sensores para la monitorización del proceso de incubación y la construcción de modelos que permitan determinar la calidad de la incubación, convirtiéndolos de este modo en prototipos de sensores inteligentes.

7.2. Experimentos realizados en la incubadora

7.2.1. Entorno y factores ambientales

La incubadora objeto de estudio y modificación se encuentran en la finca cinegética “Dehesa Vieja de Galapagar”. Este municipio está situado al noroeste de la Comunidad de Madrid, en las estribaciones de la sierra de Guadarrama. Sus coordenadas geográficas son 40° 34' 42" N 4° 00' 07" O y la altitud media de su relieve es de 880m.

Debido a su ubicación, Galapagar tiene un clima mediterráneo de interior con inviernos fríos de temperaturas mínimas en los últimos años de hasta -10.4°C (2009) y veranos calurosos alcanzándose temperaturas máximas de hasta 39.1°C (2013) (AEMET, 2015)

Los datos climáticos experimentados en la explotación se han obtenido de una estación meteorológica cercana, situada en las coordenadas $40^{\circ} 30' 08'' \text{ N}$ $3^{\circ} 58' 01'' \text{ W}$ y a 653 m de altitud (Fuente: J. I. González de la Blanca), las temperaturas medias, mínimas y máximas promedio para los años 2012 a 2014 se reflejan en la Tabla 17.

Tabla 17. Temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales, para el periodo comprendido entre el año 2012 y 2014

Mes	Temperatura $^{\circ}\text{C}$		
	Media	Min	Max
Ene	7,0	-2	17,9
Feb	6,5	-5,3	21,3
Mar	10,4	-0,6	24,4
Abr	12,8	0,6	27,6
May	16,8	3,6	33,4
Jun	22,0	5,3	38,6
Jul	25,3	11,3	36,9
Ago	25,8	10,2	40
Sep	21,1	8,2	36,1
Oct	16,0	-0,1	28,8
Nov	10,0	-2,8	21,9
Dic	6,7	-3,4	15,9

Basándonos en los datos de radiación solar facilitados por la misma estación meteorológica, se puede apreciar en la figura que los meses de mayor insolación corresponden a los meses de verano (Junio, Julio y Agosto) alcanzando en torno a los $570\text{W}/\text{m}^2$ de radiación solar incidente media durante las horas de sol (Figura 37). Durante el periodo del año entre los meses de Noviembre y Febrero la radiación solar incidente media se reduce a prácticamente la mitad (alrededor de los $270\text{W}/\text{m}^2$).

Figura 37. Radiación solar media mensual durante horas de sol (Fuente: J. I. González de la Blanca)

7.2.2. Seguimiento de incubaciones estándar

La Tabla 18 muestra un resumen de las incubaciones llevadas a cabo en el desarrollo de este trabajo. Todas las incubaciones se corresponden a procesos de producción real para la obtención de perdices con fines comerciales; 2 de ellas se supervisaron en el año 2011, tres en el año 2012 y dos en el año 2013. Los huevos son trasladados a una nacedora situada en la misma habitación de incubación, aproximadamente a los 20,5 días de incubación, según el criterio de los propietarios. De acuerdo con la temperatura media de la incubadora y su desviación estándar, no se aprecian diferencias relevantes entre las incubaciones. La temperatura de incubación se encuentra en el mismo rango, considerando su desviación estándar. Ambas temperaturas se han medido con sensores Sensirion SHT75. La correlación entre la temperatura media de la incubadora y la temperatura de la habitación de la sala de incubación es de $r=-0,322$ (9600 datos). La Tabla 18 además muestra una tasa de nacimientos variable en los distintos procesos, alcanzándose un máximo de un 76,6%. Porcentajes a partir del 65% son considerados como aceptables para los productores, atendiendo a sus anteriores campañas y teniendo en cuenta que no existe discriminación previa de huevos sin fecundar. En las dos campañas de 2013 la tasa de nacimientos descendió alarmantemente, además de detectarse un alto porcentaje de pollos con malformaciones en las patas; cuestión que los descarta para fines comerciales. Los dueños de la explotación señalan que estos resultados pueden haber sido ocasionados por un periodo de almacenamiento de los huevos demasiado prolongado hasta su introducción en la incubadora.

Tabla 18. Resumen de incubaciones reales supervisadas y sensórica instalada. Se indican la temperatura media de la incubadora y la sala de incubación, junto a su desviación estándar, entre paréntesis

	1	2	3	4	5	6	7
	3 - 21 Mayo 2011	28 Mayo - 18 Junio 2011	13 Marzo- 4 Abril 2012	6-27 Abril 2012	30 Abril - 19 Mayo 2012	19 Marzo - 9 Abril 2013	16 Abril -7 Mayo 2013
Fechas de incubación							
Días de incubación	0 a 20,1	0 a19,9	9 a 20	8,7 a 20,7	1,5 a 20,5	0 a 20,6	0 a 20,7
Nº datos	9600	9205	5280	5760	9120	9864	9938
Huevos introducidos	9020	9072	7840	9072	9072	8262	9070
Tasa de nacimientos (%)	70,5	74,1	65,5	76,6	71,9	40,7	34,9
Tasa de malformaciones (%)	-	-	-	-	-	4,1	4,4
T incubadora (°C)	37,3 (0,2)	37,0 (0,2)	36,9 (0,4)	36,9 (0,6)	37,1 (0,5)	37,3 (0,6)	37,1 (0,6)
T sala de incubación (°C)	-	20,3 (2,2)	18,7 (2,6)	15,8 (2,4)	22,0 (2,1)	13,5 (1,8)	17,8 (3,2)
Red de sensores Sensirion	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Sensor de CO ₂ y O ₂	No	No	Si	Si	Si	Si	Si
Sensores PT100	No	No	Si	Si	Si	Si	Si

7.2.3. Verificación del sistema de aporte solar

Se llevaron a cabo 5 ensayos a lo largo de 3 años, según el resumen indicado en la Tabla 19. Los primeros ensayos corresponden a la supervisión de dos incubaciones estándar para analizar los valores reales de variaciones térmicas en la incubadora y el consumo de energía asociado a incubaciones estándar. En el denominado Experimento 1 se introduce el empleo de energía solar térmica para evaluar la estabilidad y fiabilidad del sistema de control, mientras que en el experimentos 2 y 3 se verifica la estabilidad del sistema híbrido de calentamiento con aporte solar como energía de apoyo, en vacío y con una carga equivalente del 69% de la capacidad de la incubadora. Teniendo en cuenta que el contenido de agua de un huevo en su estado inicial es aproximadamente del 80% y que el huevo es un elipsoide cuyo volumen se puede calcular a partir de la Ecuación 5.

$$V = \frac{4}{3} \cdot a \cdot b^2$$

Ecuación 5

Siendo, en el caso de los huevos de perdiz, $a=2,7\text{cm}$ y $b=3,6\text{cm}$, tenemos que el volumen de agua equivalente, por huevo de perdiz es de 35 ml.

Tabla 19. Resumen de ensayos relativos al análisis del empleo de energía solar térmica como fuente de energía de apoyo en el sistema de calefacción de la incubadora comercial.

Año	2013		2012		2014
	Incubaciones estándar		Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
	6	7	Solar sin carga	Híbrido sin carga	Híbrido cargado al 69%
Semana	14-17	18-22	28-29	29-30	25
Días	(21,4)	(21,1)	(7)	(7)	(7)
Huevos	8262	9070	-	-	-
Carga equivalente	118 L	130 L			90 L
de la incubadora	91%	100%			69%

La contribución de energía eléctrica (kWh) es calculada en base al tiempo (horas) en que las dos resistencias eléctricas están activas y a su potencia (1700kW). La información sobre el estado de encendido/apagado de las resistencias eléctricas de calefacción únicamente está disponible durante el Experimento 3. Sin embargo, el estado de las resistencias de calefacción en el resto de los experimentos puede ser anticipada en base de la derivada de la temperatura de la incubadora; asumiendo que cuando las resistencias están activas la derivada de la temperatura es positiva y despreciando la inercia térmica del aire.

La contribución solar es calculada empleando los datos de temperatura registrados en distintas zonas del circuito de agua caliente del sistema de aporte de energía solar. El caudal

de agua ($\dot{V}_w$) que proporciona la bomba de circulación es de 0,0025 m³/min y la densidad del agua (ρ_w) a unos 45°C de temperatura es de 990,22 kg/m³. El caudal másico de agua ($\dot{m}_w$) es calculado según la Ecuación 6 (en kg/min).

$$\dot{m}_w = \rho_w \cdot \dot{V}_w \quad \text{Ecuación 6}$$

El caudal de calor ganado ($\dot{Q}$) expresado en kJ/min es calculado empleando la Ecuación 7:

$$\dot{Q} = \dot{m}_w \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde el calor específico (C_p) del agua a 45°C es 4,180 kJ/(kg·K) y ΔT es la diferencia de temperatura a la entrada y salida del intercambiador en un momento determinado. La ganancia de calor acumulado (Q en kJ) desde el inicio ($t=0$) hasta un momento determinado (t) es obtenido mediante la integración de la ganancia total de calor útil durante el periodo (Enibe, 2002):

$$Q = \int_0^t \dot{Q} \cdot dt = \int_0^t \dot{m}_w \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot dt \quad \text{Ecuación 8}$$

En lugar del caudal másico de agua ($\dot{m}_w$), se emplea la masa total de agua medida por el contador de consumo de agua al final de cada día (M_w):

$$Q = M_w \cdot C_p \int_0^t \Delta T \cdot dt \quad \text{Ecuación 9}$$

La ganancia de calor en el panel solar es estimada a través de la diferencia de temperatura entre la temperatura a la salida y la entrada al depósito del colector solar (según la Figura 46: T_3-T_2). Por otro lado, el calor transferido por el intercambiador a la incubadora es calculado empleando la diferencia de temperaturas a la entrada y salida de dicho intercambiador (según la Figura 46: T_5-T_4).

La función *trapz(X,Y)* de MATLAB calcula una aproximación de la integral de Y por medio del método trapezoidal.

7.3. Métodos de análisis de la información

7.3.1. Mapeado espacial de los datos

La construcción de redes tridimensionales de sensores junto al empleo de herramientas informáticas ofrece la posibilidad de recrear en forma de imagen tridimensional la distribución espacial dentro de un espacio determinado, del parámetro medido por los sensores.

Los trabajos realizados en la mismas cámaras frigoríficas descritas en el punto 7.1.2 (Figura 39) durante el año 2009, con la monitorización de temperatura empleando una red de sensores RFID (Figura 32), sirven como modelo para su utilización en los trabajos posteriores. Se emplearon funciones de lectura de datos, sincronización e interpolación (según el diagrama indicado en la Figura 38) de MATLAB® para analizar los datos y representar dichos datos en forma de mapa tridimensional (Figura 40).

Figura 38. Flujo de trabajo para análisis tridimensional de datos

Figura 39. Ejemplo de cámara frigorífica supervisada durante los trabajos realizados en Mercamadrid (Madrid, junio de 2009)

En este caso en lugar de la T media, se optó por representar la T normalizada (ΔT_n) y su varianza normalizada (V_n):

$$\Delta T_n = \frac{T_{im} - T_c}{T_e - T_c} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde T_{im} es la temperatura media del sensor, T_c la temperatura de consigna y T_e la temperatura exterior, en grados centígrados.

$$V_n = \frac{V_i}{V_e} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde V_i es la varianza de la temperatura de cada sensor y V_e es la varianza de la T exterior.

Figura 40. ΔT_n y V_n en el interior de una cámara frigorífica de hortalizas

La homogeneidad de la T y HR en todo el volumen de aire de una incubadora comercial de huevos de ave es un factor importante para el correcto desarrollo de los embriones. Esta homogeneidad depende del diseño de la incubadora y de una correcta ventilación. Por tanto es interesante determinar el correcto funcionamiento de la incubadora e identificar zonas de la incubadora donde se den condiciones desfavorables para la incubación. Debido a las limitaciones antes descritas, de las tarjetas RFID TurboTag, así como la necesidad de supervisar también la humedad relativa, se decidió emplear una red de sensores Sensirion SHT75 de montaje aéreo sin encapsular y cableados hasta el dispositivo con el microcontrolador.

7.3.2. Modelos de crecimiento

La producción de CO_2 durante el proceso de incubación relacionada con la actividad metabólica del embrión en el interior del huevo y su crecimiento ha sido validada empleando

dos modelos de crecimiento; el modelo logístico y el modelo de Gompertz. Son modelos que se han empleado para describir el crecimiento bacteriano (Zwietering et al., 1990) y el crecimiento de embriones de aves y mamíferos (Ricklefs, 2010), con resultados satisfactorios. La parametrización de estos modelos se resume en la Tabla 20. Se ha añadido el parámetro “ d ”, ya que se parte de una concentración inicial de CO_2 distinta de cero. El punto de inflexión corresponde al valor en el cual la segunda derivada es igual a cero. La tasa máxima de producción de CO_2 corresponde al valor de la primera derivada de la ecuación para $t=t_{ip}$.

Tabla 20. Parametrización de los modelos logístico y Gompertz		
	Modelo logístico	Modelo de Gompertz
Ecuación	$y = d + \frac{a}{1 + \exp^{b-cx}}$	$y = d + a \cdot \exp^{-\exp^{(b-cx)}}$
Tiempo en el punto de inflexión		$t_{ip} = \frac{b}{c}$
Tasa máxima de CO_2	$\mu_m = \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t_{ip}} = \frac{a \cdot c}{4}$	$\mu_m = \left(\frac{dy}{dt}\right)_{t_{ip}} = \frac{a \cdot c}{\exp(1)}$
Concentración inicial	$y = d + \frac{a}{1 + \exp^b}$	$y = d + a \cdot \frac{1}{\exp^{\exp^b}}$
Concentración límite	$y(t \rightarrow \infty) = d + a$	

Ambos modelos son ajustados por medio de herramientas de MATLAB de ajuste no lineal definiendo las ecuaciones con la función *fittype*. La herramienta de ajuste no lineal de MATLAB hace uso del algoritmo de Levenberg-Marquardt (LMA) (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963).

El LMA interpola entre el algoritmo de Gauss-Newton (GNA) y el método de descenso de gradiente. Los puntos de partida se establecen en el programa, basándose en los datos experimentales, para reducir el número de iteraciones y por lo tanto el tiempo de cálculo. El algoritmo calcula los parámetros y sus intervalos de confianza del 95% con la suma residual de cuadrados más bajo. El programa puede limitar el ajuste final mediante el establecimiento de límites superior e inferior para obtener valores para los parámetros consistentes. El LMA es un algoritmo más robusto que el GNA y por ello llega a una solución incluso partiendo de puntos de partida muy alejados de la solución.

7.3.1. Evaluación de la estabilidad térmica

Siguiendo la teoría de Eckmann and Ruelle (1985), la mejor forma de reconstruir el espacio de fases a partir de una serie temporal es mediante el empleo de retardos de tiempo. La

técnica funciona como se describe a continuación. Teniendo la serie temporal $(t(k), y(k))$ con un intervalo de tiempo fijo, entonces se puede construir el espacio de fase de dimensión n $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ a partir de la serie temporal de forma $y_i = y(k + \Delta i)$ con $i = 1, 2, \dots, n$ y $\Delta i = 0$, donde cada i define un retardo de tiempo dado por $\tau_i = t(k + \Delta i) - t(k)$. Se debe tener en cuenta que el retardo de tiempo no depende de k porque el paso de tiempo es fijo. Es decir, se representa las series temporales frente a sí misma con retraso de tiempo. Se selecciona para cada paquete de datos un polígono que incluye la mayor parte de los datos (por encima del 90%) y su área se determina como un indicador de la estabilidad de la temperatura (Correa et al., 2014; Jiménez-Ariza et al., 2014; Villarroel et al., 2011)

7.3.2. *Análisis termodinámico*

La recomendación ASAE D271.2 es empleada para el cálculo de las propiedades psicrométricas (ASABE, 2006): presión de saturación de vapor de agua, humedad relativa, humedad, volumen específico, entalpía, temperatura del punto de rocío, etc. Dichas ecuaciones permiten el cálculo de todas las propiedades psicrométricas de la mezcla aire vapor de agua a partir de datos de dos únicas propiedades. Rutinas de MATLAB desarrolladas por el grupo LPFG-Tagralia, incluyen las ecuaciones citadas y permiten la representación de las curvas psicrométricas, así como el cálculo de las distintas propiedades a partir de datos de T y HR .

8. Resultados

8.1. Diseño y modificación del aporte solar en una incubadora

8.1.1. *Incubadora comercial*

La finca de producción de perdices cuenta con una incubadora Victoria V-I-36 con capacidad para hasta 9072 huevos de perdiz. Es un modelo semi-industrial con control automático de temperatura y humedad. El calentamiento de la incubadora se realiza empleando dos resistencias calefactoras controladas por un regulador de temperatura. Un ventilador de aspas situado delante de las resistencias calefactoras homogeniza el aire en el interior de la incubadora (Figura 41). Un higrómetro mide la humedad en el interior de la incubadora y ésta es mantenida en el rango adecuado mediante un sistema que hace girar un rodillo de humectación que se sumerge en una bandeja llena de agua situada en el suelo de la incubadora para posteriormente evaporarse al estar situado frente al ventilador que distribuye el aire caliente procedente de las resistencias. La incubadora también cuenta con volteo automático programable de las bandejas de huevos. Este volteo es imprescindible para el desarrollo del embrión. La ventilación de la incubadora se produce por renovación natural del aire a través de dos ventanas circulares de apertura regulable, situadas en la parte superior de la incubadora.

Las ventanas tienen un diámetro de 15cm y el protocolo de incubación empleado en la explotación determina una apertura del 50%, lo que supone un área total de 707cm² de intercambio con el exterior.

Figura 41. Foto del interior de la incubadora. 1) Ventilador de aspas, 2) rodillo de humectación, 3) circuito de enfriamiento de emergencia, 4) resistencias de calefacción, 5) bandeja de agua, 6) panel de control

Las características técnicas de la incubadora se resumen en la Tabla 21. El circuito de enfriamiento original de la incubadora comercial consiste en un serpentín de tubo de cobre de 5,3 m de largo y un diámetro interno de 8 mm, el cual está soportado sobre un intercambiador de lamas de aluminio (Figura 42). En la configuración comercial de la incubadora, éste sistema entra en funcionamiento cuando la temperatura supera un umbral determinado (definido a 38,5°C), por la actuación de una electroválvula que abre el paso de agua de red. Éste sistema entra en funcionamiento en muy raras ocasiones y sólo en los meses de incubación en los que la temperatura externa es elevada (finales de mayo y junio).

Tabla 21. Características de incubadora Victoria V-I-36

Medidas (ancho / largo / alto)	193cm / 198cm / 182cm
Alimentación	220V A.C.
Potencia Total	2800 W
Construcción:	Paredes de 4,5 cm con aislante y doble plancha de acero
Calefacción	2 Resistencias con potencia total de 1700W controladas con sonda
Humedad	Rodillo de humectación controlado con sonda
Volteo Automático (45° a 135°)	Programable (establecido cada hora)
Enfriamiento	Circulación agua controlada por sonda y electroválvula
Capacidad huevos (especie)	5184 (gallina y pato selvático) / 3600 (pato y pavo) / 6120 (gallina Guinea) / 7056 (faisán) / 9072 (perdiz roja) / 12240 (codorniz) / 2016 (oca)

Figura 42. Esquema original sistema de calefacción y enfriamiento de la incubadora

8.1.2. Sistema de aporte solar

Para introducir un aporte de energía solar en la incubadora se cuenta con un colector solar de 15 tubos de vacío y acumulación de agua por termosifón en un depósito de 163L, colocados a la intemperie. El agua del interior de los tubos es calentada por efecto de la radiación solar incidente y asciende hacia el depósito. El agua del depósito, a su vez, calienta el agua del circuito secundario por medio de un serpentín de cobre de 22m de largo y $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro externo. El depósito cuenta además con la posibilidad de conexión de una resistencia eléctrica como fuente de energía auxiliar, que en este caso no empleamos.

El circuito primario (agua que circula en los tubos de vacío e interior del depósito) dispone de una válvula de llenado, que soluciona la pérdida de agua por evaporación. Un purgador automático en la zona superior del depósito solar evita que se produzca sobrepresión debido al calentamiento del agua. Las características técnicas del colector se resumen en la Tabla 22 y la Figura 43. La curva de rendimiento teórica del captador, mostrada en la Figura 44, refleja una disminución del rendimiento de captación cuando la radiación solar incidente es baja o cuando existe mucha diferencia de temperatura entre el colector y el ambiente. Ésta curva, característica de cada captador, se obtiene mediante el ajuste empírico y la ecuación que la determina en nuestro caso es la Ecuación 12.

Tabla 22. Características del colector solar de tubos de vacío

Número de tubos	15
Capacidad Total (L)	163
Área de absorción (m ²)	0,99
Área de apertura (m ²)	1,23

Peso sin agua (kg)	52
Material aislante del depósito	Espuma de poliuretano 50mm
Material depósito	Acero inoxidable 304 2B
Medidas (m)	H 1,6 W 1,6 L1 1,4 L2 1,6

Figura 43. Dimensiones del colector solar

Figura 44. Curva de rendimiento del captador (fuente: Solar Electric S.L.)

La curva de rendimiento teórica del captador solar proporcionada por el fabricante es:

$$\eta = -23,06 \cdot T_0^2 - 0,170 \cdot T_0 + 0,645 \quad \text{Ecuación 12}$$

En la que T_0 es:

$$T_0 = \frac{T_c - T_a}{G} \quad \text{Ecuación 13}$$

En los que, T_c es la temperatura media del captador (°C), T_a la temperatura ambiente media (°C) y G la irradiación solar incidente (W/m²).

En los trabajos abordados en el marco de esta Tesis Doctoral se ha partido de un captador (Figura 45) previamente adquirido para su empleo en otros trabajos con aporte de energía solar, con objeto de determinar la viabilidad de este tipo de sistemas (acoplamiento de energía solar térmica a incubadoras de aves comerciales). El planteamiento realizado no

contempla la implementación de un sistema para maximizar el aporte de energía solar al proceso, se centra en la obtención de datos para la determinación de su potencial.

Figura 45. Colector solar de tubos de vacío, instalado en el tejado de la sala de incubación

Se ha aprovechado el circuito de enfriamiento de emergencia existente en la incubadora y se han realizado las modificaciones oportunas para acoplar un circuito hidráulico de calentamiento con energía solar térmica. Toda la instalación del circuito solar se ha realizado con tubería de polipropileno (PPR) de 20mm de diámetro, apropiado para este tipo de sistemas. El sistema consiste en un circuito cerrado en el que el agua que sale del serpentín del depósito solar circula hacia un acumulador auxiliar de 80L y a continuación pasa por el intercambiador interior de la incubadora para posteriormente retornar de nuevo al depósito del colector solar.

El esquema completo del circuito modificado se muestra en la Figura 46 y la Figura 47 muestra una imagen real del sistema instalado.

Figura 46. Modificación y adaptación de sistema de calentamiento con energía solar a la incubadora comercial.

1) bomba de circulación (DAB modelo VSA 35/130, Dab Pumps Spa, Padova , Italia), 2) contador de consumo de agua, 3) electroválvula de 2 vías (Solar Orkli modelo 30212200, Solar Orkli S.Coop, Ordizia, España), 4) y 5) electroválvulas de 3 vías (Solar Orkli modelo 40212200), 6) electroválvula original de la incubadora para entrada de agua al circuito de refrigeración de emergencia, 7) sensor de T de entrada al intercambiador, 8) sensor de T de salida del intercambiador, 9) válvula vaciado del circuito 10) válvula de entrada de agua de red para enfriamiento.

Figura 47. Sistema de electroválvulas y bomba de circulación para la regulación de entrada al intercambiador de agua calentada con energía solar

Sistema de control y monitorización

Los distintos dispositivos empleados para el control y monitorización del sistema se han montado en 2 cajas de montaje eléctrico: en la primera de ellas se han instalado un módulo de relés ADAM 4068, para el control de las electroválvulas y la bomba de circulación y un módulo de entradas digitales ADAM 4055 para identificar el estado encendido/apagado de las resistencias eléctricas de calefacción (Figura 48 der). A su vez se han instalado leds de identificación del estado de la bomba de circulación, electroválvulas y resistencias eléctricas así como una seta de parada de emergencia (Figura 48 izq) para pulsar en el caso de aparición de cualquier problema ocasionado por el sistema de control de aporte solar térmico. Se ha instalado un regulador de temperatura que este caso se emplea únicamente como display de visualización de la temperatura del interior de la incubadora proporcionada por una sonda Pt100.

Figura 48. Caja con sistema de control. Vista exterior (izq) y vista interior (der)

En otra caja de conexiones eléctricas (Figura 49) se ha instalado un módulo ADAM 4015 para la conexión de las 6 sondas Pt100 distribuidas en el circuito de aporte de energía solar (según el esquema de la Figura 46). Una fuente conmutada de 24VDC alimenta los módulos ADAM.

Figura 49. Caja con dispositivo ADAM 4015 para conexión de sensores PT100 y fuente conmutada de alimentación para los módulos ADAM

El programa diseñado para la monitorización y control de la incubadora (Figura 50) incluye displays para la visualización de las temperaturas en los distintos puntos del sistema de aporte solar y en una última versión (realizada en junio de 2014), la radiación solar incidente sobre el colector. A su vez existe la posibilidad de hacer funcionar el sistema de aporte de energía solar (mediante el accionamiento de la bomba de circulación) de forma manual, con temporización, o de forma automática. Se ha establecido un sistema automático de control sencillo, basado en las temperaturas de la incubadora (T_6) y la temperatura del acumulador solar (T_1), según se indica en la Tabla 23. Además registra el estado de encendido/apagado de las resistencias de calefacción y de la bomba de circulación. Otra ventana del programa (Figura 51) permite la visualización de la temperatura y humedad relativa en distintas posiciones del interior de la incubadora, en la sala de incubación y en el exterior, así como la concentración de gases. El programa guarda automáticamente, con una frecuencia de

registro editable, todos los datos en un archivo auto titulado (fecha y hora de creación del fichero) tipo ‘.txt’.

Figura 50. Programa diseñado para la monitorización y control del sistema de aporte de energía solar térmica

Tabla 23. Control de temperatura de la incubadora con aporte de energía solar

Valor medido de Temperatura	Modo de operación
If $T_1 < 50^{\circ}\text{C}$	Control de fábrica de la incubadora comercial (calentamiento eléctrico)
If $T_1 \geq 50^{\circ}\text{C}$ and $T_6 < 36,3^{\circ}\text{C}$ ($35,9^{\circ}\text{C}$ para Exp 1)	Bomba y electroválvulas activadas (calefacción solar)
If $T_1 \geq 50^{\circ}\text{C}$ and $T_6 > 36,8^{\circ}\text{C}$ ($36,2^{\circ}\text{C}$ para Exp 1)	Bomba y electroválvulas desactivadas (sin calefacción)

Figura 51. Programa diseñado para la monitorización de temperatura y gases durante la incubación

8.2. Determinación de la estabilidad térmica y de la humedad relativa en el interior de la incubadora durante procesos estándar de incubación.

El primer trabajo realizado (García-Hierro et al., 2012) en la incubadora comercial fue determinar la estabilidad térmica y la variabilidad espacial de la misma en el interior de la incubadora, basada en una red tridimensional de sensores.

Empleando los métodos desarrollados para el análisis tridimensional de temperatura y humedad relativa en espacios cerrados, se monitorizaron 2 incubaciones durante los periodos comprendidos entre el 3 y 21 de mayo de 2011 y el 28 de mayo y 18 de junio de 2011, con una frecuencia de muestreo de 1 medida cada 3 minutos, empleando una red de 18 sensores Sensirion distribuidos en el interior de la incubadora. Se aprovechó la estructura de soporte de las bandejas (Figura 53) para colocar los sensores en dos planos paralelos: uno por delante del ventilador de aspas y otro en la cara cercana a la puerta de la incubadora (en azul y amarillo, respectivamente en la Figura 52).

Se calculó la temperatura media (T_m) y la humedad relativa media (HR_m) para cada sensor a lo largo de toda la incubación así como la desviación estándar (SD_T y SD_{RH}) de estos parámetros. La T_m más baja, en ambas incubaciones, se encontró en el sensor situado en la posición '1', la cual es una zona alejada de las resistencias de calefacción. La media global tanto de T como de HR (todos los sensores a lo largo de todo el proceso) y su respectiva desviación estándar global son muy similares para ambas incubaciones.

Tabla 24. Temperatura media (T) y humedad relativa media (HR) en el interior de la incubadora. Entre paréntesis, posición del sensor según la Figura 52

	Incubación	T_m (°C)	SD_T (°C)	HR_m (%)	SD_{HR} (%)
Máximo	1	37,9 (10)	±0,4 (18)	46,2 (8)	±3,0 (4)
	2	37,4 (2)	±0,4 (18)	46,1 (8)	±1,9 (14)
Mínimo	1	36,9 (1)	±0,1 (6)	42,2 (3)	±1,3 (8)
	2	36,6 (1)	±0,2 (6)	41,5 (3)	±1,4 (9)
Media global	1	37,3	±0,2	43,6	±1,5
	2	37,0	±0,2	43,6	±1,6

Figura 52. Distribución de los sensores en el interior de la incubadora

Figura 53. Colocación de sensores Sensirion en el interior de la incubadora

Como se aprecia en la Figura 54, la temperatura de la sala de incubación tiene variaciones diarias, debido a las fluctuaciones de temperatura exterior por los ciclos día-noche. Aun así, se puede considerar que la temperatura está en un rango aceptable para el correcto funcionamiento de la incubadora comercial (15°C-25°C). La temperatura media de la incubadora (media de todos los sensores instalados) es muy estable a lo largo del tiempo, existiendo pequeñas fluctuaciones producidas por el sistema de control.

Figura 54. Variación continua de la temperatura de la incubadora, en comparación con la temperatura ambiental externa y la temperatura de la sala de incubación, durante la incubación realizada entre el 28 de mayo y 18 de junio de 2011

La Figura 55 muestra claramente un gradiente en la temperatura del aire, generado por la transmisión de calor por convección forzada. La zona más caliente de la incubadora es la localizada cerca de las resistencias de calefacción y la más fría la zona cercana a la puerta de la incubadora. En el mapa de temperatura se aprecia una forma de flecha por el movimiento del aire forzado por el ventilador de aspas situado en la pared del fondo de la incubadora. Esta forma no es simétrica, debido muy probablemente al efecto del rodillo de humectación. La evaporación de agua en la zona cercana a ese rodillo (posición '18') provoca un descenso de la temperatura del aire que asciende hacia la posición '12'.

Figura 55. Mapa tridimensional de la temperatura media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona delantera y lateral izquierda de la incubadora)

Figura 56. Mapa tridimensional de la temperatura media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona trasera y lateral derecho de la incubadora)

La humedad relativa media más alta se encuentra en la parte inferior de la incubadora; pero a pesar de que cabría esperar que la zona cercana a la bandeja de humidificación fuera la más húmeda, el sensor que mide mayor humedad relativa se encuentra en la zona más cercana a la puerta de la incubadora. Es posible que la mayor densidad del agua con respecto al aire, haga que pequeñas partículas de agua nebulizadas se acumulen donde la corriente de aire choca con la puerta y cambia de dirección (zona roja en la Figura 57.)

Figura 57. Mapa tridimensional de la humedad relativa media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona delantera y lateral izquierdo de la incubadora)

Figura 58. Mapa tridimensional de la humedad relativa media durante la incubación correspondiente al periodo comprendido entre el 3 y 21 de mayo de 2011(zona trasera y lateral derecho de la incubadora)

8.3. Monitorización de la actividad biológica durante la incubación de perdiz roja

La monitorización de la concentración de CO_2 durante las incubaciones comerciales señaladas en la Tabla 18 como incubaciones 3 a 7, ha proporcionado datos que se analizan a continuación. La toma de datos de las incubaciones 3, 4 y 5 comenzó una vez iniciado el proceso (a los 9, 8,7 y 1,5 días respectivamente) y el fin de la toma de datos coincide con el momento del traspaso de los huevos de la incubadora a la nacedora.

Con el fin de analizar la estabilidad del sensor de CO_2 (Figura 60) se tomaron 864 medidas con la incubadora vacía y con funcionamiento normal de control de T y HR (Figura 59). Se obtuvo una concentración media de CO_2 de 428ppm con un coeficiente de variación (CV) de 2,5%. Ese valor se ha tomado como valor de referencia.

Figura 59. Ensayo para determinar la estabilidad del sensor de CO₂ frente a variaciones de temperatura en condiciones normales de funcionamiento normal de la incubadora

Figura 60. Imagen de los sensores de CO₂ (1) y de O₂ (2) instalados en la parte superior del interior de la incubadora

8.3.1. Evolución del CO₂ durante los procesos de incubación

De la Figura 61 a la Figura 65 se representa la variación de la concentración de CO₂ a lo largo de 5 procesos de incubación. En gris se representan los datos experimentales junto a la curva logística (azul) y de Gompertz (rojo). La concentración inicial de CO₂ se encuentra en todos los caso en torno a los 400 ppm, alcanzando un máximo de 1770 ppm para la segunda

incubación de 2012. Esta alta concentración de CO_2 coincide con la mayor tasa de nacimientos registrada (76,6%).

En todos los casos durante los primeros 8 días de incubación, el nivel de CO_2 aumenta lentamente. La producción de CO_2 se acelera y alcanza la tasa máxima de producción en torno a los días 14-15 días de incubación. Después la producción de CO_2 desacelera y crece asintóticamente hacia la concentración límite. De acuerdo con la concentración de CO_2 estimada para el día 20 de incubación, el modelo logístico parece simular de forma más realista el crecimiento asintótico.

Figura 61. Evolución de la variación de la concentración de CO_2 a lo largo del proceso de incubación en el periodo 13 Marzo-4 Abril de 2012, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz

Figura 62. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 6 -27 Abril de 2012, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz

Figura 63. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 30 Abril - 19 Mayo de 2012, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz

Figura 64. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 19 Marzo - 9 Abril de 2013, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz

Figura 65. Evolución de la variación de la concentración de CO₂ a lo largo del proceso de incubación en el periodo 16 Abril - 7 Mayo de 2013, junto a la curva de ajuste con los modelos logístico y de Gompertz

8.3.2. *Modelización de la producción de CO₂*

El instante correspondiente a la mayor tasa de crecimiento de CO₂ (t_i) varía en función del modelo empleado; de acuerdo con el modelo de Gompertz corresponde al día 16,0 día y al día 15,1 según el modelo logístico. Este parámetro está relacionado con el momento en que existe mayor desarrollo embrionario en el proceso de incubación.

En relación con las fluctuaciones de CO₂ durante la incubación, éstos son prácticamente inapreciables (por debajo de 50 ppm de rango de variación) durante los dos primeros días. Estas fluctuaciones se hacen claramente visibles a partir del sexto día y medio, en adelante. Este hecho está presente en todas las incubaciones. En resumen, se aprecian 3 tipos de variaciones de concentración de CO₂ a lo largo de los procesos:

- Un aumento de la concentración neta de CO₂ a lo largo de todo el proceso, causado por la actividad metabólica de los embriones en el interior de los huevos. En total esta producción de CO₂ ronda los 1200 ppm.
- Variaciones diarias que coinciden con ciclos día-noche y que son amplificadas hacia el final de la incubación, con un rango máximo de unos 200 ppm.
- Variaciones asociadas a oscilaciones suaves de la temperatura de la incubadora provocadas por el controlador de temperatura y que parecen aumentar la actividad metabólica de los embriones; con el consecuente aumento de la producción de CO₂ en un rango de hasta 120 ppm.

El aumento de la concentración de CO₂ en el interior de la incubadora está relacionada con la actividad biológica de los embriones y por lo tanto por con la cantidad de embriones vivos cuyo crecimiento requiere el consumo de oxígeno y producción de CO₂. Según este precepto, la concentración de CO₂ al final de la incubación debe estar relacionada con la tasa de nacimientos final. Durante el desarrollo de estos trabajos no existe un control diario de embriones vivos mediante apertura de huevos; ya que se trata de la monitorización de procesos comerciales de producción y el deseo de los dueños de la explotación es que se interfiera lo mínimo posible sobre el proceso. Sólo existen datos disponibles de la tasa de nacimientos final (tras 21 días en incubadora y 3 días en nacedora). Como muestra la Tabla 25, la mayor concentración de CO₂ se alcanzó durante la segunda incubación del año 2012 (1770ppm). El ajuste de los datos de concentración de CO₂ empleando ambos modelos de crecimiento tiene un r^2 elevado en todos los casos (por encima del 0,948). El momento en el que existe una mayor tasa de producción de CO₂ se encuentra en torno a los 15,6 días.

Tabla 25. Parámetros de ajuste de los modelos de Gompertz y logístico para el análisis de la concentración de CO₂ durante los ensayos.

Incubación	3		4		5		6		7	
CO ₂ mínimo (ppm)	585		568		411		333		376	
CO ₂ máximo (ppm)	1516		1770		1614		1369		1572	
Parámetro	Log	Gomp	Log	Gomp	Log	Gomp	Log	Gomp	Log	Gomp
a (ppm)	732	683	1159	1219	1350	2082	1150	1750	1316	2683
b	8,772	6,417	6,920	4,201	4,658	2,088	4,176	1,887	5,289	2,102
c (días ⁻¹)	0,672	0,510	0,450	0,283	0,299	0,124	0,278	0,116	0,326	0,107
d (ppm)	585	649	530	601	447	468	361	379	452	456
y(t=0) (ppm)	585	649	531	601	460	469	378	381	459	457
y(t=20 días) (ppm)	1310	1317	1560	1567	1514	1527	1281	1294	1471	1480
t _{ip} (días)	13,1	12,6	15,4	14,8	15,6	16,8	15,0	16,3	16,2	19,6
μ _m (ppm·días ⁻¹)	123	128	130	127	101	95	80	75	107	106
r ²	0,948	0,948	0,980	0,980	0,985	0,983	0,987	0,984	0,980	0,976

8.3.3. Relación entre la concentración de CO₂ a 20 días y la tasa de nacimientos

La Figura 66 muestra las rectas de correlación entre el número de pollos nacidos y la concentración de CO₂ estimada según los dos modelos de crecimiento analizados así como respecto a la concentración máxima alcanzada durante las incubaciones. De este gráfico se deduce que la capacidad predictiva en términos de pollos nacidos es superior cuando se emplea la concentración de CO₂ estimada a día 20 ($r^2=0,997$ y $r^2=0,994$) que cuando se emplea la concentración máxima determinada experimentalmente ($r^2=0,828$).

Los datos de las dos incubaciones de 2011 no se han incluido en la Figura 66 al no estar disponible la información de los sensores de CO₂. Por otra parte, las dos incubaciones de 2013 registraron una tasa de nacimientos anómalamente baja (40,7% y 34,7%), y por ello se han descartado para el ajuste. De acuerdo con el modelo logístico, en el año 2013, la tasa de nacimientos debería haber alcanzado un 72,9% y un 79,6%, respectivamente. Esta desviación entre los resultados obtenidos y los estimados es achacable a problemas en la última fase de incubación y nacimiento, donde los huevos son transferidos a la nacedora sin monitorización de CO₂; todo embrión en desarrollo en la incubadora contribuye metabólicamente al incremento de CO₂.

Figura 66. Correlación entre la estimación de la concentración de CO₂ en el día 20 y el número de pollos nacidos.

Tabla 26. Resultados de ajuste de los datos representados en la Figura 66 ('y' corresponde al número de pollos nacidos y 'x' a la concentración de CO₂ en ppm)

Datos de Ajuste (color Figura 66)	Ecuación	r ²
Modelo logístico (azul)	$y = 7,13x - 4221$	0,997
Modelo de Gompertz (rojo)	$y = 7,06x - 4173$	0,994
Datos experimentales (gris)	$y = 6,75x - 4826$	0,828

El análisis de las correlaciones entre los parámetros de los modelos permite evaluar la posible existencia de redundancia. La Tabla 27 incluye los coeficientes de correlación entre los valores de los parámetros ajustados para ambos tipos de modelos (Gompertz y logístico). El modelo de Gompertz muestra un mayor nivel de redundancia que el modelo logístico. Ambos modelos muestran un grado de redundancia entre los parámetros "b" y "c". De hecho, un valor que se toma como representativo es "b / c" (punto de inflexión) lo que significa que ambos se pueden combinar en un único parámetro.

Tabla 27. Correlación entre los parámetros obtenidos en los ajustes empleando los modelos logístico y de Gompertz.

	Logístico				Gompertz			
	a	b	c	d	a	b	c	d
a	1	-0,708	-0,784	-0,548	1	-0,804	-0,830	-0,639
b	-0,708	1	0,985	0,970	-0,804	1	0,996	0,934
c	-0,784	0,985	1	0,915	-0,830	0,996	1	0,897
d	-0,548	0,970	0,915	1	-0,639	0,935	0,897	1

8.4. Evaluación de la contribución solar en una incubadora híbrida (solar/eléctrica) de huevos de perdiz

8.4.1. Caracterización térmica de incubaciones estándar

Las Figuras 67 y 68 muestran la temperatura en la incubadora y la sala de incubación durante dos incubaciones estándar (20,5 y 21,1 días). La temperatura media en el interior de la incubadora fue de 36,9°C y 36,7°C respectivamente (éste valor difiere del indicado en la Tabla 18 debido a que son proporcionados por sensores distintos: media de los sensores Sensirion en la Tabla 18 y media de una sonda Pt100 en la Tabla 28). Por otro lado la temperatura media en la sala de incubación fue de 13,4°C y 17,9°C, respectivamente. En ambos casos el control de temperatura y la calefacción es llevada a cabo por el sistema con el que la incubadora viene equipada de fábrica. La Tabla 28 resume la temperatura media y su correspondiente desviación estándar en la incubadora y la sala de incubación. La temperatura de la incubadora es muy estable independientemente del tipo de control y calefacción (totalmente eléctrica, totalmente solar o híbrida). Donde sí existe gran variabilidad es en la temperatura media de la sala de incubación; como es de esperar tratándose de una edificación industrial sin acondicionamiento ni buen aislamiento térmico. Es interesante establecer que acorde a los datos del fabricante, la incubadora está diseñada para trabajar en zonas acondicionadas con temperaturas en torno a los 20°C, que es en los casos estudiados bastante variable (de 13,5°C a 33,3°C).

Figura 67. Caracterización térmica de incubación estándar 6: 20,5 días y 8262 huevos

Figura 68. Caracterización térmica de incubación estándar 7: 21,1 días y 9070 huevos

Tabla 28. Resumen de la temperatura de la incubadora y la sala de incubación durante los ensayos

Tabla 28. Resumen de la temperatura de la incubadora y la sala de incubación durante los ensayos							
Test	Periodo	Temperatura de la incubadora (°C)			Temperatura de la sala de incubación (°C)		
		Media	Max	Min	Media	Max	Min
Incubación estándar 6		36,9 ± 0,4	37,7	36,4	13,4 ± 3,6	22,2	8,5
Incubación estándar 7		36,7 ± 0,3	37,3	36,1	17,9 ± 6,1	26,5	11,5
Experimento 1: Contribución solar con incubadora vacía	1	36,0 ± 0,2	36,2	35,8	29,5 ± 3,5	31,6	26,2
	2	36,1 ± 0,2	36,4	35,8	30,9 ± 5,1	34,2	26,4
	3	36,0 ± 0,2	36,2	35,8	28,9 ± 2,9	30,7	26,0
	4	36,0 ± 0,2	36,3	35,8	29,8 ± 4,0	32,1	26,2
	5	36,0 ± 0,2	36,4	35,8	30,6 ± 3,3	32,9	27,2
	6	36,1 ± 0,3	36,5	35,8	31,3 ± 5,1	34,6	27,0
	7	36,1 ± 0,3	36,5	35,8	31,8 ± 5,5	35,5	26,5
Experimento 2: Sistema híbrido de calefacción con la incubadora vacía	1	36,6 ± 0,2	36,9	36,3	33,3 ± 4,3	36,2	29,0
	A	36,8 ± 0,2	37,2	36,6	27,3 ± 1,8	29,0	25,5
	2	36,6 ± 0,2	37,0	36,3	32,2 ± 3,6	34,7	28,9
	B	36,8 ± 0,2	37,1	36,6	26,4 ± 2,6	28,9	25,9
	3	36,5 ± 0,2	36,8	36,3	31,6 ± 2,3	33,7	28,3
	4	36,6 ± 0,2	36,8	36,3	31,7 ± 4,4	34,5	28,3
	5	36,6 ± 0,3	36,9	36,3	31,8 ± 4,5	35,1	28,2
Experimento 3: Sistema híbrido de calefacción con la incubadora llena al 69%	A	36,9 ± 0,3	37,3	36,6	22,4 ± 3,5	26,9	19,9
	1	36,5 ± 0,7	37,5	34,8	27,7 ± 2,2	30,2	24,7
	B	36,9 ± 0,3	37,3	36,5	22,7 ± 3,0	26,6	20,8

La temperatura media de la incubadora durante los periodos en los que existe aporte solar fue 0,9°C menor que durante los periodos de calefacción eléctrica, aunque la temperatura se mantuvo más estable durante los primeros que para estos últimos. Comparando los periodos de aporte eléctrico con los periodos de aporte solar, en los experimentos con sistema híbrido de calefacción, los periodos de aporte eléctrico muestran rangos de temperatura más estrechos. El sistema de calefacción híbrido, con un tiempo de respuesta más lento, se beneficiaría de un sistema de control difuso que permita un mejor control de la temperatura, así como un ahorro energético; algunos ensayos preliminares en el empleo de sistemas de control difuso se han presentado en congresos científicos (Abakarov et al., 2012)

8.4.2. Análisis de la contribución eléctrica y solar

La Tabla 29 muestra el periodo de tiempo durante el cual el control de temperatura lo realiza el equipamiento de fábrica de la incubadora (periodo de control eléctrico), así como el tiempo en que las resistencias eléctricas han entrado en funcionamiento para mantener la temperatura de la incubadora dentro del rango de consigna. Este tiempo se ha medido de forma real únicamente durante el desarrollo del Experimento 3, mientras que en el resto de

ensayos, la estimación del tiempo de funcionamiento de las resistencias se ha calculado como indica el punto 7.3.3. Como señala la Tabla 29, el tiempo estimado es algo mayor que el tiempo real de funcionamiento. Esto puede ser debido a la inercia térmica de las resistencias; ya que tardan menos en calentarse que en enfriarse y por lo tanto pueden seguir calentando el aire, aun tiempo después de haber sido apagadas. Partiendo de los valores del tiempo medido y el tiempo estimado de funcionamiento de las resistencias en el Experimento 3, se ha calculado un tiempo estimado corregido; usando como factor de corrección 0,8592 (media de la relación tiempo medido/tiempo estimado). Durante el periodo de tiempo en que existe control eléctrico, entre el 41,5% and 52,9% de la fracción de tiempo las resistencias están activadas. Con un sensor de temperatura se puede estimar la fracción de tiempo en que las resistencias están activas y por lo tanto tener una aproximación del consumo eléctrico.

Tabla 29. Cálculo de los periodos de activación de las resistencias eléctricas

Periodo		Duración de control eléctrico (min) / total (min)	Resistencias activas (tiempo medido, min)	Resistencias activas (tiempo estimado, min)	Resistencias activas (tiempo estimado corregido ¹ , min)	Fracción de tiempo de resistencias activas (%) / total (%)
Incubación estándar 6		29622 / 29622	-	14309	12294	41,5 / 41,5
Incubación estándar 7		29841 / 29841	-	14538	12491	41,9 / 41,9
Experimento 2: Sistema híbrido de calefacción incubadora vacía	A	562 / 1440	-	292	251	44,6 / 17,4
	B	448 / 1440	-	226	194	43,3 / 13,4
Experimento 3: Sistema híbrido de calefacción incubadora llena al 69%	A	768 / 1440	415	473	406	52,9 / 28,2
	B	547 / 547	220	275	236	43,2 / 43,2

¹ factor de corrección=0,8592

En las dos incubaciones estándar el periodo de control eléctrico se corresponde con la duración total de la incubación. La mediana de la fracción de tiempo en cual las resistencias están activadas es del 43,3%, el cual corresponde a un total de 218 horas en un proceso de incubación estándar de 21 días. El consumo eléctrico correspondiente a estas resistencias de calefacción (que suponen el mayor consumo de la incubadora) en el tipo de incubadora objeto de este estudio es de 370,6 kWh (1334,3 MJ).

La emisión neta de CO₂ en el sector energético español fue de 259 g/kWh durante el año 2014 (Fuente: UNESA, REE, IDAE, CNMC y MAGRAMA); por lo que cada incubación estándar tiene un consumo equivalente a la emisión de 96,0 kg de CO₂ al aire.

La Figura 69 muestra el análisis de la evolución de la temperatura en 5 puntos del circuito de calefacción con aporte de energía solar y el interior de la incubadora, con la incubadora vacía y empleando un control automático independiente del existente de fábrica. La temperatura

máxima en el interior del depósito del colector solar siempre permanece por debajo de los 70°C. Como se aprecia en la figura, en el caso más favorable (día 7), la temperatura del colector comienza a aumentar a partir de las 9:50 horas, alcanzando un máximo a las 19:20 horas.

La Tabla 30 refleja la duración diaria de los periodos con control solar; que se encuentra entre el 31,5 y el 60,4 % (entre 453 y 870 minutos al día). Control totalmente solar se refiere al periodo de tiempo donde la temperatura de la incubadora se encuentra en el rango de la temperatura de consigna. La temperatura del depósito del colector solar alcanza los 50°C aproximadamente a las 12:00 horas del día y en el día más favorable (día 7), dicha temperatura se mantiene por encima de los 50°C hasta casi las 3:00h del siguiente día. La contribución solar total es la suma del periodo de control totalmente solar y el tiempo en que la energía solar está siendo empleada para incrementar la temperatura de la incubadora desde la temperatura a la que ha descendido durante el periodo nocturno, hasta el rango de la temperatura de consigna. La temperatura media diaria de la incubadora es ligeramente menor (entre 36,0 y 36,1°C) que la empleada durante una incubación estándar con control eléctrico de fábrica (entre 36,8 y 36,7°C, según la Tabla 28). Esta diferencia se debe a un mal ajuste de la temperatura de consigna durante los ensayos y no a la insuficiencia de energía solar para conseguir una temperatura mayor.

Tabla 30. Contribución solar durante los experimentos 1,2 y 3

	Día	Control totalmente solar (min)	Contribución solar total (min)	Fracción diaria de contribución solar (%)
Experimento 1: Contribución solar con incubadora vacía	1	414	714	49,6
	2	519	765	53,1
	3	341	650	45,2
	4	400	673	46,7
	5	427	682	47,4
	6	629	838	58,2
	7	642	870	60,4
Experimento 2: Sistema híbrido de calefacción incubadora vacía	1	647	647	45,0
	2	713	713	49,5
	3	479	708	49,2
	4	515	781	54,2
	5	589	833	57,9
Experimento 3: Sistema híbrido de calefacción incubadora llena al 69%	1	453	453	31,5

Figura 69. Experimento 1. Temperatura en 5 puntos del circuito de aporte de energía solar y en el interior de la incubadora, con la incubadora vacía y empleando únicamente energía solar

Teniendo en cuenta que una incubación estándar, según se ha descrito arriba, consume una media de 1334 MJ, empleando un sistema híbrido de calefacción solar-eléctrico, se puede conseguir ahorrar entre 420,3 MJ y 805,9 MJ de energía eléctrica por incubación (31,5-60,4%). Este ahorro equivale a evitar la emisión de 58,0kg a la atmósfera.

Figura 70. Evolución de la temperatura en 5 localizaciones (según Figura 46) del circuito de agua del sistema de aporte de energía solar, durante un periodo de contribución solar en el Experimento 1

Debe tenerse en cuenta que la acumulación de calor en el depósito auxiliar de 80 L afecta a la transferencia de calor total. Éste elemento se ha añadido con la intención de mitigar los cambios dinámicos en la contribución solar diaria y para aprovechar el excedente de energía solar que se acumula en forma de calor sensible en un volumen de agua adicional. Esto hace posible extender el uso de calefacción empleando energía solar en periodos en que ésta no esté disponible (entre las 22:00 y 24:00 según la Figura 70).

8.4.3. Evaluación del sistema híbrido de calefacción

La Figura 71 muestra la temperatura registrada en la incubadora y en el circuito de aporte de energía solar durante un periodo de 5 días con la incubadora vacía. Hay un periodo de 2 días durante el cual el control híbrido (eléctrico de comercial + control de aporte solar) se mantiene funcionando de forma exitosa. En este intervalo de tiempo, la temperatura en el interior de la incubadora se mantiene correctamente, aunque la temperatura media cuando entra en funcionamiento el control solar es ligeramente menor (36,6°C) que cuando la calefacción se lleva a cabo mediante las resistencias eléctricas (36,8 °C). El aporte eléctrico de la incubadora fue apagado accidentalmente durante el periodo ‘B’ según se indica en la Figura 71, es decir, sin aporte eléctrico durante los periodos de insuficiencia de energía solar. A pesar de todo, la calefacción con energía solar siguió funcionando durante los periodos de insolación siendo suficiente para calentar el agua del colector solar por encima de los 50°C.

Figura 71. Experimento 2. Temperaturas en 5 puntos del circuito de aporte de energía solar y en el interior de la incubadora, con la incubadora vacía empleando el sistema híbrido de calentamiento con energía solar y eléctrica. A y B son ciclos de calentamiento eléctrico y 1, 2, 3, 4 y 5 periodos de calentamiento con energía solar

La Figura 72 proporciona información relativa a la variabilidad de la temperatura en el interior de la incubadora durante el Experimento 2. La derivada de temperatura es suavizada mediante el empleo del algoritmo de Savitzky-Golay, empleando tamaños de ventana de 3 y 9 elementos (equivalen a desfases de 3 y 9 min, respectivamente). En esta figura, se aprecian las diferencias en el funcionamiento del control solar y el control eléctrico: un comportamiento cíclico y regular del sistema de control de la calefacción eléctrica (A y B) frente al comportamiento más aleatorio del sistema de control de la calefacción con aporte solar (1, 2, 3, 4 y 5). A su vez, también se aprecia diferencia de funcionamiento dentro de los ciclos de control solar: así, mientras la temperatura de la incubadora se mantiene dentro del rango de la temperatura de consigna con el control híbrido, los ciclos de calefacción con energía solar (1 y 2) tienen un funcionamiento más suave que a partir del momento en que se interrumpe el control eléctrico (3, 4, y 5) y la temperatura cae por debajo de la temperatura de consigna durante el periodo nocturno. En los periodos de control solar 3, 4 y 5 existe un patrón de funcionamiento claro: primero existe un pico en la derivada producido por un calentamiento rápido inicial (I, II, III y IV) desde la temperatura a la que ha caído la incubadora desde el periodo nocturno y luego decrece el ritmo de ascenso (aun siendo siempre positiva) hasta alcanzar la temperatura de consigna.

Figura 72. Representación de la derivada de la temperatura de la incubadora suavizada empleando el algoritmo de Savitzky-Golay con una ventana de 3 y 9 elementos (3 y 9 minutos de desfase, respectivamente). A y B son ciclos de calentamiento eléctrico y 1, 2, 3, 4 y 5 periodos de calentamiento con energía solar

La Figura 73 muestra la temperatura registrada en la incubadora y el circuito de aporte de energía solar durante el periodo de un día y medio. En este ensayo la incubadora se llenó con 90 l de agua, que corresponden a una carga equivalente del 69% de la capacidad total de la incubadora. En este caso, la incubadora funcionó con el control híbrido de calefacción. El periodo de calefacción con energía solar ('1'), abarca un periodo de tiempo de 453 min desde aproximadamente las 13:00 hasta las 20:00 aproximadamente. Esto equivale a una contribución de aporte de energía solar del 31,5% del tiempo del experimento. Las zonas 'A' y 'B' de la figura corresponden a periodos de calefacción eléctrica y se prolongan hasta más allá de las 12 horas del mediodía; ya que el colector aún no ha captado energía suficiente para elevar la temperatura del circuito hasta el rango de trabajo ($>50^{\circ}\text{C}$). El claro efecto de la inercia térmica de la carga se aprecia por el amplio periodo de tiempo en que el circuito de aporte solar está activo y la temperatura de la incubadora crece lentamente hasta la temperatura máxima del rango de consigna en la zona '1'. Una vez más, la temperatura media durante el periodo con control solar ($36,5^{\circ}\text{C}$) es inferior a la del periodo con regulación eléctrica de fábrica ($36,9^{\circ}\text{C}$).

Figura 73. Experimento 3. Temperaturas en 5 puntos del circuito de aporte de energía solar y en el interior de la incubadora, con la incubadora llena al 69%, empleando el sistema híbrido de calentamiento con energía solar y eléctrica. A y B son periodos de calentamiento eléctrico y 1 es el periodo con calentamiento con energía solar

8.4.4. Análisis de la eficiencia del sistema de aporte de energía solar

La eficiencia del colector se estima (Tabla 31) a partir de la relación entre la ganancia de calor en el interior del colector (Ecuación 9, kWh) y la radiación solar media (kWh) incidente en la ubicación y el período del año en que se ha realizado el trabajo. Este valor es del mismo orden que el calculado a partir de la curva teórica de rendimiento suministrada por el fabricante colector (Ecuación 12 y Ecuación 13) aunque en la mayoría de los casos, la eficiencia estimada es mayor que el rendimiento teórico (aproximadamente del 60%).

Tabla 31. Análisis de la temperatura, el calor y el rendimiento del circuito de calefacción solar. El tanque colector y las temperaturas ambientales medias (T1 y Te, respectivamente) promedio se calculan para períodos de sol

Experimento	Periodo	Temperatura media del depósito colector (°C)	Temperatura media del ambiente (°C)	M _w (kg)	Calor transferido a la incubadora (KWh)	Calor ganado en el colector solar (KWh)	Eficiencia de colector solar estimada (%)
Experimento 1: Contribución solar con incubadora vacía	1	55,4	30,3	1255	1,60	5,47	66,6
	2	56,8	32,1	1098	1,75	7,03	85,5
	3	54,6	30,1	1271	1,38	5,48	66,6
	4	55,8	33,1	1100	1,48	5,79	70,5
	5	55,1	35,6	1047	1,43	4,74	57,7
	6	57,6	35,3	1037	1,85	6,36	77,4
	7	57,8	34,6	1012	1,88	6,88	83,8
Experimento 2: Sistema híbrido de calefacción incubadora vacía	1	60,3	35,2	352	1,40	5,16	62,7
	2	56,5	34,8	565	1,93	6,42	78,2
	3	54,6	34,1	1104	1,34	4,19	51,0
	4	55,9	33,8	1237	1,72	5,19	63,2
	5	56,6	35,6	1258	1,96	5,43	66,0
Experimento 3: Sistema híbrido de calefacción incubadora llena al 69%							
	1	51,2	32,0	1065	2,22	3,93	44,4

La Tabla 31 también muestra que la cantidad de energía transferida a la incubadora es pequeña comparada con la energía capturada por el colector solar, como consecuencia de emplear un circuito preexistente en el diseño de fábrica de la incubadora y que originalmente está diseñado para refrigerar la incubadora con agua fría en caso de sobrecalentamiento de la incubadora. Por otro lado, es necesario optimizar el circuito para reducir las pérdidas de calor a través de las conducciones y optimizar el volumen de acumulación de agua.

Sin embargo a la vista de los resultados de estabilidad de temperatura en el interior de la incubadora y el prolongado tiempo de aporte de energía solar (de hasta un 61,8%), se sugiere que este tipo de diseños puede ser una opción verdaderamente útil y rentable económicamente, en nuestras latitudes.

8.4.5. Evaluación de la estabilidad térmica

En base a la teoría de espacio de fase explicada en el punto 7.4.1, se analiza la estabilidad térmica de los distintos experimentos llevados a cabo. El valor óptimo de los retardos de tiempo se obtiene heurísticamente, empleando el valor 9 en éste caso (que corresponde a 9 min de retardo).

La Figura 74 muestra la estabilidad térmica de los cinco set de datos (2 incubaciones comerciales y 3 experimentos) en base a la teoría de espacio de fase. La estabilidad térmica se avalúa en términos del área del polígono que reúne el 90% de los datos con menor dispersión; cuanto menor es dicha área, mayor es la estabilidad térmica. El área obtenida en los experimentos 1 a 3 se sitúa entre el 27 y 35% del área de los diagramas para las incubaciones estándar. El diagrama de espacio de fase del experimento 3 (en negro en la Figura 74), en el cual se empleó el sistema híbrido de calefacción, entra dentro del rango del diagrama de las incubaciones comerciales (rojo y amarillo en la misma figura). La longitud del diagrama de espacio de fase en el eje x está relacionada con el intervalo de temperatura y Teniendo en cuenta la región que reúne al 90% de los datos de cada experimento, se puede concluir que las áreas del diagrama de espacio de fase para los experimentos con energía solar e híbridos representan el 34% del área de los diagramas para las incubaciones estándar.

Figura 74. Diagrama de espacio de fase de los cinco test realizados para $td=9$. Cada nube representa los datos con menor dispersión, cuya área representa el 90% del total

Para el Experimento 2 (único experimento en el cual existe un número apreciable de observaciones tanto de calefacción con aporte eléctrico como con aporte solar), se ha

analizado el área de los polígonos que describen el espacio de fase de cada uno de los tipos de calefacción que son apreciados con claridad (solar y eléctrica) (Figura 75).

Figura 75. Diagrama de espacio de fase para la temperatura de la incubadora durante el desarrollo del Experimento 2 donde se aprecia los periodos de calefacción con energía solar y con resistencias eléctricas

9. Discusión

9.1. Sobre el seguimiento de la actividad biológica mediante CO₂

9.1.1. Control del CO₂ vs seguimiento

Los experimentos descritos en la bibliografía se centran en la exposición de los huevos incubados a distintas concentraciones de CO₂, mediante control externo de la atmósfera, y valoración de los efectos que dichas concentraciones producen sobre el desarrollo de los embriones tanto durante el propio periodo de incubación, como en el nacimiento y desarrollo posterior de los pollos (Onagbesan et al., 2007).

Los estudios revisados se centran en especies de elevado interés económico a nivel mundial, principalmente en huevos de gallina (*Gallus gallus*), encontrando algunas experiencias en pavo (*Meleagris gallopavo*).

Los aspectos mencionados justifican la oportunidad de emplear la medición de la concentración de CO₂ como indicador de la actividad biológica de los embriones en crecimiento durante la incubación. En la actualidad se emplea el control de la atmósfera de CO₂ en incubadoras de gran escala para la producción de pollos, ya que la inyección de este gas en niveles controlados acelera el proceso de incubación y aumenta el tamaño de los individuos. En cambio, éste tipo de sensores no se instalan en incubadoras de pequeño y mediano tamaño como son las incubadoras dedicadas a la producción de especies de interés especies de interés cinegético como la perdiz roja (*Alectoris rufa*).

Los niveles de CO₂ que producen efectos negativos durante la incubación varían durante el proceso oscilando entre un 1% y un 3% durante el primer tercio (Taylor and Kreutziger, 1965; Taylor et al., 1956), entre un 6% y un 8% durante el segundo (Taylor and Kreutziger, 1966, 1969) y entre un 4% y un 7% en su tercio final (Everaert et al., 2007; Everaert et al., 2012; Taylor et al., 1971). Los niveles máximos de CO₂ registrados durante las incubaciones comerciales ensayadas (0,14% a 0,18%) en las condiciones de ventilación correspondientes a incubaciones comerciales, distan mucho de alcanzar estos niveles pernicioso; Por ello, a pesar de tratarse de especies diferentes no se espera riesgo alguno de afectación por hipercapnia durante el proceso de incubación.

Algunos de los trabajos revisados revelan efectos beneficiosos del incremento en las concentraciones de CO₂ durante el proceso de incubación. En el trabajo de De Smit y colaboradores (De Smit et al., 2006), empleando una incubadora con ventilación (con una carga de 800 huevos de gallina), se alcanzó un nivel de CO₂ del mismo orden (1000 ppm) que el alcanzado en los resultados presentados en esta Tesis. En los trabajos de Buys y colaboradores (Buys et al., 1998), y de De Smit y colaboradores (De Smit et al., 2008), se registran concentraciones máximas de CO₂ de 4000 ppm y 7000 ppm, respectivamente, durante un proceso de incubación sin ventilación. Todos estos trabajos muestran una reducción del tiempo de incubación y una mejora de la tasa de nacimientos de los pollos. Otros trabajos también reflejan mejoras en la tasa de nacimientos ante el incremento en la concentración de CO₂ en combinación con otros factores (Tona et al., 2007). Estos y otros estudios revisados demuestran mejoras en la tasa de nacimientos ante incrementos graduales de la concentración de CO₂ (hasta 15000 ppm) durante las primeras fases de la incubación por lo que podría ser interesante cómo afectaría reducir los niveles de ventilación en las incubaciones comerciales supervisadas en el marco de esta Tesis Doctoral podrían reducirse con objeto de lograr un ahorro de energía y una potencial mejora en la tasa de nacimientos.

El seguimiento de la variación del CO₂ durante la incubación ha demostrado ser una herramienta útil para la identificación de problemas durante la incubación y la toma de decisión de los productores. Asimismo puede ser una herramienta de gran utilidad en la realización de futuros ensayos orientados a la determinación de los niveles óptimos de ventilación teniendo en cuenta su incidencia en la evolución de la concentración de CO₂.

9.1.1. Parámetros fisiológicos y su relación con el CO₂

El CO₂ liberado por los huevos durante el proceso de incubación procede en una fase temprana del reservorio natural en el albumen combinado con la producción metabólica limitada del embrión mientras que en una fase posterior está constituido fundamentalmente por la producción metabólica del embrión y por una liberación limitada por parte del

albumen (Onagbesan et al., 2007). Este mismo trabajo de revisión apunta el incremento de mortalidad de embriones debido al aumento de pH derivado de la pérdida de CO₂ del albumen cuando los huevos son almacenados inadecuadamente durante periodos prolongados.

La evolución observada en las concentraciones de CO₂ durante las incubaciones comerciales monitorizadas se ajusta a la dinámica descrita en la bibliografía de forma que el seguimiento de las concentraciones de CO₂ durante una fase temprana puede potencialmente emplearse para identificar lotes que hayan sufrido un almacenamiento inadecuado durante la incubación. El crecimiento observado en las concentraciones de CO₂ apunta que a partir de la mitad de la incubación la concentración de CO₂ se corresponde fundamentalmente con la tasa de producción metabólica por parte de los embriones, lo que, para un lote homogéneo de huevos, permite su asociación con el número de embriones en crecimiento y con ello con la nascencia potencial, esta hipótesis se ha visto corroborada por los modelos de estimación de nacimientos en función de las concentraciones de CO₂ al final de la fase de incubación, que permiten estimar el número de nacidos con un elevado coeficiente de determinación.

9.1.2. Potencial del CO₂ para monitorización de ciclos vitales

La rápida respuesta observada en la variación a la concentración de CO₂ permite la identificación de ciclos diarios asociados a la actividad metabólica de los embriones durante el proceso de incubación. El estudio de estos ciclos de actividad ha sido abordado por la comunidad científica desde el punto de vista del control del ritmo cardiaco por parte de los embriones y sus variaciones a lo largo del desarrollo embrionario o como respuesta a cambios en la composición gaseosa o en la temperatura (Andrewartha et al., 2011). La marcada apreciación de ciclos diarios en la concentración de CO₂ en la incubadora sugiere una sincronización del lote en su interior. La posibilidad de estudio de los ciclos de actividad metabólica, seguramente asociados a un mayor consumo de oxígeno y producción de CO₂, en un lote completo de huevos empleando un único sensor es un aspecto de potencial interés tanto para la comunidad científica como para los profesionales del sector ya que están descritas variaciones en éstos ciclos ante diversos factores externos así como en los momentos previos a la eclosión.

9.2. Sobre el empleo de energía solar en la incubación de huevos

9.2.1. Potencia y temperatura de uso en la producción avícola

En esta Tesis, se han alcanzado en el colector solar una temperatura máxima de 68°C. Es más, en el día con mayor radiación solar se registró una temperatura media del colector de 57,7°C; valores muy interesantes considerando que el proceso de incubación es de baja

temperatura (36-37°C). En la bibliografía revisada, Bolaji (2008) obtiene temperaturas medias de hasta 72,4°C empleando un colector solar plano de calentamiento de aire. Las latitudes en las que se obtuvieron esos resultados son más favorables que las nuestras para el empleo de este tipo de tecnología ya que tienen una radiación solar incidente y temperatura ambiental bastante elevada (32,3°C en este caso). En cualquier caso, ambas localizaciones registran temperaturas ambientales, durante las horas de sol, que reducen significativamente las necesidades de aporte de energía extra para el proceso de incubación.

La temperatura del interior de la incubadora se mantuvo muy estable durante los ensayos realizados empleando energía solar, como se aprecia en los diagrama de espacio de fase de la Figura 74. La temperatura de las incubaciones estándar analizadas (entre 36,7°C y 37,3°C) son algo más bajas que las temperaturas de incubación recomendadas en la bibliografía (French, 1997) pero es una temperatura que los expertos de la explotación han detectado como idónea para la obtención de resultados óptimos en su contexto. Atendiendo a los diagramas de espacio de fase, durante los ensayos empleando aporte solar, la temperatura de la incubadora se mantiene en el rango de funcionamiento de las incubaciones estándar. Únicamente un error en la introducción del dato de temperatura de consigna durante el Experimento 1, situó la temperatura de la incubadora por debajo del rango normal de funcionamiento.

9.2.2. *Temporalidad y acumulación de energía*

La temporalidad de la radiación solar hace necesario el empleo de sistemas de acumulación de energía para aprovechar el exceso de energía existente en las horas de mayor radiación. Los colectores solares comerciales, como es el caso del empleado en el desarrollo de la presente Tesis, mayoritariamente emplean el agua para almacenar energía en forma de calor sensible. Las limitaciones existentes en el desarrollo del sistema de aporte de energía solar y su implementación en la incubadora comercial, con la menor intrusión posible, descarta el empleo de colectores solares térmicos de calentamiento de aire como el empleado en los trabajos de Bolaji (2008) y Cordeau and Barrington (2010, 2011).

En nuestros ensayos, la temperatura del acumulador del colector solar comienza a aumentar a partir de las 9:50 horas llegando a un máximo sobre las 19:20 horas. Existe un desfase entre la radiación solar incidente y la temperatura, debido al empleo de agua como fluido de transferencia de energía. En otros trabajos, se alcanzan temperaturas de hasta 70°C en el colector solar coincidiendo con el instante de mayor radiación solar incidente (14:00 horas) (Enibe, 2002). Esta coincidencia entre la máxima temperatura del colector y la radiación máxima incidente es lógica en este caso, ya que se emplea aire en lugar de agua. Este aire

circula continuamente a través del colector y su calor lo transfiere a un sistema de acumulación basado en parafina.

9.2.3. Tasas de eficiencia y de éxito

El rendimiento teórico del panel solar empleado, en las condiciones ambientales en las que se han realizado los experimentos, es del 61%. Este rendimiento está próximo al 65% que es el máximo rendimiento de este tipo de colectores (CENSOLAR, 2005). La eficiencia del colector estimada en términos de la relación entre el calor ganado en el acumulador (diferencia de temperatura a la salida y entrada del acumulador) y la radiación solar incidente sobre el colector, es superior al rendimiento teórico del panel solar (hasta el 85,5%).

Los periodos de sustitución de la energía eléctrica para calefacción por energía solar térmica alcanzados; entre un 31,5% y un 60,5% del tiempo por día, pueden suponer un importante ahorro económico para los productores. El único sistema comparable encontrado en la bibliografía corresponde a Bolaji, con cuyo sistema de colectores solares para calentamiento de aire y almacenamiento de calor en rocas, para una pequeña incubadora de huevos de gallina, consiguió una cobertura con energía solar del 68,7%. Por otro lado, existen trabajos sobre climatización de gallineros que emplean otros sistemas de aprovechamiento de energía solar térmica: concentradores parabólicos (Fawaz et al., 2014) y concentradores planos sin aislamiento (Cordeau and Barrington, 2011) en los que se han conseguido ahorros energéticos de hasta el 74% y 64,1%, respectivamente.

9.3. Uso y explotación de la información generada

La creación de redes de sensores en la incubadora permite la caracterización de distintos factores ambientales (T y HR) en el interior de la incubadora así como la identificación de puntos críticos para el control. La existencia de gradientes térmicos en el interior de la incubadora ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) es una cuestión sensible que ha sido contrastada en otros trabajos (Lourens, 2001) y que debe ser tomada en cuenta para la posible mejora de diseño.

El empleo del diagrama de fases de las temperaturas experimentadas en diversas localizaciones de una estancia o contenedor se ha mostrado adecuado para valorar la estabilidad durante un periodo de tiempo (Jiménez-Ariza et al., 2014). Su aplicación durante la incubación resulta adecuada para la valoración de la estabilidad térmica y permite apuntar la idoneidad del sistema de aporte de energía solar térmica implementado como fuente de calor en la incubadora comercial.

La estimación de la tasa de nacimiento y la posible detección precoz de problemas acaecidos durante el periodo de incubación permitirá a las explotaciones una planificación más

eficiente. El análisis de la información registrada por el sistema y recogida en bases de datos históricas permitirá ahondar en el conocimiento del proceso por parte de los productores.

10. Conclusiones

La caracterización espacio-temporal de las temperaturas registradas en incubaciones comerciales muestra que el sistema de regulación original de la incubadora (temperatura y humedad relativa) funciona con más precisión de lo esperado a tenor de la bibliografía estudiada. El gradiente espacial en el interior de la incubadora es de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, mientras que la oscilación temporal alcanza $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. La red de sensores de temperatura permite discriminar variaciones de temperatura asociadas al diseño de la incubadora comercial tales como las debidas a la posición del rodillo de humectación. A partir de estos datos es posible identificar la localización óptima de los sensores (parte superior central) de cara a realizar el seguimiento de las incubaciones mediante la colocación de un único sensor de temperatura.

En esta tesis se han supervisado con éxito cinco incubaciones comerciales de perdiz roja en 2 años empleando para ello un sensor comercial estándar de CO_2 . Los modelos de crecimiento basados en la función de Gompertz y logística permiten ajustar la evolución de los niveles ambientales de CO_2 y estimarlo al final de la incubación (d20) con coeficientes de determinación (r^2) superiores a 0,94.

La concentración de CO_2 en el interior de la incubadora puede emplearse como indicador fiable de la actividad biológica y por lo tanto ser asociado al número de embriones en desarrollo durante el proceso de incubación. Las concentraciones de CO_2 predichas por los modelos de crecimiento para el vigésimo día de incubación permiten la estimación del número de nacimientos con coeficientes de determinación (r^2) superiores al 0,99. Por tanto,

puede proponerse como sensor inteligente uno que basado en la determinación objetiva del CO₂ sea capaz de auto-ajustar la actividad biológica y estimar el punto final de la incubación.

El consumo energético medio de la incubadora (d1-d20) para una incubación comercial es de 371 kWh. El sistema de apoyo solar implementado permite aportar en nuestras condiciones geográficas hasta un 42% de esta demanda de energía con una temperatura de consigna de 36.8°C, sin comprometer la estabilidad de la temperatura. La representación del espacio de fase supone una herramienta útil en cuanto a la evaluación de la estabilidad térmica, crucial durante el proceso.

La implementación de un sistema de apoyo basado en energía solar térmica combinado con sensores inteligentes en incubadoras comerciales, permite no sólo un ahorro relevante en la factura energética sino también la introducción de herramientas de ayuda a la decisión altamente valoradas por los responsables de la explotación e imprescindibles cuando se incorpore un aporte de energía que es inherentemente variable en el tiempo como el solar térmico.

11. Propuesta de trabajos posteriores

- Uno de los aspectos verificados mediante la monitorización de los niveles de CO₂ es la presencia de ciclos diarios de actividad. El estudio de los datos disponibles y de nuevos datos de incubaciones comerciales permitirá comprender las dinámicas de éstas y otras variaciones cíclicas en la actividad de los embriones y su asociación con otros parámetros fisiológicos ya descrito en anteriores experiencia a escala de laboratorio.
- El potencial de la monitorización de las concentraciones de CO₂ como estimador de la actividad biológica resulta extrapolable a las nacedoras donde permitiría discriminar entre las distintas fases previas al nacimiento (rotura de la membrana interna, rotura de la cáscara, etc.) asociadas a distintos niveles de actividad de los pollos.
- La implementación de un sistema de control difuso para la regulación del sistema de calefacción híbrido de la incubadora puede mejorar el actual sistema de regulación, aportando un control más fino de la temperatura y una mejora en el ahorro energético.
- La incorporación de cálculos termodinámicos en línea, tales como la determinación de la eficiencia instantánea del captador solar, cantidad de calor disponible en el depósito solar y calor instantáneo transferido a la incubadora puede ser una herramienta útil para mejorar el sistema de control y mejorar el rendimiento del sistema. Puede ser interesante para los productores, la incorporación de una

herramienta de visualización directa de la energía eléctrica ahorrada durante el proceso de incubación.

- Determinación de costes adicionales por la implantación de sistemas de aporte de energía solar en incubadoras comerciales y tiempo de amortización de la inversión.

12. Bibliografía

- Abakarov, A., Jiménez Ariza, H.T., Correa-Hernando, E., Diezma, B., Arranz, F.J., García-Hierro, J., Robla, J.I., Barreiro, P., 2012. Smart Fuzzy Control of a Solar Dryer Through Using Low Cost Model Based Sensors, International Conference on Agricultural Engineering AgEng, Valencia (España).
- Aebischer, N.J., Potts, G.R., 1994. Red-legged partridge (*Alectoris rufa*), In: Tucker, G.M., Heath, M.F., Tomialojc, L., Grimmett, R.F.A. (Eds.), Birds in Europe: Their conservation status. BirdLife International, Cambridge, UK.
- AEMET, 2015. www.aemet.es.
- Andrewartha, S.J., Tazawa, H., Burggren, W.W., 2011. Embryonic control of heart rate: Examining developmental patterns and temperature and oxygenation influences using embryonic avian models. *Respiratory Physiology & Neurobiology* 178, 84-96.
- Ar, A., Rahn, H., 1980. Water in the Avian Egg: Overall Budget of Incubation. *American Zoologist* 20, 373-384.
- ASABE, 2006. Psychrometric Data ASAE D271.1 APR1979, R2005, , St. Joseph, MI.
- ASABE, 2008. Design of Ventilation Systems for Poultry and Livestock. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.
- ASHRAE, 2011. Environmental Control for Animals and Plants. HVAC Applications. ASHRAE inc, Atlanta, GA.

- Bolaji, B.O., 2008. Design and performance evaluation of a solar poultry egg incubator. *Thammasat International Journal of Science and Technology* 13, 47-55.
- Bouadila, S., Kooli, S., Skouri, S., Lazaar, M., Farhat, A., 2014. Improvement of the greenhouse climate using a solar air heater with latent storage energy. *Energy* 64, 663-672.
- Brewer, R.N., Flood, C.A., Koon, J.L., 1978. Potential for conversion and utilization of solar-energy in poultry production-Design of research facility. *Poult. Sci.* 57, 1121-1121.
- Brewer, R.N., Flood, C.A., Koon, J.L., 1981. Solar heating of poultry houses. 3. Design and testing of research facilities. *Poult. Sci.* 60, 1802-1806.
- Brewer, R.N., McDaniel, G.R., Flood, C.A., Koon, J.L., White, M., 1975. Potential for solar-energy utilization in poultry production-Fuel use survey. *Poult. Sci.* 54, 1737-1738.
- Buhr, R.J., 1995. Incubation Relative Humidity Effects on Allantoic Fluid Volume and Hatchability. *Poult. Sci.* 74, 874-884.
- Buys, N., Dewil, E., Gonzales, E., Decuyper, E., 1998. Different CO₂ levels during incubation interact with hatching time and ascites susceptibility in two broiler lines selected for different growth rate. *Avian Pathology* 27, 605-612.
- Caslin, B., Cirillo, M., Finnan, J., Forristal, D., Gaffney, M., McCutcheon, G., Murphy, M., Sproule, I., Upton, J., 2011. Energy use in agriculture. Teagasc, Carlow, Ireland.
- CENSOLAR, 2005. Instalaciones de energía solar. Progensa, Sevilla.
- Cesare, S., 2001. Survey of energy resources 2001-solar energy. World Energy Council, Londo,UK.
- Cordeau, S., Barrington, S., 2010. Heat balance for two commercial broiler barns with solar preheated ventilation air. *Biosyst. Eng.* 107, 232-241.
- Cordeau, S., Barrington, S., 2011. Performance of unglazed solar ventilation air pre-heaters for broiler barns. *Solar Energy* 85, 1418-1429.
- Correa, E.C., Jiménez-Ariza, T., Díaz-Barcos, V., Barreiro, P., Diezma, B., Oteros, R., Echeverri, C., Arranz, F.J., Ruiz-Altisent, M., 2014. Advanced Characterisation of a Coffee Fermenting Tank by Multi-distributed Wireless Sensors: Spatial Interpolation and Phase Space Graphs. *Food Bioprocess Technol* 7, 3166-3174.
- Corsi, C., 1995. Smart sensors. *Microsystem Technologies* 1, 149-154.

- Cruz, S.R., Romanoff, A.L., 1944. Effect of Oxygen Concentration on the Development of the Chick Embryo. *Physiological Zoology* 17, 184-187.
- Davis, T.A., Ackerman, R.A., 1987. Effects of increased water loss on growth and water content of the chick embryo. *J Exp Zool Suppl* 1, 357-364.
- Davis, T.A., Shen, S.S., Ackerman, R.A., 1988. Embryonic osmoregulation: consequences of high and low water loss during incubation of the chicken egg. *The Journal of experimental zoology* 245, 144-156.
- De Smit, L., Bruggeman, V., Debonne, M., Tona, J.K., Kamers, B., Everaert, N., Witters, A., Onagbesan, O., Arckens, L., De Baerdemaeker, J., Decuypere, E., 2008. The effect of nonventilation during early incubation on the embryonic development of chicks of two commercial broiler strains differing in ascites susceptibility. *Poult. Sci.* 87, 551-560.
- De Smit, L., Bruggeman, V., Tona, J.K., Debonne, M., Onagbesan, O., Arckens, L., De Baerdemaeker, J., Decuypere, E., 2006. Embryonic developmental plasticity of the chick: Increased CO₂ during early stages of incubation changes the developmental trajectories during prenatal and postnatal growth. *Comp. Biochem. Physiol. A-Mol. Integr. Physiol.* 145, 166-175.
- Decuypere, E., Malheiros, R.D., Moraes, V.M.B., Bruggeman, V., 2003. Fisiologia do embrião, In: Macari, M., Gonzalez, E. (Eds.), *Manejo da incubação*, 2 ed. Facta, Campinas, pp. 65-94.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1980. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley New York etc.
- Eckmann, J.P., Ruelle, D., 1985. Ergodic theory of chaos and strange attractors. *Reviews of Modern Physics* 57, 617-656.
- Enibe, S.O., 2002. Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage. *Renew. Energy* 27, 69-86.
- Everaert, N., De Smit, L., Debonne, M., Witters, A., Kamers, B., Decuypere, E., Bruggeman, V., 2008. Changes in Acid-Base Balance and Related Physiological Responses as a Result of External Hypercapnia During the Second Half of Incubation in the Chicken Embryo. *Poult. Sci.* 87, 362-367.
- Everaert, N., Kamers, B., Witters, A., De Smit, L., Debonne, M., Decuypere, E., Bruggeman, V., 2007. Effect of Four Percent Carbon Dioxide During the Second Half of Incubation on Embryonic Development, Hatching Parameters, and Posthatch Growth. *Poult. Sci.* 86, 1372-1379.

- Everaert, N., Willemsen, H., Debonne, M., Witters, A., Kamers, B., Darras, V.M., de Baerdemaeker, J., Decuypere, E., Bruggeman, V., 2012. Interaction between ascites susceptibility and CO₂ during the second half of incubation of two broiler lines: the effect on post-hatch development and ascites mortality. *Br Poult Sci* 53, 262-269.
- Fawaz, H., Abiad, M.G., Ghaddar, N., Ghali, K., 2014. Solar-assisted localized ventilation system for poultry brooding. *Energy Build.* 71, 142-154.
- Fere, C., 1894. Note sur l'influence de la temperature sur l'incubation de l'aeuf de poule. *Journal of Anatomy and Physiology* xxx, pp. 352-365.
- Flood, C.A., Brewer, R.N., Koon, J.L., Dunn, J.R., 1981. Solar heating of poultry houses. 2. An analysis of solar heating-systems. *Poult. Sci.* 60, 1381-1385.
- Flood, C.A., Koon, J.L., Brewer, R.N., 1979. Solar heating of poultry houses. 1. Analysis of energy use for brooding broiler-chickens. *Poult. Sci.* 58, 314-318.
- French, K.M., 1981. Practical Poultry Raising, In: Exchange, P.C.I.C. (Ed.), p. 125.
- French, N.A., 1997. Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size. *Poult. Sci.* 76, 124-133.
- French, N.A., Tullett, S.G., 1991. Variation in the eggs of various poultry species, In: Tullett, S.G. (Ed.), *Avian incubation*. Butterworth-Heinemann, London, pp. 59-77.
- Garcia-Hierro, J., Robla, J.I., Barreiro, P., Diezma, B., Correa-Hernando, E., 2012. Design of a solar incubator. Part 1: monitoring temperature and enthalpy gradients under commercial production, International Conference of Agricultural Engineering- CIGR-AgEng2012, Valencia, p. 85.
- Garrido, J.L., 2012. La caza. Sector económico. Valoración por subsectores. FEDENCA-EEC, Madrid, España.
- Gefen, E., Ar, A., 2001. Gas exchange and energy metabolism of the ostrich (*Struthio camelus*) embryo. *Comparative Biochemistry and Physiology a-Molecular and Integrative Physiology* 130, 689-699.
- Gildersleeve, R.P., Boeschen, D.P., 1983. The effects of incubator carbon-dioxide level on turkey hatchability. *Poult. Sci.* 62, 779-784.
- Gillespie, J.I., McHanwell, S., 1987. MEASUREMENT OF INTRA-EMBRYONIC PH DURING THE EARLY STAGES OF DEVELOPMENT IN THE CHICK-EMBRYO. *Cell and Tissue Research* 247, 445-451.

- González-Redondo, P., Gutiérrez-Escobar, R., Díaz-Merino, R., Panea-Tejera, R., Martínez-Domínguez, A.R., 2012. Duración de la incubación artificial en perdiz roja (*Alectoris rufa*) Información Técnica Económica Agraria (ITEA) 108, 289-297.
- Han, H.B., Li, X., Yu, K., Lian, Z.X., 2011. Effects of Different CO₂ Levels on Chicken Embryonic Development During Early Stage of Incubation. *J. Anim. Vet. Adv.* 10, 2624-2630.
- Hoyt, D.F., 1979. Osmoregulation by Avian Embryos: The Allantois Functions like a Toad's Bladder. *Physiological Zoology* 52, 354-362.
- Hoyt, D.F., Rahn, H., 1980. Respiration of avian embryos - A comparative analysis. *Respiration Physiology* 39, 255-264.
- Jiménez-Ariza, T., Correa, E.C., Diezma, B., Silveira, A.C., Zócalo, P., Arranz, F.J., Moya-González, A., Garrido-Izard, M., Barreiro, P., Ruiz-Altisent, M., 2014. The Phase Space as a New Representation of the Dynamical Behaviour of Temperature and Enthalpy in a Reefer monitored with a Multidistributed Sensors Network. *Food Bioprocess Technol* 7, 1793-1806.
- Joseph, N.S., Lourens, A., Moran, E.T., 2006. The effects of suboptimal eggshell temperature during incubation on broiler chick quality, live performance, and further processing yield. *Poult. Sci.* 85, 932-938.
- Kalogirou, S., 2003. The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy* 76, 337-361.
- Kapica, J., Pawlak, H., Ścibisz, M., 2015. Carbon dioxide emission reduction by heating poultry houses from renewable energy sources in Central Europe. *Agricultural Systems* 139, 238-249.
- Kashkin, V.V., 1961. Heat exchange of bird eggs during incubation. *Biophysica* 6, 57-63.
- King'ori, A.M., 2011. Review of the factors that influence egg fertility and hatchability in poultry. *International Journal of Poultry Science* 10, 483-492.
- Kisaalita, W.S., Bibens, B., Lane, E., Young, P., Kinsey, V.R., Some, S., 2010. Design and Testing of an Avian Hatchery Solar Energy Incubator for Smallholder Poultry Farmers from the Sudano-Sahelian Belt. *AMA-Agric. Mech. Asia Afr. Lat. A.* 41, 84-90.

- Kuye, S.I., Adekunle, N.O., Adetunji, O.R., Olaleye, D.O., 2008. Design and Construction of Solar Incubator, Third Conference on Science and National Development, Nigeria, pp. 87-96.
- Leksrisompong, N., Romero-Sanchez, H., Plumstead, P.W., Brannan, K.E., Brake, J., 2007. Broiler incubation. 1. Effect of elevated temperature during late incubation on body weight and organs of chicks. *Poult. Sci.* 86, 2685-2691.
- Leon, M.A., Kumar, S., Bhattacharya, S.C., 2002. A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6, 367-393.
- Lourens, A., van den Brand, H., Heetkamp, M.J.W., Meijerhof, R., Kemp, B., 2007. Effects of Eggshell Temperature and Oxygen Concentration on Embryo Growth and Metabolism During Incubation. *Poult. Sci.* 86, 2194-2199.
- Lourens, A., van den Brand, H., Meijerhof, R., Kemp, B., 2005. Effect of eggshell temperature during incubation on embryo development, hatchability, and posthatch development. *Poult. Sci.* 84, 914-920.
- Lourens, S., 2001. The importance of air velocity in incubation. *World Poultry* 17, 29-30.
- Maatjens, C.M., Reijrink, I.A.M., Molenaar, R., van der Pol, C.W., Kemp, B., van den Brand, H., 2014a. Temperature and CO₂ during the hatching phase. I. Effects on chick quality and organ development. *Poult. Sci.* 93, 645-654.
- Maatjens, C.M., Reijrink, I.A.M., van den Anker, I., Molenaar, R., van der Pol, C.W., Kemp, B., van den Brand, H., 2014b. Temperature and CO₂ during the hatching phase. II. Effects on chicken embryo physiology. *Poult. Sci.* 93, 655-663.
- MAGRAMA, 2015. El sector de la carne de aves en cifras. Ministerio de agricultura y medio ambiente de España (MAGRAMA), Madrid.
- Mauthner, F., Werner, W., 2014. Solar Heat Worldwide. International Energy Agency, Graz, Austria.
- Meijerhof, R., van Beek, G., 1993. Mathematical Modelling of Temperature and Moisture Loss of Hatching Eggs. *Journal of Theoretical Biology* 165, 27-41.
- Meir, M., Ar, A., 2008. Changes in eggshell conductance, water loss and hatchability of layer hens with flock age and moulting. *Br Poult Sci* 49, 677-684.
- Mekhilef, S., Saidur, R., Safari, A., 2011. A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1777-1790.

- Molenaar, R., van den Anker, I., Meijerhof, R., Kemp, B., van den Brand, H., 2011. Effect of eggshell temperature and oxygen concentration during incubation on the developmental and physiological status of broiler hatchlings in the perinatal period. *Poult. Sci.* 90, 1257-1266.
- Narro, C., Tongco, M., Costales, A., 2014. Global poultry sector trends and external drivers of structural change, In: FAO (Ed.), *Poultry in the 21st Century* Bangkok.
- Onagbesan, O., Bruggeman, V., De Smit, L., Debonne, M., Witters, A., Tona, K., Everaert, N., Decuyper, E., 2007. Gas exchange during storage and incubation of Avian eggs: effects on embryogenesis, hatchability, chick quality and post-hatch growth. *Worlds Poultry Science Journal* 63, 557-573.
- Packard, M.J., Packard, G.C., 1993. Water loss from eggs of domestic fowl and calcium status of hatchlings. *J Comp Physiol B* 163, 327-331.
- Pearson, J.T., Haque, M.A., Hou, P.C.L., Tazawa, H., 1996. Developmental patterns of O₂ consumption, heart rate and O₂ pulse in unturned eggs. *Respiration Physiology* 103, 83-87.
- Peebles, E.D., Burnham, M.R., Gardner, C.W., Brake, J., Bruzual, J.J., Gerard, P.D., 2001. Effects of Incubational Humidity and Hen Age on Embryo Composition in Broiler Hatching Eggs from Young Breeders. *Poult. Sci.* 80, 1299-1304.
- Pelletier, N., 2008. Environmental performance in the US broiler poultry sector: Life cycle energy use and greenhouse gas, ozone depleting, acidifying and eutrophying emissions. *Agricultural Systems* 98, 67-73.
- Philibert, C., 2006. Barriers technology diffusion: the case of solar thermal technologies, In: Agency, I.-I.E. (Ed.).
- Quijara, J.A., Alriols, M.G., Labidi, J., 2011. Integration of a solar thermal system in a dairy process. *Renew. Energy* 36, 1843-1853.
- Reece, F.N., 1981. Use of Solar Energy in Poultry Production. *Poult. Sci.* 60, 911-916.
- Ricklefs, R.E., 2010. Embryo growth rates in birds and mammals. *Funct. Ecol.* 24, 588-596.
- Romanoff, A.L., 1934. Study of artificial incubation of Game Birds. I. Temperature requirements for Pheasant and Quail eggs. II. Humidity requirements for Pheasant and Quail eggs. *Bulletin Cornell University Agricultural Experiment Station*, pp. 1-39.
- Romanoff, A.L., 1935. Influence of incubation temperature on the hatchability of eggs, post-natal growth and survival of turkeys. *The Journal of Agricultural Science* 25, 318-325.

- Romanoff, A.L., 1936. Effects of Different Temperatures in the Incubator on the Prenatal and Postnatal Development of the Chick. *Poult. Sci.* 15, 311-315.
- Romanoff, A.L., 1960. *The Avian Embryo*. The Macmillan Co, New York, NY.
- Sánchez, C., Alonso, M.E., Prieto, R., González, V., Gaudioso, V.R., 2009. Una visión sobre la avicultura para la producción de caza en España. *Información Técnica Económica Agraria (ITEA)* 105, 169-183.
- Schmidt-Nielsen, K., 1975. *Animal Physiology*, New York, N.Y.
- SEO/Birdlife, 2013. Resultados del programa SACRE de SEO/Birdlife., In: SEO/Birdlife (Ed.), Madrid, España.
- Seperas, J.M., 1992. Manejo del huevo de perdiz roja en instalaciones cinegéticas. *MG Mundo Ganadero* 11, 76-78.
- Sharma, A., Chen, C.R., Lan, N.V., 2009. Solar-energy drying systems: A review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13, 1185-1210.
- Sotherland, P.R., Spotila, J.R., Paganelli, C.V., 1987. Avian eggs: barriers to the exchange of heat and mass. *The Journal of experimental zoology. Supplement* : published under auspices of the American Society of Zoologists and the Division of Comparative Physiology and Biochemistry / the Wistar Institute of Anatomy and Biology 1, 81-86.
- Taylor, L.W., Kreutziger, G.O., 1965. The gaseous environment of chick embryo in relation to its development and hatchability. 2. Effect of carbon dioxide and oxygen levels during the period of the fifth through the eighth days of incubation *Poult. Sci.* 44, 98-106.
- Taylor, L.W., Kreutziger, G.O., 1966. The gaseous environment of chick embryo in relation to its development and hatchability. 3. Effect of carbon dioxide and oxygen levels during the period of the ninth through twelfth days of incubation. *Poult. Sci.* 45, 867-884.
- Taylor, L.W., Kreutziger, G.O., 1969. The gaseous environment of the chick embryo in relation to its development and hatchability. 4. Effect of carbon dioxide and oxygen levels during the period of the thirteenth through the sixteenth days of incubation. *Poult. Sci.* 48, 871-877.
- Taylor, L.W., Kreutziger, G.O., Abercrom, G., 1971. The gaseous environment of chick embryo in relation to its development and hatchability. 5. Effect of carbon dioxide and oxygen levels during terminal days of incubation *Poult. Sci.* 50, 66-78.

- Taylor, L.W., Sjodin, R.A., Gunns, C.A., 1956. The gaseous environment of the chick embryo in relation to its development and hatchability 1. Effect of carbon dioxide and oxygen levels during the first four days of incubation upon hatchability. *Poult. Sci.* 35, 1206-1215.
- Tona, K., Onagbesan, O., Bruggeman, V., Collin, A., Berri, C., Duclos, M.J., Tesseraud, S., Buyse, J., Decuypere, E., Yahav, S., 2008. Effects of heat conditioning at d 16 to 18 of incubation or during early broiler rearing on embryo physiology, post-hatch growth performance and heat tolerance. *Arch. Geflügelkd.* 72, 75-83.
- Tona, K., Onagbesan, O., Bruggeman, V., De Smit, L., Figueiredo, D., Decuypere, E., 2007. Non-ventilation during early incubation in combination with dexamethasone administration during late incubation: 1. Effects on physiological hormone levels, incubation duration and hatching events. *Domest. Anim. Endocrinol.* 33, 32-46.
- Tullett, S.G., 1990. Science and the art of incubation. *Poult. Sci.* 69, 1-15.
- Tullett, S.G., Burton, F.G., 1982. Factors affecting the weight and water status of the chick at hatch. *British Poultry Science* 23, 361-369.
- Turner, J.S., 1991. The thermal energetics of incubated bird eggs
Egg incubation. Cambridge University Press.
- Turner, J.S., 1994. Time and energy in the intermittent incubation of birds' eggs. *Israel Journal of Zoology* 40, 519-540.
- Tzschentke, B., 2008. Monitoring the development of thermoregulation in poultry embryos and its influence by incubation temperature. *Comput. Electron. Agric.* 64, 61-71.
- USDA, 2015. Livestock and Poultry: World Markets and Trade, In: *Agriculture, F.A.S.U.S.D.o.* (Ed.).
- van der Pol, C.W., van Roovert-Reijrink, I.A.M., Maatjens, C.M., van den Brand, H., Molenaar, R., 2013. Effect of relative humidity during incubation at a set eggshell temperature and brooding temperature posthatch on embryonic mortality and chick quality. *Poult. Sci.* 92, 2145-2155.
- Vick, S.V., Brake, J., Walsh, T.J., 1993. Relationship of Incubation Humidity and Flock Age to Hatchability of Broiler Hatching Eggs. *Poult. Sci.* 72, 251-258.
- Villarroel, M., Barreiro, P., Kettlewell, P., Farish, M., Mitchell, M., 2011. Time derivatives in air temperature and enthalpy as non-invasive welfare indicators during long distance animal transport. *Biosyst. Eng.* 110, 253-260.

- Viñuela Madera, J., Casas, F., Díaz-Fernández, S., Delibes-Mateos, M., Mougeot, F., Arroyo, B., 2013. La perdiz roja (*Alectoris rufa*) en España: especie cinegética y amenazada. *Ecosistemas* 22, 6-12.
- Vleck, C.M., Vleck, D., 1980. Patterns of Metabolism and Growth in Avian Embryos. *American Zoologist* 20, 405-416.
- Wilson, H.R., 1991. Physiological Requirements of the Developing Embryo: Temperature and Turning, In: S.G.Tullet (Ed.), *Avian Incubation*. Butterworth-Heinemann, London, pp. 145-156.
- Willemsen, H., Kamers, B., Dahlke, F., Han, H., Song, Z., Pirsaraei, Z.A., Tona, K., Decuypere, E., Everaert, N., 2010. High- and low-temperature manipulation during late incubation: Effects on embryonic development, the hatching process, and metabolism in broilers. *Poult. Sci.* 89, 2678-2690.
- Zwietering, M.H., Jongenburger, I., Rombouts, F.M., Vantriet, K., 1990. Modeling of the bacterial-growth curve. *Appl. Environ. Microbiol.* 56, 1875-1881.

13. Anexos

En este capítulo se adjuntan los artículos más relevantes publicados en congresos internacionales y revistas científicas:

Anexo 1: Development of smart sensing devices for ubiquitous supervision of the cold chain: application to perishable commodities

Anexo 2: Development of smart sensors for the supervision of a solar dryer: agro-products dehydration application

Anexo 3: Refrigerated Fruit Storage Monitoring Combining Two Different Wireless Sensing Technologies: RFID and WSN

Anexo 4: Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer

Anexo 5: Assessing the dynamic behavior of WSN motes and RFID semi-passive tags for temperature monitoring

Anexo 6: Design of a solar incubator. Part 1: Monitoring temperature and enthalpy gradients under commercial production

Anexo 1: Development of smart sensing devices for ubiquitous supervision of the cold chain: application to perishable commodities

DEVELOPMENT OF SMART SENSING DEVICES FOR UBIQUITOUS SUPERVISION OF THE COLD CHAIN: APPLICATION TO PERSISHABLE COMMODITIES

J. Garcia Hierro ⁽¹⁾, P. Barreiro ⁽²⁾, L.Ruiz-Garcia ⁽²⁾, J.I.Robla ⁽¹⁾

¹ LTAS. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC). Avda. Gregorio del Amo, 8, 28040, Madrid. Spain. j.hierro@cenim.csic.es

² LPFTAG. ETSI Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Complutense s/n 28040 Madrid. Spain.

Abstract

Wireless sensing technologies allow continuous monitoring of physical parameters that influence the preservation of fruit and vegetables in cold storage, while the smart sensor concept refers to the incorporation of improved prediction capabilities on standard low cost transducers as to enhance quality assurance of stored commodities while reducing in the amount of data to be transmitted. Previous experience of the authors has shown the feasibility of predicting battery shortage due to its effects on measurement oscillations, door opening by means of the instantaneous gradient in temperature and relative humidity, and water loss and condensation on the cargo. In this work, measurements in 3 commercial cold chambers with a variety of horticultural products have been performed, using up to 7 wireless motes from two different manufacturers. The ASABE psychrometric model is used as a base for smart capabilities such as energy consumption estimation is implemented as related to the increase on air enthalpy based on a single Temperature-Relative Humidity sensor. The low cost characteristics of such device encourage the ubiquitous location in the commodities and even the diagnosis of working faults of valves in refrigeration system.

Keywords: wireless sensor networks, ZigBee, cold chain, enthalpy, psychrometry

1. Introduction

The control of temperature throughout the cold chain is essential for conservation in the best possible condition of perishable products. The term “cold chain” describes the series of interdependent equipment and processes employed to ensure the temperature preservation of perishables and other temperature-controlled products from the production to the consumption end in a safe, wholesome, and good quality state (Zhang, 2007). One of the links in this chain is the preservation in cold storage of the collected and stored product until sale to the customer.

The quality of these products might change rapidly, when inadequate temperature and relative humidity conditions during transport and storage occur. Temperature variations are associated with warehousing, handling and transportation. Inadequate temperature is second on the list of factors causing foodborne illness, surpassed only by the initial microflora present in foods (Sánchez López *et al.*, 2008).

At present, fuel prices increase, climate change issues and rising air pollution has prompted governments, businesses and citizens to worry about energy saving. The refrigeration food preservation needs a good deal of energy input in places with hot weather. For example, the cold chambers studied in this work (1,700m³ and 8 °C Setpoint Temperature), consume energy of about 3,500Kcal/month in winter, and 7,500Kcal/month in summer. Energy consumption of the refrigerated chambers is estimated from opening times of the cold glycol

valve. Mechanical or electrical failures of these mechanisms lead to measurement and billing errors.

Smart sensors can provide information on malfunctioning of the valves. Thus, we can correlate the air inside the cold storage enthalpy with power consumption, using the psychrometric model on Temperature and Relative Humidity data obtained from sensors. Moreover we can diagnose mechanical or electrical failures in the installation.

Specialized WSN (Wireless Sensor Network) monitoring devices promise to revolutionize the shipping and handling of a wide range of perishable products giving suppliers and distributors continuous and accurate readings throughout the distribution process. In this framework, ZigBee was developed as a very promising protocol for WSN due to its low energy consumption and advanced network capabilities. Its potential for monitoring was proposed by several authors but there were no real experimentation, only theoretical approaches (Qingshan *et al.*, 2004; Jedermann *et al.*, 2006; Wang, 2006).

2. Material and methods

Refrigerate chambers

Experiments were performed in three commercial wholesale refrigerated stores, numbered 11, 29 and 40. Each of which has a volume at of $1,716\text{m}^3$, $26 \cdot 6 \cdot 11\text{m}$, with an on/off glycol cooling system and insulated walls built of foam sandwiched between two layers of corrugated plate (total wall thickness is 0.16 m). The set points experimentation time were different for each one (see table 1). Each chamber has a common pre-chamber space where a devoted sensor is placed. Therefore, three different ambient conditions occur: outdoor, pre-chamber and inside chamber with well known set point (see Table 1).

Table 1. Experimental conditions.

Cold store number	Set point (°C)	Experimentation time (days)	Dates
11	8	13	7 th - 19 th July
29	7	8	20 th - 27 th July
40	14	4	28 th - 31 st July

ZigBee motes

Two ZigBee/IEEE 802.15.4 motes (transmitters) and one base station (receiver) were used, manufactured by Crossbow®. One mote was installed outside the chamber, close to the door and the other one inside, at the other side of the wall. Sample rate was set to 180s.

They have a microcontroller board (IRIS) together with an independent transducer board (MTS400) attached by means of a 52 pin connector. Its processor & radio platform is a XM2110CA, based on the Atmel ATmega1281. The RF power was configured to 3dBm (three times over previous MICAZ Motes). Power was supplied by two AA lithium batteries.

The MTS400 board hosts a variety of sensors: temperature and relative humidity (Sensirion SHT), barometric pressure and temperature (Intersema MS5534B), light intensity (TAOS TSL2550D) and a two-axis accelerometer (ADXL202JE). A laptop computer is used as the receiver, and communicates with the nodes through a Micaz mounted on the MIB520 ZigBee/USB gateway board; this device also provides a USB programming interface. In this study only the data from Sensirion and Intersema is used.

The Sensirion SHT is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into the memory. These coefficients are used internally during measurements to calibrate the signals from the sensors.

The MS5534B is a SMD-hybrid device including a piezoresistive pressure sensor and an ADC-Interface IC. It provides a 16 Bit data word from a pressure and temperature (-40 to +125°C) dependent voltage. Additionally the module contains 6 readable coefficients for a highly accurate software calibration of the sensor.

Up to six ZigBee/IEEE 802.15.4 motes (transmitters) and one base station (receiver) were used, manufactured by Nlaza®. One mote was installed outside the chamber, close to the door and the others inside in different positions, at the other side of the wall. Sample rate was set to 180s.

Its processor & radio platform is based on the Freescale MC13213. It's one of the second-generation ZigBee platform which incorporates a low power 2.4GHz radio frequency transceiver and an 8-bit microcontroller into a single 9.9x1mm 71-pin LGA package. Power was supplied by three AA lithium batteries that provide it a life time of several weeks.

A laptop computer is used as the receiver, and communicates with the nodes through RS-232 gateway /ZigBee ND-07 board. We can programme the nodes with Sensatel® software. The ND-11 board hosts an unique Sensirion SHT sensor.

Psychrometric data

The ASAE D271.2, defined in April 1979 and reviewed in 2006, is used for computing the psychrometric properties of air (ASABE, 2006). Equations 1, 2, 3, 4 and Table 2 enable the calculation of all psychrometric data of air whenever two independent psychrometric properties of an air-water vapour mixture are known in addition to the atmospheric pressure.

$$P_s = e^{\frac{31.96 - \frac{6,270.36}{T} - 0.46 \cdot \ln T - 0.0001}{-255.38K \leq T \leq 273.16K}} \quad (1)$$

$$P_s = e^{\frac{A+B \cdot T+C \cdot T^2+D \cdot T^3+E \cdot T^4}{F \cdot T-G \cdot T^2}} \quad (2)$$

$$273.16 \text{ K} \leq T \leq 533.16 \text{ K}$$

T=Temperature (K), Ps= Saturation vapor pressure (Pa) (ASABE, 2006).

$$P_v = P_s \cdot \frac{RH}{100} \quad (3)$$

Pv= Vapor pressure (Pa) (ASABE, 2006).

$$Hum = \frac{0.6219 \cdot P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (4)$$

Hum=Absolute humidity (g/kg dry air), Patm= Atmospheric pressure (Pa) (ASABE, 2006).

Table 2. Coefficients used to compute the psychrometric data, according to equation 5 (ASABE, 2006).

R=22,105,649.25	D=0.12558x10 ⁻³
A=-27,405.526	E=-0.48502x10 ⁻⁷
B=97.5413	F=4.34903
C=-0.146244	G=0.39381x10 ⁻²

Data analysis

A Matlab® code is used to calculate the air enthalpy inside and outside the cold store with temperature and relative humidity obtained from the Crossbow motes and using psychrometric data analysis. On the other hand the real power consumption of the chamber is provided hourly by the warehouse holder.

$$m = \rho \cdot V = (1,293 - 0,004T) \cdot V \quad (5)$$

$$m = \text{dry air weight (Kg)}, \rho = \text{air density} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right), V = \text{air volume (m}^3\text{)}$$

$$H(\text{Kcal}) = \text{Enthalpy} \left(\frac{\text{J}}{\text{Kg}} \right) \cdot m (\text{kg}) \cdot 0,24 \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{KJ}} \right) \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{KJ}}{\text{J}} \right) \quad (6)$$

Enthalpy of equation number 6 is graphically calculated from the psychrometric diagram obtained using the ASAE D271.2.

We set a new parameter for the analysis of possible errors in the billing of energy consumed: the subtraction of the energy consumed and the air enthalpy (*Diff*).

$$\text{Diff(Kcal)} = \text{Power Consumption(Kcal)} - H(\text{Kcal}) \quad (7)$$

We establish that there are billing errors and malfunctioning valves when a value for this parameter (*Diff*) is outside the limits of the statistically estimated range where it is the 95 or the 98 per cent of the values.

$$\text{Upper Limit(Kcal)} = \bar{x} + t \cdot s \quad (8)$$

$$\text{Lower Limit(Kcal)} = \bar{x} - t \cdot s \quad (9)$$

$$\bar{x} = \text{Diff mean}, \quad s = \text{Diff standard deviation}, \quad t = t \text{ Student} = \begin{cases} 1.96 \text{ for } 95\% \\ 2.32 \text{ for } 98\% \end{cases}$$

3. Results

Psychrometry

The absolute humidity of the air inside the chambers was calculated, based on the ASAE standard D271.2 (1979) (ASABE, 2006), using the data recorded during experiments. Psychrometric charts for chambers number 40 is included in Fig.1, which illustrate the evolution of air absolute humidity (*H*, kg of water/ kg of dry air) related to the *T* (°C). There are several clouds of data that corresponds to the Nlaza® motes placed in the sides that the figure indicates. Door openings created an increment in *T* (°C) and *H* (kg of water/ kg of dry air), which then returns to normal again once the door is closed. The door of cold store number 40 keeps open longer, therefore cloud of data that corresponds to the mote placed outside the chamber is closer to clouds of motes inside the chamber data. When the door of the cold chamber is opened, warm air from the outside mixes with the air inside and this causes the temperatures to equalize. We also can see a relative humidity gradient inside the chamber influenced by the goods stored.

Fig.2. Temperature Histogram of Nlaza® motes in cold chamber number 40.

As we see in Fig.2, the closer to the door the sensors are, higher temperature is reached by them. On the other hand, Nlaza 2 mote (black line in Fig.2) is always warmer than others because much of the time there is an operator working in that area.

Air enthalpy and Power Consumption

Air enthalpy inside the cold store has been calculated basing on on the ASAE standard D271.2 (1979) (ASABE, 2006).

There is a correlation between energy consumption billed by the warehouse holder and the calculated air enthalpy (see Fig.3). Air enthalpy changes continuously due to temperature

variations inside the cold chamber. Enthalpy peaks usually correspond to times of opening door; because of that there are large peaks of energy consumption. The Energy Consumption data are recorded every hour and the enthalpy of the air every three minutes, so a Power Consumption peak can correspond to multiple jumps of the air enthalpy. Refrigeration system also starts running to compensate for the thermal inertia of the cold chamber. We can see it better in Fig.4.

Fig.3. Air Enthalpy and Power Consumption in cold chamber number 11.

Sometimes, mechanical failures on the inlet valve of cold glycol cause errors in the energy billing. This can be diagnosed by comparison between the energy consumption and the variation of the air enthalpy. It is clearly shown in the case of the cold chamber number 29 (see Fig. 4).

Fig.4. Air Enthalpy and Power Consumption in cold chamber number 29.

Fig 5. Difference between Power Consumption and Air Enthalpy in cold chamber number 29. Malfunctioning Diagnosis.

If there is correlation between Power Consumption and Air Enthalpy, the subtraction between these two data will fluctuate around a mean value. We see this behavior in Figure 5. Values outside the limits indicated may be considered as a malfunctioning of the valves and billing errors of the consumed energy alarm.

For the cold chamber number 29, the mean of the subtraction between Power Consumption and Air Enthalpy is -0.9Kcal , and de standard deviation is $\pm 6.9\text{Kcal}$. With that two data we calculate the range where the 95 or 98 per cent of data are found. Out of these limits we can determinate that errors are occurring in the energy billing (see Table 3).

Table 3. Limits for detecting malfunctioning in cooling system and for defining energy billing errors.

	95% (t=1.96)	98% (t=2.32)
Upper limit	12.6Kcal	15.0Kcal
Lower limit	-14.4Kcal	-16.8Kcal

4. Conclusion

The use of Temperature and Relative Humidity together with psychrometric models allow to define smart capabilities for sensors.

Difference in absolute humidity along chambers, air flow across the doors and energy balance are also smart functions that can easily be incorporated on smart sensors.

Smart capabilities allow addressing faults and malfunctioning in the cooling systems. Therefore smart capabilities become system diagnosis at very low cost and high frequency rate.

In this framework, wireless sensor motes proved to be flexible and useful for an easily data monitoring.

ACKNOWLEDGMENTS Thanks to SMART-QC research program (Ref: GL2008-05267-C03-03/ALI) supported by the Ministry of Science and Innovation and TAGRALIA project funded by the Comunidad de Madrid (Ref.: S-0505/AGR-0187). The authors would also like to thank Antonio Rabasco, Ricardo Badía and Jorge Sanchez for their help during the experiments.

ASABE. 2006. Psychrometric data ASAE D271.2 APR1979, R2005. St. Joseph, MI.

Jedermann, R., C. Behrens, D. Westphal, and W Lang. 2006. Applying autonomous sensor systems in logistics - Combining sensor networks, RFIDs and software agents. *Sensors and Actuators A: Physical* 132 (1):370-375.

Qingshan, S., L. Ying, D. Gareth, and D Brown. 2004. Wireless Intelligent Sensor Networks for Refrigerated Vehicle. In *IEEE 6th Symposium on Emerging Technologies Mobile and Wireless Communication*. Shangai, China.

Sánchez López, T., and K. Daeyoung. 2008. Wireless Sensor Networks and RFID integration for Context Aware Services. In *White Paper series 2008* edited by A.-I. L. W. Paper.

Wang, X., Li, D. 2006. Value Added on Food Traceability: a Supply Chain Management Approach Service. In *IEEE International Conference on Operations and Logistics, and Informatics, 2006. SOLI '06*.

Zhang, L. 2007. Cold Chain Management, Cranfield Centre for Logistics & Supply Chain Management, Cranfield University.

Anexo 2: Development of smart sensors for the supervision of a solar dryer: agro-products dehydration application

Development of smart sensors for the supervision of a solar dryer: agro-products dehydration application

E. Correa-Hernando¹, F. J. Arranz², B. Diezma², H.T. Jiménez², J. I. Robla³, L. Ruiz-García², J. García-Hierro³, P. Barreiro², C. Valero²

¹Departamento de Ciencia y Tecnología Aplicadas a la Ingeniería Técnica Agrícola, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid (Spain). evacristina.correa@upm.es.

²Departamento de Ingeniería Rural, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid (Spain.)

³Laboratorio de Tecnología de Sensores, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Av. Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid (Spain).

Abstract

Solar dryers are increasingly used in developing countries as an alternative to drying in open air, however the inherent variability of the drying conditions during day and along year drive the need for achieving low cost sensors that would enable to characterize the drying process and to react accordingly. This paper provides an approach for smart sensors that make use of the psychrometric properties of the air inside the drying chamber along day. The proposed model shows a high agreement with bibliographic data.

Key words: multi-distributed supervision, automated control, smart sensor

1. Introduction

Drying agricultural products enhances their storage life, minimises losses during storage, and saves shipping and transportation costs (Leon et al., 2002). Conventional drying processes range from natural sun drying to industrial drying but since the 1960s, several types of solar kiln for food drying have been studied and improved on, due to some advantages of the solar kilns, as lower or no operating cost since no fuel is needed for air heating. On the other hand the main disadvantage is its dependence on weather conditions resulting in less controllability by the operator, and less predictable outcomes (Haque and Langrish, 2005). Commercial kilns (i.e. Solar Dryers Australia Pty. Ltd. or CONA SOLAR AUSTRIA) are available, ranging from very simple systems with only a solar kiln with an integrated collector and small capacity, to automated dryers with an integrated energy storage system. Sharma et al., (Sharma et al., 2009) present an extensive review about the different types of solar dryers and their applications in the agri-food products since most of the solar dryers developed are designed for specific products or class of products.

In some solar dryers, the product to be dried receives energy not only from the hot air supplied by a solar collector but by direct exposure to solar radiation, being the product protected from rain, insects and dust (Fargali et al., 2008). One of the functions of the closed-type solar dryers is to avoid and isolate the humid environment from the drying process, including sometimes a dehydrator unit to enhance the drying process and to reuse the hot air. Other types of solar dryers make use of a solar collector that utilizes directly the energy from the sun to heat water that passes through it (Fargali et al., 2008). The output water from the collector is stored in a water tank. Such dryers attenuate the effect of solar radiation variability along the day, due to cloudy conditions, as well as due to the absence of radiation during night.

According to Kumar in 2005 (Kumar and Kandpal, 2005), the potential of using solar dryers requires detailed relevant data on the crops and solar radiation availability. The energy

requirement strongly depends upon the initial and final moisture content of the crop. Thus, the useful energy requirement for drying ranges from 0.43 MJ/kg to 20.35 MJ/kg. Many materials can be used for making a closed solar dryer (copper, aluminium, toughened glass, absorber paint,...) which greatly affect the embodied energy in a solar dryer. Some average estimation proposes 2968 MJ/m² of aperture area. Solar drying can play an important role in saving bio fuels and fossil fuels in developing countries such as India, where presently used in the drying of many crops.

According to Chen in 2005 (Chen et al., 2005), in traditional open-sun drying methods the drying rate is controlled by a number of external factors (solar radiation, ambient temperature, wind velocity and relative humidity) and internal factors (initial moisture content, type of product, and the mass of product per unit exposed area). Such procedure, does not allow for obtaining a suitably high and reproducible product quality, especially for food, mainly because of the inherent limitations in controlling the drying process.

Chillies in Bangladesh are traditionally sun dried in open sun on a mat, with very slow drying rate (7-15 days). Hossain and Bala in 2007 (Hossain and Bala, 2007), proposed the use of a solar dryer that consists of a transparent plastic covered flat plate collector and a drying tunnel connected in series to supply hot air directly into the drying tunnel decreasing the drying period to 32 hours. For such dryer, the air temperature at the outlet of the solar collector rises to 40 to 66°C compared to 20 to 35°C at the inlet of the collector. That is to say an average rise in temperature inside the collector is 21.6°C and stays in the basis of the high decrease in drying duration.

Fargali in 2008 (Fargali et al., 2008), states that conventional drying methods such as open sun drying are time-consuming and may not be suitable for medicinal herbs since they yield a less quality product due to contaminations, and attacks of rodents, insect and fungi; neither conventional-fuel dryers, are suitable due to the increase in the drying cost.

Low cost sensors are most suitable for the supervision and control of solar dryers, and can be easily upgraded by including smart capabilities. According to Corsi, the term smart sensor refers to those elements containing sensing and signal processing capabilities and understanding, with objectives ranging from simple viewing to sophisticated remote sensing, surveillance, search/track, robotics, perceptorics and intelligence applications (Corsi, 2007). The smart sensor is expected to have the capability that functionality and architecture, as well as raw data acquisition are based the existence of microprocessing unit (Son et al., 2009).

Rapid advances in sensors, wireless communications, Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) have the potential to assist in dealing with a large amount of data that is generated by a monitoring system. On board processing at the sensor allows a portion of the computation to be done locally on the sensors' embedded microprocessor, with self diagnosis and self-calibration capabilities, thus reducing that data amount of information that needs to be transmitted over the network. It is important to state that the basic difference between a smart sensor and a standard integrated sensor is its intelligence capabilities (Spencer et al., 2004). Son in 2009 (Son et al., 2009) proposes the use of intelligent classification systems as to assist the condition monitoring tasks by correctly interpreting the fault data in machine fault diagnosis. Result by these authors demonstrated the advantage of smart sensor systems compared to conventional ones.

Another term relevant to our work refers to smart environment, defined by Cook (Cook and Das, 2007) as one that is able to acquire and apply knowledge about the environment and its inhabitants in order to improve the experience in that environment. Automation in a smart environment can be viewed as a cycle of perceiving the state of the environment, reasoning about the state together with task goals and outcome of possible actions, and acting upon

the environment to change the state. Among the desired features in a smart environment, sensor/actuator networks need to be fast, easy to install and maintained, robust and self organizing to create a ubiquitous/pervasive computing platform. Smart sensors move some the reasoning work down to the physical level without the intention of solving the entire intelligent environment design problem, but to provide intelligent functionalities within the confines of a single object and task.

Recently, Luna (Luna et al., 2009) in a review on the trends in solar kilns for drying timber uses an analytical method for product design based on TRIZ theory, and proposes the use of eight laws to evaluate developments in solar dryers. Two of such laws, *Coordination of Rhythms* and *Increase in Level of Improvement*, are specially defined to solve problems caused by the alternating day/night, seasonal rhythms or weather variations. The guidelines of this article can help addressing the quality of any dryer design. The definition, implementation and integration of intelligent sensors in solar dryers, which is faced in current research work actively enhances the quality of the dryer design.

2. Materials and Methods

Solar dryer. An experimental solar dryer was used during the experiment. This dryer has a capacity of 0.3 m^3 , is equipped with a solar collector of 2 m^2 , a 12 V DC fan, a chamber for drying, various metallic trays for samples positioning, a gate that controls the recirculation of air and a plenum chamber. The air comes into the dryer by one side, then heated in the roof, sucked into the plenum chamber and is ducted to the fan which blows it into the drying chamber where the wood is placed on trays. Figure 1 shows the air movement into the dryer.

Figure 1. Scheme of the solar dryer, solar collector (1), fan (2), chamber for drying (3), gate for recirculation of air (4), and plenum chamber (5). The arrows indicate the airflow. Also, the location of the eight Sensirion S1-S8 (●)

Temperature and relative humidity sensors. In this paper Sensirion SHT sensors were used to characterize the drying air. The SHT is a single chip relative humidity and temperature multisensor module that delivers a calibrated digital output. The device includes a capacitive polymer sensing element for relative humidity (RH) and a band gap temperature sensor. Both are seamlessly coupled to a 14 bit analog to digital converter and a serial interface circuit on the same chip. Eight Sensirion sensors (see Figure 1) were located at different positions: at solar collector inlet and outlet, and several locations inside the drying chamber. The sensors were connected by wire to a board with a PIC (Peripheral Interface Controller) microcontroller. In the PIC the signals are multiplexed and then sent to a computer.

3. Proposed mathematical models

3.1. Psychrometric model

The ASAE D271.2, defined in April 1979 and reviewed in 2005 (ASABE_Standards, 2006), was used for computing the psychrometric properties of the air in the dryer. This standard enables the calculation of all psychrometric data of air whenever two independent psychrometric properties of an air-water vapor mixture are known in addition to the atmospheric pressure. A network with eight sensors provides air temperature (τ) and relative humidity in eight critical points in the dryer. Absolute humidity H (water mass over dry air mass), wet bulb humidity H_w (water mass over dry air mass), wet bulb temperature (the temperature of a volume of air cooled adiabatically to saturation by evaporation of water into it) τ_w , specific volume V_s (air volume over dry air mass) and specific enthalpy h (enthalpy over dry air mass), characterized the air at each point. The implementation of the psychrometric model in a *ad hoc* Matlab routine, allows supervising in real time the drying air conditions in different points.

3.2. Smart sensor model

It is possible to define a smart sensor based on the temperature and relative humidity of the air inside the kiln, measured for the network of eight SensirionTM sensors. This smart sensor will allow determining the drying rate and the food moisture distribution into the dryer.

The drying rate expressed as $-dM/dt$, where M is the oven dry food moisture (water mass over oven dry food mass), allows identifying two different kinetics: one with a constant drying rate, for very damp products that present free water at surface, and a second one reached when water activity at product surface is below the unit, characterized for a decreasing drying rate (Barbosa-Cánovas and Vega-Mercado, 2000). Anyway, the transport of water during the food dehydration process takes place predominately in the falling rate period (Babalís et al., 2006), at this stage, diffusion is the mechanism that governs the drying process. There are many methods used to calculate drying diffusion, the most common being the solution of Fick's law described in the literature by (Crank, 1979) and (Luikov, 1968). For fruit and vegetables prepared as slices, the thin layer drying model for an infinite plate (one-dimensional problem)

$$\frac{M(t) - M_s}{M_0 - M_s} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \times \exp\left(-\left(\frac{(2n-1)^2 \pi}{2L}\right)^2 D t\right) \quad \text{Eq. 1}$$

assumes that the moisture transport is primarily by diffusion with no external mass transfer limitation and that shrinkage is negligible. Eq. 1 expresses the dimensionless food moisture, where $M(t)$ and M_0 are the averaged product moisture content at any time t and $t = 0$ respectively. M_s is the moisture content at food surface that can be taken to be negligible because it assumed a dry hot air surrounding that avoids staying water at timber surface. L is the half thickness of food, and D represents the temperature dependent diffusion coefficient defined by the Arrhenius equation

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

where D_0 is the reference diffusion coefficient, E_a is the activation energy, R is the universal gas constant and T is the absolute temperature of food taking into account that it has been consider negligible the difference between T and τ .

In a solar dryer, continuous changing surrounding conditions (H and τ of the drying air) in the drying chamber during drying process are observed due to transient variation of weather

parameters, since drying temperature varies with the time then if on one hand is possible to consider that the diffusivity does not change with space, on the other hand the diffusivity will depend on time. The Fick's law solution described in the literature (Crank, 1979; Luikov, 1968) establishes that for a Fourier number $Dt/L^2 > 0.2$, the infinite series solution in Eq. 1 can be approximated by the first term $n = 1$ of the series (Tripathy and Kumar, 2009). Applying these considerations the equation that enable the drying rate calculation is given by the following expression obtained as the derivative with respect to time of Eq. 1:

$$-\frac{dM}{dt} = \frac{2M_0}{L^2} \left(t \frac{dD}{dt} + D \right) \exp \left(- \left(\frac{\pi}{2L} \right)^2 Dt \right) \quad \text{Eq. 3}$$

The Smart model is defined for the combined resolution of Eq. 2 and Eq. 3, and its implementation as a Matlab routine time depending, allows recalculating in real time a changeable drying rate according with the temperature and absolute humidity of the air measured with the Sensirion in different positions inside the kiln. The integrated form of Eq. 3 provides the evolution of food moisture content during drying period.

3.3. Simulation

The Smart sensor is based on a hardware element: Sensirion sensor for temperature and relative humidity of the air, plus the model previously described as the software engine of the system. Previous knowledge of drying parameters (E_a and D_0) as a function of material characteristics, and process input arguments (M_0 , L), are necessary to optimize the design of the drying process. The availability of published data on drying parameters for a wide range of fruits and vegetables together with the possibility of acquiring temporal profiles of temperature and relative humidity of the air inside the kiln with our instrumented solar dryer, is the basis for simulation.

Product	Model parameters		Input argument	Output	
	E_a (kJ/mol)	D_0 (m ² /s)	<i>Initial moisture</i>	D (m ² /s)	<i>Final moisture</i>
Carrots slices (Berruti et al., 2009)	31.76	$3 \cdot 10^{-9}$	88% (w/w).	$0.6 \cdot 10^{-9}$ - $2.312 \cdot 10^{-9}$	8% (w/w).
Green mango slices (Corzo et al., 2008)	22.3-11.4	$1 \cdot 10^{-7}$ - $1.7 \cdot 10^{-8}$	6.973 kg water/kg dry basis	$1.7 \cdot 10^{-10}$ - $3.1 \cdot 10^{-10}$	0.105 kg water/kg dry basis
Half-ripe mango slices (Corzo et al., 2008)	9.3-8.7	$7 \cdot 10^{-9}$ - $6 \cdot 10^{-9}$	6.015 kg water/kg dry basis	$2.3 \cdot 10^{-10}$ - $3.3 \cdot 10^{-10}$	0.325 kg water/kg dry basis

Table 1: Example of parameters and input arguments available from the bibliography.

Product	Product load inside the kiln	Input arguments	
	<i>Dry matter (kg)</i>	L (m)	M_0 (kg water/kg dry basis)
Carrot slices	3.8	0.010	10
	4.6	0.012	
	5.0	0.013	

Table 2: Input arguments for carrot slices drying simulation.

A simulation for drying carrot slices was carried out taking into account three different product loads inside the kiln (see Table 3) and using parameters from Table 1 at the smart model compilation. The simulation corresponds to a drying cycle of 66 hours that begins at 12 a.m. of day 1 and finishes at 6 a.m. of day 4.

Figure 2. Evolution of oven dry carrot moisture M along one drying cycle. Data corresponding to Sensirion S3 located inside the kiln.

Figure 3. Evolution of drying rate along one drying cycle. Data corresponding to Sensirion S3 located inside the kiln.

Figure 3 shows the evolution of drying rate of carrots along the drying period. Although the general behavior of drying kinetic shows a decreasing trend, it is obvious that day/night alternation has a strong effect on drying rate. In Figure 3 positive peaks occur at 8 a.m. approximately, that is the end of night conditions and the beginning sunlight and thus of a quick decrease of carrots' moisture (Figure 2). The negative peaks in Figure 3 at the end of evening (around 4 p.m.), marks the beginning of drying periods with little effect on moisture reduction of carrots (see Figure 2).

As Figure 2 shows, when carrots present high moisture values, even during night, is possible to observe a decrease in moisture content, while at the end of drying period, during the last night, the vapour pressure is greater than that at the product surface and thus product reabsorbs moisture from the air: carrots at 6 a.m. of day 4 show higher moisture values than those simulated along previous 12 hours.

The effect of product load inside the kiln, obtained as a function of the thickness of carrot slices simulated, is also clear. For increasing L values, higher M values are estimated for each time. Considering that the final optimum moisture content of $1\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry basis}}$ for carrots is achieved at 10 a. m. of day 3 for $L=0.010$ m (see Figure 2), carrots with $L=0.013$ m will need at least one other complete drying day to reach such moisture value.

4. Conclusions and further work

The operation and decision making in most dryers systems is guided by highly empiric recipes and rules which are usually too rigid to adapt the operation to sudden changes in the process conditions, especially important in solar dryers. The implementation of this model on MEMS become smart sensor where data corresponding to the temperature and relative humidity of the air inside the kiln collected by Sensirion™ sensors, allows to estimate the most important and complex parameters in thermal drying: drying rate and actual product moisture for real time applications. Simulation tool allows, optimizing dryer design and dryer regulations and control.

The next step of this research will be an external validation of the proposed model with an experimental work based on a complete drying cycle for food.

5. References

- ASABE_Standards. (2006) Psychrometric data ASABE D271.2 APR1979, R2005. St.Joseph, MI.
- Babalís S.J., Papanicolaou E., Kyriakis N., Belessiotis V.G. (2006) Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). *Journal of Food Engineering* 75:205-214.
- Barbosa-Cánovas G.V., Vega-Mercado H. (2000) *Deshidratación de Alimentos* ACRIBIA, S.A.
- Berruti F.M., Klaas M., Briens C., Berruti F. (2009) Model for convective drying of carrots for pyrolysis. *Journal of Food Engineering* 92:196-201.
- Cook D.J., Das S.K. (2007) How smart are our environments? An updated look at the state of the art. *Pervasive and Mobile Computing* 3:53-73.
- Corsi C. (2007) Smart Sensors. *Infrared Physics and Technology* 49:192-197.
- Corzo O., Bracho N., Alvarez C. (2008) Water effective diffusion coefficient of mango slices at different maturity stages during air drying. *Journal of Food Engineering* 87:479-484.
- Crank J. (1979) *The Mathematics of Diffusion* Clarendon Press.
- Chen H.H., Hernandez C.E., Huang T.C. (2005) A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energy* 78:97-103.
- Fargali H.M., Nafeh A.E.S.A., Fahmy F.H., Hassan M.A. (2008) Medicinal herb drying using a photovoltaic array and a solar thermal system. *Solar Energy* 82:1154-1160.

- Haque M.N., Langrish T.A.G. (2005) Assessment of the actual performance of an industrial solar kiln for drying timber. *Drying Technology* 23:1541-1553.
- Hossain M.A., Bala B.K. (2007) Drying of hot chilli using solar tunnel drier. *Solar Energy* 81:85-92.
- Kumar A., Kandpal T.C. (2005) Solar drying and CO₂ emissions mitigation: Potential for selected cash crops in India. *Solar Energy* 78:321-329.
- Leon M.A., Kumar S., Bhattacharya S.C. (2002) A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6:367-393.
- Luikov A.V. (1968) *Analytical Heat Diffusion Theory* University of Illinois, Department of Energy Engineering.
- Luna D., Nadeau J.P., Jannot Y. (2009) Solar timber kilns: State of the art and foreseeable developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:1446-1455.
- Sharma A., Chen C.R., Vu Lan N. (2009) Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13:1185-1210.
- Son J.D., Niu G., Yang B.S., Hwang D.H., Kang D.S. (2009) Development of smart sensors system for machine fault diagnosis. *Expert Systems with Applications* 36:11981-11991.
- Spencer B., Ruiz-Sandoval M., Kurata N. (2004) Smart sensing technology: Opportunities and challenges. *Journal of Structural Control and Health Monitoring*.
- Tripathy P.P., Kumar S. (2009) A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: Application to solar drying. *Journal of Food Engineering* 90:212-218.

6. Acknowledgements

The funding of this work has been covered by Comunidad de Madrid through TAGRALIA-CM research group, Technical University of Madrid, by the AECID program through A/019197/08 and A/9586/07 projects and by the MICINN with the project Smart-QC (GL2008-05267-C03-03).

**Anexo 3: Refrigerated Fruit Storage Monitoring Combining Two
Different Wireless Sensing Technologies: RFID and WSN**

Article

Refrigerated Fruit Storage Monitoring Combining Two Different Wireless Sensing Technologies: RFID and WSN

Ricardo Badia-Melis ^{1,*}, Luis Ruiz-Garcia ¹, Javier Garcia-Hierro ² and Jose I. Robla Villalba ²

¹ Departamento de Ingeniería Agroforestal, ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, 28040 Madrid, Spain; E-Mail: luis.ruiz@upm.es

² Sensors Technology Laboratory, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CENIM-CSIC), Avenida Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid, Spain; E-Mails: j.hierro@cenim.csic.es (J.G.-H.); jrobla@cenim.csic.es (J.I.R.-V.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: ricardobadia@live.com; Tel.: +34-649-473-865.

Academic Editors: Luciano Lavagno and Mihai T. Lazarescu

Received: 17 December 2014 / Accepted: 15 February 2015 / Published: 26 February 2015

Abstract: Every day, millions of tons of temperature-sensitive goods are produced, transported, stored or distributed worldwide, thus making their temperature and humidity control essential. Quality control and monitoring of goods during the cold chain is an increasing concern for producers, suppliers, logistic decision makers and consumers. In this paper we present the results of a combination of RFID and WSN devices in a set of studies performed in three commercial wholesale chambers of 1848 m³ with different set points and products. Up to 90 semi-passive RFID temperature loggers were installed simultaneously together with seven motes, during one week in each chamber. 3D temperature mapping charts were obtained and also the psychrometric data model from ASABE was implemented for the calculation of enthalpy changes and the absolute water content of air. Thus thanks to the feedback of data, between RFID and WSN it is possible to estimate energy consumption in the cold room, water loss from the products and detect any condensation over the stored commodities.

Keywords: cold chain; logistics; post-harvest; wireless sensor networks; RFID

1. Introduction

The production, storage, distribution and transport of cold sensitive products, occurs daily around the world. For all these products the control of temperature is essential [1]. The term “cold chain” describes the series of interdependent equipment and processes employed to ensure the temperature preservation of perishables and other temperature-controlled products from the production to the consumption end in a safe, wholesome, and good quality state [2]. The inadequate management of this supply chain can reduce the acceptable quality limit of fresh fruit and vegetables (FFVs) making approximately one-third of these products be thrown away [3]. Thus, the major challenge is to ensure a continuous cold chain from producer to consumer in order to guarantee the prime condition of goods [4]. These products may be perishable items like fruit, vegetables, flowers, fish, meat and dairy products or medical products like drugs, blood, vaccines, organs, plasma and tissues. The properties of all of them are affected by temperature changes. In case of deviations from the optimal cold chain conditions, the shelf life of the sensitive products will be reduced, yet the consequences of this shelf life drop are only physically visible in the advanced stages of the supply chain in many occasions. To understand this variation is possible by a remote monitoring [5].

The quality of these products might change rapidly due to inadequate temperature and relative humidity conditions during transport and storage. Temperature variations can occur during warehousing, handling and transportation. Inadequate temperature is second on the list of factors causing foodborne illnesses, surpassed only by the presence of initial microflora in foods [6]. The U.N. FAO estimates that each year, approximately one-third of all food produced for human consumption in the world is lost or wasted [7]. Thus, studying and analyzing temperature gradient data inside refrigeration rooms, containers and trucks is a primary concern for the industry. Any temperature disturbance can undermine the efforts of the whole chain [8].

It is not easy to maintain appropriate conditions over the whole chain, and negligence or mishandling in the logistics of perishable food products is very common, including goods poorly or excessively cooled. Jedermann [9] reported many examples where the inadequate management during temperature control usually leads to losses in the food chain (post-harvest, distribution and at home).

Apart from temperature, water loss is one of the main causes of deterioration that reduces the marketability of fresh fruits and vegetables. Transpiration is the loss of moisture from living tissues. Most weight loss of stored fruit is caused by this process. Relative humidity (RH), temperature (T) of the product, temperature of the surrounding atmosphere, and air velocity all affect the amount of water lost from perishable food products. Free water or condensation is also a problem as it encourages microbial infection and growth, and it can also reduce the strength of packaging materials [10,11].

Wireless technologies have been considered key technological enablers, whereby intelligent tags are attached to an item, within a network with wireless links, which can transmit some physical parameters such as temperature or humidity in addition with other information like position or movement [12].

Some studies have demonstrated that a proper control over the cold chain using RFID loggers can lead to reduced waste of products by using the “First Expiring First Out”, rather than the classical “First In First Out” paradigm, and also have implemented prediction temperature methods in order to improve the estimation of shelf life [13]. RFID tags are not limited to identification or temperature and

RH reading tasks, and recent advancements have produced RFID units able to identify volatile chemicals such as ethylene or ammonia [14].

Specialized Wireless Sensor Network (WSN) monitoring devices can revolutionize the shipping and handling of a wide range of perishable products by providing suppliers and distributors with continuous and accurate readings throughout the distribution process. In this framework, WSN was developed as a very promising technology due to its low energy consumption and advanced networking capabilities. The potential for monitoring with both technologies, WSN and RFID, has been suggested by several studies; however there is still a lack of implementation and experimentation in real environments, and no study combines the advantages of using both at the same time [15–19].

The paper is focused on the analyses of the performance of semi-passive RFID loggers and WSN motes, in order to enable an economical solution for the spatial profiling of refrigerated chambers, with a high number of loggers. The aim of this work is to demonstrate the compatibility and feedback in a combination of the RFID and WSN in order to improve the refrigerated storage of perishable food products. The authors also want to provide some recommendations to improve current wireless devices and some management protocols or rules for the usage of the cold storage rooms.

2. Materials and Methods

2.1. Refrigerated Chamber

Experiments were performed in three commercial wholesale refrigerated stores, numbered 11, 29 and 40 and each of which has a volume at of $26 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 12 \text{ m} = 1848 \text{ m}^3$, with an on/off glycol cooling system and insulated walls built of foam sandwiched between two layers of corrugated plate (total wall thickness is 0.16 m). The set point experimentation times were different in each one (see Table 1). Each chamber has a common pre-chamber space where a devoted sensor is placed. Therefore, two different ambient conditions occur: pre-chamber (right outside the chamber) and the inside chamber with a well-known set point (see Table 1).

Table 1. Experimental conditions.

Cold Store Number	Set Point (°C)	Experimentation Time (days)	Dates
11	8	13	7–19 July
29	7	8	20–27 July
40	14	4	28–31 July

Chamber number 11 was divided into two equal size sections by a wall with a door that remained open all the time. The dimensions of the door were the same as the main door to the exterior of the whole room, *i.e.*, it was big enough to allow a forklift with a big pallet to pass. The room was provided with two cooling systems, one per each section of the chamber. Inside were two shelves on either side of the room with three heights, where the products were stored. When the temperature of the room reached 8 °C the refrigerator was triggered to cool down to 6.5 °C. A scheme of the chambers can be seen in Figure 1.

Figure 1. Scheme of the cold rooms and sensor distribution.

Chamber number 29 had identical dimensions but with no separating wall in the middle, and the temperature was set at 7 °C and dropped to 5.5 °C. Both these rooms were designated to store mostly citric fruits and different varieties of nuts.

The last chamber (number 40) was divided into two sections separated by a wall with a semiautomatic blind door; the first section was designated for the storage of vegetables and the other section was designated for fruit and vegetable packaging.

2.2. WSN Motes

Two ZigBee/IEEE 802.15.4 motes (transmitters) and one base station (receiver) were used. One mote was installed outside the chamber, close to the door and the other one inside, at the other side of the wall. Sampling rate was set to 180 s.

These motes were manufactured by Crossbow® (Milpitas, CA, USA) and they have a microcontroller board (IRIS, Milpitas, CA, USA) together with an independent transducer board (MTS400, Andover, MA, USA) attached by means of a 52 pin connector. Its processor & radio platform is a XM2110CA, based on the Atmel ATmega1281. The RF power was configured to 3 dBm (60% higher than previous MICA Motes). Power was supplied by two AA lithium batteries.

The MTS400 board hosts a variety of sensors: temperature and relative humidity (Sensirion SHT, Staefa, Switzerland), barometric pressure and temperature (Intersema MS5534B, Hampton, VA, USA), light intensity (TAOS TSL2550D, Plano, TX, USA) and a two-axis accelerometer (ADXL202JE, Norwood, MA, USA). A laptop computer is used as the receiver, and it communicates with the nodes through a Micaz mounted on the MIB520 ZigBee/USB gateway board; this device also provides a USB programming interface. In this study only the data from the Sensirion and Intersema units was used.

The Sensirion SHT is a single-chip relative humidity and temperature multi-sensor module that delivers a calibrated digital output. Each SHT is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into the One Time Programmable (OTP) memory. These coefficients are used internally during measurements to calibrate the signals from the sensors.

For temperatures significantly different from 25 °C, and according to the manufacturer recommends performing humidity and temperature compensation, using Equations (1) and (2):

$$RH_{linear} = (-4) + 0.0405 \times SO_{RH} + (-2.8 \times 10^{-6}) \times SO_{RH}^2 \quad (1)$$

where SO_{RH} = Sensor Output Relative Humidity.

$$RH_{true} = (T \text{ } ^\circ\text{C} - 25) \times (0.01 + 0.00008 \times SO_{RH}) + RH_{linear} \quad (2)$$

The MS5534B is a SMD-hybrid device including a piezoresistive pressure sensor and an ADC-Interface IC. It provides a 16 bit data word from a pressure and temperature (−40 to +125 °C) dependent voltage. Additionally the module contains six readable coefficients for a highly accurate software calibration of the sensor. MS5534B is a low power, low voltage device with automatic power down (ON/OFF) switching. A 3-wire interface is used for all communications with a microcontroller. Sensor packaging options are plastic or metal caps.

2.3. Semi-Passive RFID Tags

RFID tags can be active, passive, or semi-passive. Passive and semi-passive RFID send their data by reflection or modulation of the electromagnetic field that was emitted by the reader. The battery of semi-passive RFID is only used to power the sensor and recording logic [1]. In this study we used semi-passive tags.

Up to 90 RFID semi-passive loggers were installed in each chamber, the tags are distributed in four layers or heights; each layer is as shown in Figure 1. The tags were manufactured by Sealed Air (New York, NJ, USA), and two different types were used, a Turbo Tag T700 (−30 °C to +55 °C) and the T702-B (−70 °C to +80 °C). Each tag operates in the 13.56 (ISO 15693-3 compliant) MHz band, has the size of a credit card, is accurate to within ±0.5 °C, and both have KSW Microtec (Dresden, Germany) temperature sensors and can store up to 702 temperature measurements.

2.4. Data Analysis

In the particular case of the WSN system, since its task consists of sending data to a gateway in a continuous flow, a specialized Matlab program has been developed for assessing the percentage of lost packets (%) in transmission, by means of computing the number of multiple sending failures for a given sample rate (SR). A multiple failure of “m” messages occurs whenever the elapsed time between two messages lies between $1.5 \times m \times \text{SR}$ and $2.5 \times m \times \text{SR}$. For example, with a sample rate of 11 s, a single failure ($m = 1$) occurs whenever the time period between consecutive packets is longer than 16.5 s ($1.5 \times 1 \times 11$) and shorter than 27.5 s ($2.5 \times 1 \times 11$). The total number of lost packets is computed based on the frequency of each failure type. Accordingly, the total percentage of lost packets is calculated as the ratio between the total number of lost packets and the number of sent packets.

The standard error (SE) associated to the ratio of lost packets is computed based on a binomial distribution as expressed in Equation (3), where n is the total number of packets sent, and p is the ratio of lost packets in the experiment:

$$SE = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \quad (3)$$

A second dedicated Matlab code was used for plotting 3D temperature gradients. This program makes use of linear spatial interpolation in order to obtain 3D representations of normalized temperatures and variances inside the chambers. Due to the significant variation of external conditions in the Spanish summer, temperature analysis make use of a normalized temperature difference (ΔT_n), which is computed with respect to the set point and to the outside temperatures (see Equation (4)). This value gives a normalized measure with respect to the varying ambient conditions of the experiments:

$$\Delta T_n = \sqrt{\frac{T_m - T_s}{T_e - T_s}} \quad (4)$$

where ΔT_n (dimensionless) stands for the normalized temperature difference, T_m is the average temperature value ($^{\circ}\text{C}$) of each RFID logger, T_s is the temperature set point value ($^{\circ}\text{C}$), and T_e refers to the average outside temperature ($^{\circ}\text{C}$).

Finally, a 3D plot of indoor temperature variance with regard to outdoor temperature variance is recorded in order to represent the indoor temperature variability corrected with regard to changes in ambient experimental conditions (see Equation (5)):

$$V_n = \frac{V_i}{V_e} \quad (5)$$

where V_n is the normalized indoor variance for experiment, V_i is the indoor temperature variance of each logger, and V_e is the outside variance. The indoor variability is expected to be lower than the pre-chamber variability, this value will give us an estimation of the differences in the temperatures in the two ambient; the closer to the unit the normalized indoor variance is, the closer the two variances are. This can provide an idea of the influence of the outdoor temperatures without taking into account the set point, therefore it is possible to evaluate the transit of the staff and the isolation of the cold room itself, while in the normalized temperature difference the cooling unit appears as a factor in the equation. The complete set of data is included for each experiment:

2.5. Psychrometric Data

The ASAE D271.2 standard, defined in April 1979 and reviewed in 2006, is used for computing the psychrometric properties of air [20]. Equations (6)–(8) and Table 2 enable the calculation of all psychrometric data of air whenever two independent psychrometric properties of an air-water vapor mixture are known in addition to the atmospheric pressure:

$$P_s = R * e^{\frac{A+B*T+C*T^2+D*T^3+E*T^4}{F*T-G*T^2}} \quad (6)$$

$273.16 \text{ K} \leq T \leq 533.16 \text{ K}$. T = Temperature (K), P_s = Saturation vapour pressure (Pa) [20].

$$P_v = P_s \frac{RH}{100} \quad (7)$$

P_v = Vapor pressure (Pa) [20].

$$H = \frac{0.6219 * P_v}{P_{atm} - P_v} \quad (8)$$

H = Absolute humidity (g/kg dry air), P_{atm} = Atmospheric pressure (Pa) [20].

Table 2. Coefficients used to compute the psychrometric data, according to Equation (7) [20].

$R = 22,105,649.25$	$D = 0.12558 \times 10^{-3}$
$A = -27,405.526$	$E = -0.48502 \times 10^{-7}$
$B = 97.5413$	$F = 4.34903$
$C = -0.146244$	$G = 0.39381 \times 10^{-2}$

3. Results and Discussion

The presentation of the results in this work is divided into three parts. The first is the percentage of lost packets in the WSN transmission, which is key knowledge since is telling how much information is lost in translation, and it is saying that probably there should be a better transmission, the reasons are either a reading range problem, volumes of data are too big or there is some physical limitation, e.g. a massive amount of loggers, as Ruiz-Garcia & Lunadei address in their article [1], there are certain challenges and limitations that hinder a perfect data flow. That is another reason why RFID shows good complementarity with WSN, and the data loss can be addressed with the RFID tags.

The second part is about the temperature distribution, and as it was only possible to carry out this measurement due to the high volume of data generated from the RFID tags; it allows creating a uniform mesh of temperature nodes with many data points which is necessary for the 3D representation, in this case this big volume was not a limitation, but when there is a good understanding of the environment, certain spots of the cold room can be monitored with temperature estimation methods and bypass the actual sensors, as was successfully shown by other authors [21–23].

The third part is the psychrometric representation, where both the humidity sensor like the temperature sensor (in the WSN nodes) are gathered in the Sensirion SHT unit. This graphics are meant to compare the air inside and outside the cold rooms close to the door.

3.1. Percentage of Lost Packets

The 3 dBm of RF power used by the motes was enough to enable sending data outside the chamber. More than 98% of the packets sent were able to cross the walls (see Table 3). Only 1.25% of signals were lost in the worst case (Chamber 11). In previous experiments [24] under very similar conditions, the average of lost packages was $1.92\% \pm 0.07\%$, in that case the gateway was located in the same room as the mote and in our experiment one of the motes is across the isolating door of the room for better performance.

Table 3. Percentage of data lost packets and standard error during the experiments.

Cold Store Number	Mote Inside (Data)	Mote Outside (Data)
11	0.26 ± 0.01 (6117)	1.25 ± 0.01 (6007)
29	0.24 ± 0.02 (3244)	0.89 ± 0.02 (3223)
40	0.21 ± 0.02 (1846)	0.70 ± 0.02 (1826)

3.2. 3D Plots

Before starting with the 3D views, it is important to take a look on the absolute temperatures, which will give the reader a better understanding of the following Figures 3 and 4. Figure 2a shows the cooling cycles inside the cold room, recorded by the sensors in the WSN mote and the RFID tag located near the mote. Accordingly with the normalized temperature one can appreciate that the temperature from the Turbo tag rarely surpasses the set point, and that gives a negative normalized temperature. In Figure 2b the day and night cycles are shown and the differences between the maximum and minimum values are around 5 °C and are bigger than inside the room (around 3 °C), which gives a normalized indoor variance between 0 and 1.

Figure 2. (a) Absolute temperature inside chamber 29; (b) Absolute temperature pre-chamber 29.

Figures 3 and 4 show a summary of the 3D views corresponding to temperature behavior for Chambers 11 and 29. Both the normalized indoor variance (ΔT_n) and normalized temperature variance are represented. In both cases mean temperatures were close to the set point, which means almost 0 normalized indoor variance ($\Delta T_n = 0$). The highest differences in room 11 were registered by the sensors located in the ceiling, where in the back part of the room it can reach a normalized temperature

difference (NTD) of 0.01 points and in a spot in the front part it goes to -0.05 points. In Figure 3, in Chamber 11 one can appreciate how the temperatures are closer to the set point in the back part of the room with an average of -0.01 than in the front part with a lower average -0.03 , the front part presents the most different temperature from the set point despite the fact the two parts of the room each have a cooling system, so it would be justified by the influence of the transit of people going in and out of the room to cause the opening and closing of the door repeated times it makes the refrigeration system work harder and makes that the NTD goes below the set point, reaching at some points less than -0.05 units. The NTD corresponds with the normalized indoor variance (NIV) where one can appreciate as well the separation by the wall and how the variance values are higher where the door on the outside is located, with an average in NIV of 0.01.

Figure 3. 3D plot of Normalized Temperature Difference and Indoor Variance in Chamber 11.

Room 11 shows a NIV always below the unit which means that the indoor variance is always lower than the outside one; this is justified by the big variability of temperatures during the Spanish summer, and the controlled temperature inside the cold rooms. The temperature in Chamber 11 was horizontally less homogeneous (having more or less an average NIV of around 0.01 in the entire room with no differentiated layers) than in Chamber 29, which has different NIV levels each with a homogeneous NIV such as 0.03, 0.02 and 0.015, which can be justified by the existence of an intermediate wall that divides the refrigerated chamber into two zones, while Chamber 29 is less homogeneous vertically having the perfectly differentiated layers mentioned above, which is justified because the Chamber 29

is only provided with one cooling unit for the same space than room 11 which is provided with two units, one per each part of the room.

Room 29 as is said (Figure 4), is not provided by a separation wall, which makes the air flow along the space without interruptions, but with the characteristic that it has to cool down a space double the size of Chamber 11. NTD gets closer to the set point value close to the ceiling of the room than in the rest of it, reaching in some spots almost 0, but always below the set value, while in the rest of the room it has an average NTD of -0.13 .

Figure 4. 3D plot of Normalized Temperature Difference and Indoor Variance in Chamber 29.

3.3. Psychrometry

The absolute humidity of the air inside the chambers was calculated, based on the ASAE standard D271.2 (1979) [20], using the data recorded during experiments. Psychrometric charts for two chambers (numbers 29 and 40) are included in Figures 5 and 6, which illustrate the evolution of air absolute humidity (H , kg of water/kg of dry air) related to the T ($^{\circ}\text{C}$). The blue cloud corresponds to the mote inside the chamber while the red one refers to the mote located outside (pre-chamber). Door openings created an increase in T ($^{\circ}\text{C}$) and H (kg of water/kg of dry air), which then returns to normal again once the door is closed. During the rest of the time, it is also possible to detect the interaction between air properties and the product; with the cycles of cooling, variations in the absolute humidity can be estimated: condensation over the products (as loss of absolute humidity), or water evaporation (as

an increase in absolute air humidity). The diagram corresponding to room 11 is similar to that of room 29, which is why is not presented in this article.

Figure 5. Psychrometric chart in Chamber 29.

Figure 6. Psychrometric chart in Chamber 40.

In Figure 5, corresponding to Chamber 29, an important difference of temperatures between inside and outside the room is appreciated, as the blue cloud in many occasions reaches a RH of 100%, water saturation in the air, and this cloud of dots is always higher in RH lines than the cloud corresponding to the outside. One can appreciate differentiated paths moving up and down the RH lines, corresponding to a vapor condensation and increase of the temperature due to the door opening, when the air with different enthalpies is mixing. Both the inside node and the outside node present very similar lower H (equal to 4 kg water/kg dry air), while the upper H reaches more than 12 kg water/kg dry air in the

outside node, and inside does not go beyond 8 kg water/kg dry air. There is no exchange of air flow at any moment; the air masses are clearly separated. The cloud is more compact in the interior of the room than in the exterior and it remains around 5 to 10 °C, while outside it has a wider temperature interval (from 20 to 30 °C) and with the same absolute humidity, it stays below in RH.

In this case (Figure 6) the air inside has an H oscillating in a smaller range (between 4 and 8 kg water/kg dry air) than in the outside (between 3 and 10 kg water/kg dry air), and a much wider range of temperatures than the other two chambers (Figure 5) because the room was open during long periods of time; it even reaches 23 °C, which is a regular temperature registered in the node outside. The blue cloud (inside) shows horizontal movements corresponding to an increase in temperature due to the door opening. The outside cloud contains wide cycles that correspond to an opening and closing of the door and/or changes between day and night, since the pre chamber area is directly influenced by the heat of the sun. In contrast to Chamber 29, it is appreciated how the temperatures are equalized in the middle of the image due to the fact the door stays open for a long time, which is causing the mixing of the air and heat exchange, and a temperature and humidity gradient is also appreciated inside the chamber, in some occasions the RH reaches 80% whereas outside it never goes above 55% despite the door usually being open.

The use of a psychrometric equation provides very valuable information regarding air fluxes and water transport phenomena from the product to the air. Using two sensors of just one single mote it is possible to obtain such information in real time, and one can conclude by observing Figures 4 and 5, both from Chamber 29, that the data obtained are complementary, since it is not possible to deduce that there is no exchange of air flow at the door by observing Figure 4 alone. In addition, the temperature registered by the inside node near to the door is not representative of the entire room; therefore the RFID tags are completing the data pool for the subsequent analysis. The continuous data flow coming from the nodes can be accessed at any moment; the nodes are located in critical spots (like the doors). This information is an indicator of the surrounding area, which can be studied in detail thanks to the data obtained from the temperature tags.

4. Conclusions

In this paper a practical demonstration in a real scenario of the complementarity of RFID semi passive tags and the WSN is shown. The performance of the RFID tags and the WSN nodes was positive overall, the data losses was acceptable, small enough to allow one to analyze the parameters in order to create temperature distribution maps and psychrometric diagrams, but this set up is only possible in a testing phase. Since such a massive quantity of RFID tags is not possible in this scenario in the way those were positioned, it means an *ad hoc* version of this system should be developed for each case. The relative low cost of the RFID loggers allows dense implementations that provide accurate information about temperature gradients inside the chambers. The amount of data obtained from all the tags is manageable with a proper program such as devoted programs developed in Matlab. In the other hand extracting the data from a big number of these units in the cold rooms that are subject of study was a difficult task to accomplish, due to the location and the main limitations of these loggers which are their reading range and sensing capabilities.

Some of the loggers could be substituted by certain temperature estimation methods, but although these techniques are demonstrated to be reliable, other loggers located in critical spots should not be removed since there are changing conditions that cannot be predicted, such as the movement of the pallets inside the room.

Further experiments can provide a closer implementation of the two technologies, by developing a complex system comprising WSN nodes and RFID units. The benefits of this implementation are shown in this work, on the one hand WSN presents a long reading range thanks to the point to point (PtP) data transmission and a constant information flow, while in the other hand RFID lacks a PtP chain and also the tags used in the present experiments do not send information unless requested by the reader. The high price of the sensor nodes makes a dense node mesh difficult to afford, but this weakness could be resolved by using cheaper tags, and also the RFID tags are more manageable and robust due to their encapsulation.

After a detailed analysis of the data gathered in these experiments, and the experience achieved using the devices that are provided with the sensors used, the authors would like to recommend some improvements and changes to be made in the construction of the sensors. The reading range should be addressed; long range reading fixed readers or handhelds should be implemented and enhanced so communication of large amounts of data can be done with commercial RFID temperature tags. Also the range of sensing can be improved, some prototypes like the named in the introduction of this document could be turned in commercial units, as shown in this article, the use of pressure and humidity is a useful tool to see the air exchange in critical points such as the door of the cold room. As demonstrated in the experiment, WSN nodes can provide information that can be essential to detect breaks in the cold chain, nonetheless WSN nodes lack robustness, these devices are always weak and the electronics are very exposed to any possible damage, so manufacturers should work on motes able to support friction, impacts and adverse climatological conditions. Maybe some kind of hybrid unit creating a RFID sensor network, where the lightness, robustness and price from RFID is combined with the extended reading range PtP and diversity of sensors characteristic from the WSN units.

In the other hand, the authors want to provide some chamber design rules and management protocols that can save energy consumption costs in the cold room and help to extend the freshness of the cargo. As seen in the Chamber 11 the back part of it is closer to the set point than the front which is connected with the pre-chamber through a door, therefore, the most sensitive goods should be placed in the back part. In Chamber 40, a big waste of energy was noted because the outdoor and indoor air is being mixed constantly, hence the stored vegetables should be placed in the back part, and the processing tables moved to the front part. Finally an influencing factor that affects all the rooms is the opening and closing of the door, so a cooled pre-chamber should be studied; the actual pre-chamber is a corridor connected with the exterior with no isolation, and this has a certain negative effect on the temperatures when there is transit of the staff.

Acknowledgments

Thanks to SMART-QC research program (Ref.: GL2008-05267-C03-03/ALI) supported by the Ministry of Science and Innovation and TAGRALIA project funded by the Comunidad de Madrid

(Ref.: S-0505/AGR-0187). The authors would also like to thank Antonio Rabasco and Jorge Sanchez for their help during the experiments.

Author Contributions

In this article, Ricardo Badia contributed with the experimental work, analyzed the data, wrote the mayor part of the article and took charge of modifying the article once written. Luis Ruiz designed the experiments and supervised them, also wrote part of the article and made the tables. Javier Garcia created the figures and analyzed the data. Jose I. Robla supervised the article and contributed to write it, as well as provide part of the valuable materials.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Ruiz-Garcia, L.; Lunadei, L. The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges. *Comput. Electron. Agric.* **2011**, *79*, 42–50.
2. Gwanpuua, S.G.; Verbovena, P.; Leducqb, D.; Brownc, T.; Verlindend, B.E.; Bekelea, E.; Aregawia, W.; Evansc, J.; Fosterc, A.; Duretb, S.; *et al.* The FRISBEE tool, a software for optimising the trade-off between food quality, energy use, and global warming impact of cold chains. *J. Food Eng.* **2015**, *148*, 2–12.
3. Gustavsson, J.; Cederberg, C.; Sonesson, U.; Otterdijk, R.; Meybeck, A. Global food losses and food waste: Extent, causes and prevention. In *Interpack 2011*; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2011.
4. Kim, W.R.; Aung, M.M.; Chang, Y.S.; Makatsoris, C. Freshness Gauge based cold storage management: A method for adjusting temperature and humidity levels for food quality. *Food Control* **2015**, *47*, 510–519.
5. Jedermann, R.; Nicometo, M.; Uysal, I.; Opara, L.; Janssen, S.; Lang, W. *Intelligent food logistics*; The Royal Society: London, UK, **2015**.
6. Sánchez López, T.; Daeyoung, K. Wireless Sensor Networks and RFID Integration for Context Aware Services. In *White Paper Series 2008*; AUTOIDLABS-WP-SWNET-026, Daejeon, Korea, 2008.
7. UN/FAO 2013. Food Wastage Footprint Impacts on Natural Resources: Summary Report, 2013. Available online: <http://www.fao.org/docrep/018/i3347e/i3347e.pdf> (accessed on 12 September 2014).
8. Mahajan, P.V.; Caleb, O.J.; Singh, Z.; Watkins, C.B.; Geyer, M. Postharvest treatments of fresh produce. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2014**, doi:10.1098/rsta.2013.0309.
9. Jedermann, R.; Nicometo, M.; Uysal, I.; Lang, W. Reducing food losses by intelligent food logistics. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2014**, *372*, 20130302.
10. Lian, F.; Zhao, W.; Yang, R.; Tang, Y.; Katiyo, W. Survival of *Salmonella enterica* in skim milk powder with different water activity and water mobility. *Food Control* **2015**, *47*, 1–6.

11. Burg, S.P. Chapter 10—Capillary Condensation in Non-Waxed Cardboard Boxes. In *Hypobaric Storage Food Industry: Advances in Application and Theory*; Academic Press: London, UK, 2014.
12. Zou, Z.; Chen, Q.; Uysal, I.; Zheng, L. Radio frequency identification enabled wireless sensing for intelligent food logistics. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2014**, *372*, 20140209.
13. Nascimento Nunes, M.C.; Nicometo, M.; Emond, J.P.; Badia-Melis, R.; Uysal, I. Improvement in fresh fruit and vegetable logistics quality: Berry logistics field studies. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2014**, *372*, 20140212.
14. Fiddes, K.; Yan, N. RFID tags for wireless electrochemical detection of volatile chemicals. *Sens. Actuators B Chem.* **2013**, *186*, 817–823.
15. Badia-Melis, R.; Garcia-Hierro, J.; Ruiz-Garcia, L.; Jiménez-Ariza, T.; Robla Villalba, J.I.; Barreiro, P. Assessing the dynamic behavior of WSN motes and RFID semi-passive tags for temperature monitoring. *Comput. Electron. Agric.* **2014**, *103*, 11–16.
16. Georg, H.H.; van Jos, H.; Eelco, J.; Klaas, S. Adoption of Wireless Sensors in Supply Chains: A Process View Analysis of a Pharmaceutical Cold Chain. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.* **2013**, *8*, 138–154.
17. Ruiz-Garcia, L.; Steinberger, G.; Rothmund, M. A model and prototype implementation for tracking and tracing agricultural batch products along the food chain. *Food Control* **2010**, *21*, 112–121.
18. Qi, L.; Xu, M.; Fu, Z.; Mira, T.; Zhang, X. C2SLDS: A WSN-based perishable food shelf-life prediction and LSFO strategy decision support system in cold chain logistics. *Food Control* **2014**, *38*, 19–29.
19. Jedermann, R.; Pötsch, T.; Lloyd, C. Communication techniques and challenges for wireless food quality monitoring. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2014**, *372*, 20130304.
20. ASABE. Psychrometric Data ASAE D271.2 APR1979, R2005. Available online: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?rep=rep1&type=pdf&doi=10.1.1.212.6816> (accessed on 25 February 2015).
21. Uysal, I.; Emond, J.P.; Bennett, G. Tag testing methodology for RFID enabled temperature tracking and shelf life estimation. In Proceedings of the IEEE International Conference on RFID Technology and Applications, Sitges, Spain, 15–16 September 2011.
22. Jedermann, R.; Lang, W. The minimum number of sensors—Interpolation of spatial temperature profiles in chilled transports. *EWSN* **2009**, *LNCS 5432*, 232–246.
23. Badia-Melis, R.; Brecht, E.; Lowe, A.; Uysal, I. Pallet wide temperature estimation and mapping for perishable food. In Proceedings of the Poster on Annual Conference ASABE 2013, Kansas City, MO, USA, 21–24 July 2013.
24. Ruiz-Garcia, L. Development of Monitoring Applications for Refrigerated Perishable Goods Transportation. Ph.D. Thesis, Ingenieria Rural, Universidad Politécnica de Madrid: Madrid, Spain, 2008.

Anexo 4: Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer

Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer

E. Correa-Hernando^{a,*}, F.J. Arranz^b, B. Diezma^b, E. Juliá^c, J.I. Robla^d, L. Ruiz-García^b, J. García-Hierro^d, P. Barreiro^b

^a Departamento de Ciencia y Tecnología Aplicadas a la Ingeniería Técnica Agrícola, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid, Spain

^b Departamento de Ingeniería Rural, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Av. Complutense s/n, 28040 Madrid, Spain

^c Grupo de Energías Renovables, Facultad de Mecánica, Universidad de Oriente, Avenida Las Américas, Santiago de Cuba, Cuba

^d Laboratorio de Tecnología de Sensores, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Av. Gregorio del Amo 8, 28040 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 January 2011

Received in revised form 24 May 2011

Accepted 13 July 2011

Keywords:

Ubiquitous monitoring

Psychrometric model

Automated control

Energy efficiency

Wood

Smart sensor

ABSTRACT

Solar dryers are increasingly used in developing countries as an alternative to drying in open air, however the inherent variability of the drying conditions during day and along year drive the need for achieving low cost sensors that would enable to characterize the drying process and to react accordingly. This paper provides three different and complementary approaches for model based sensors that make use of the psychrometric properties of the air inside the drying chamber and the temperature oscillations of the wood along day. The simplest smart sensor, SMART-1, using only two Sensirion sensors, allows to estimate the accumulated water extracted from wood along a complete drying cycle with a correlation coefficient of 0.97. SMART-2 is a model based sensor that relays on the diffusion kinetics by means of assessing temperature and relative humidity of the air inside the kiln. SMART-2 model allows to determine the diffusivity, being the average value of D for the drying cycle studied equal to $5.14 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ and equal to $5.12 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for two experiments respectively. The multidistributed supervision of the dryer shows up the lack of uniformity in drying conditions supported by the wood planks located in the inner or center of the drying chamber where constant drying rate kinetics predominate. Finally, SMART-3 indicates a decreasing efficiency along the drying process from 0.9 to 0.2

© 2011 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Low cost sensors are most suitable for the supervision and control of solar dryers, and can be easily upgraded by including smart capabilities. According to Corsi (2007), the term smart sensor refers to those elements containing sensing and signal processing capabilities and understanding, with objectives ranging from simple viewing to sophisticated remote sensing, surveillance, search/track, robotics, perception and intelligence applications. The smart sensor is expected to have the capability that functionality and architecture, as well as raw data acquisition are based on the existence of a microprocessing unit (Son et al., 2009).

On board processing at the sensor allows a portion of the computation to be done locally on the sensors' embedded microprocessor, with self diagnosis and self-calibration capabilities, thus reducing that data amount of information that needs to be transmitted over the network. It is important to state that the basic difference between a smart sensor and a standard integrated sensor is its intelligence capabilities (Spencer et al., 2004).

More and more, intensive and real-time data acquisition networks point that it is feasible to reconstruct spatial information in large areas from relatively scarce local data, though there is a need for simultaneously engineer the application and the technology knowledge (Camilli et al., 2007), as well as bringing together engineering and agronomics (Kitchen, 2008).

Integrating environmental data into model based concepts allow estimating risk of epidemic development in the fields even on a daily basis that can be web-based consulted (Wharton et al., 2008; Matese et al., 2009; Zhu et al., 2010), and can be used for more efficient closer-to-crop practices (Cunha et al., 2010) with closed loop on-site control of agricultural practices such as irrigation (Vellidis et al., 2008). Special requirements are found when wireless nodes are mounted on moving targets such as animal (Nadimi et al., 2008; Umstätter et al., 2008; Tøgersen et al., 2010).

Information models can be centered on the decision maker for the generation of management systems, which will lead to new working habits and to gaining increased insight into their production processes, as well as to access and utilize better available scientific research and technological developments (Sorensen et al., 2010).

Wood drying is an important step in wood manufacturing and the highest energy consumer with about 70% of the total energy

* Corresponding author.

E-mail address: evacristina.correa@upm.es (E. Correa-Hernando).

used in the manufacturing of most wood products (Khater et al., 2004). Since the 1960s, several types of solar kiln for timber drying have been studied and improved on, due to some advantages of the solar kilns, as lower or no operating cost since no fuel is needed for air heating. On the other hand the main disadvantage is its dependence on weather conditions resulting in less controllability by the operator, and less predictable outcomes (Haque and Langrish, 2005; Reuss et al., 1997). Commercial kilns (i.e. Solar Dryers Australia Pty. Ltd. or CONA SOLAR AUSTRIA) are available, ranging from very simple systems with only a solar kiln with an integrated collector and small capacity, to automated dryers with an integrated energy storage system.

In some solar dryers, the product to be dried receives energy not only from the hot air supplied by a solar collector but by direct exposure to solar radiation, being the product protected from rain, insects and dust (Fargali et al., 2008). One of the functions of the closed-type solar dryers is to avoid and isolate the humid environment from the drying process, including sometimes a dehydrator unit to enhance the drying process and to reuse the hot air. Other types of solar dryers make use of a solar collector that utilizes directly the energy from the sun to heat water that passes through it (Fargali et al., 2008). In such case, the output water from the collector is stored in a water tank. Such dryers attenuate the effect of solar radiation variability along the day, due to cloudy conditions, as well as due to the absence of radiation during night.

According to Chen et al. (2005), in traditional open-sun drying methods the drying rate is controlled by a number of external factors (solar radiation, ambient temperature, wind velocity and relative humidity) and internal factors (initial moisture content, type of product, and the mass of product per unit exposed area). Such procedure, does not allow for obtaining a suitable and reproducible product quality, especially for food, mainly because of the inherent limitations in controlling the drying process.

Recently, Luna et al. in a review on the trends in solar kilns for drying timber uses an analytical method for product design based on TRIZ theory (Luna et al., 2009), and proposes the use of eight laws to evaluate developments in solar dryers. Two of such laws, *Coordination of Rhythms* and *Increase in Level of Improvement*, are specially defined to solve problems caused by the alternating day/night, stacional rythms or weather variations. The guidelines of this article can help addressing the quality of any dryer design. The definition, implementation and integration of intelligent model based sensors in solar dryers, which is faced in current research work actively enhances the quality of the dryer design.

2. Materials and methods

2.1. Solar dryer

An experimental solar dryer, constructed by CONA SOLAR (Austria) and sited in Cuba (20°1'N, 75°50'W), was used during the experiments carried out in July and October (2009). This dryer has a capacity of 0.3 m³, is equipped with a solar collector of 2 m², a 12 V DC fan, a chamber for drying, various metallic trays where samples of pine (*Pinus sp.*) wood were placed, a gate that controls the recirculation of air and a plenum chamber. The air comes into the dryer by one side, being heated in the roof, sucked into the plenum chamber and ducted to the fan which blows it into the drying chamber where the wood is placed on trays. Fig. 1 shows the air path inside the dryer and accross the stocked timber, highlighting the possibility of air recirculation. After passing through the trays, a percentage of the air exits from the underneath, the other fraction is recirculated towards the fan. The position of the hand regulated recirculation gate, was the same for both experiments (50% open).

Fig. 1. (Up) Schematic representation of the proposed Smart sensors. Type and (number) of sensors required is presented. (down) Scheme of the solar dryer: solar collector (1), fan (2), chamber for drying (3), gate for recirculation of air (4), and plenum chamber (5). The arrows indicate the airflow. Also, the location of the eight Sensirion S1–S8 (•) and the five thermocouples T1–T5 (■) is indicated.

2.2. Experiments

Two experiments are presented in this paper: one for the dynamic characterization of the air inside the dryer, while the second assesses the energy balance related to solar irradiation and daily timber temperature oscillation.

For the first experiment eight Sensirion sensors (see Fig. 1) were used to characterize the drying air at different positions in the dryer: at solar collector inlet and outlet (S1 and S2), at drying chamber inlet and outlet (S3 and S8) and four locations between the wood planks (from S4 to S7). The sensors were connected by wire to a board with a Peripheral Interface Controller (PIC) as showing Fig. 2. In the PIC the signals were multiplexed and then sent to a computer via RS232. The Sensirion (SHT) is a single chip relative humidity and temperature multi-sensor module that delivers a calibrated digital output. The device includes a capacitive polymer sensing element for relative humidity (RH) and a band gap temperature sensor. Both are seamlessly coupled to a 14 bit analog to digital converter and a serial interface circuit on the same chip. Each SHT is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into the OTP (One Time Programmable) memory. These coefficients are used internally during measurements to calibrate the signals from the sensors. For temperatures significantly different from 25 °C, it is necessary to perform humidity compensation; the temperature coefficient of the RH sensor should be considered according to manufactured expressions. The dryer was full filled with wet wood and data were collected at day time (from 8 to 16 h approximately) along 5 days (480 data per sensor). No data collection was carried out during nights because instrumentation was dismantled every day due to the tropical storm risk in this season. The sample weight loss was measured at the end of each drying working day, using a precision electronic balance ADG10 (Adam Equipment Co. Ltd., Heraeus, Madrid, precision ± 0.1 g).

For the second experiment carried out in July, one sensirion sensor (S3 in Fig. 1) was available as to characterize the drying air, together with a solarimeter (RD009 G.I.S. Iberica, resolution 1 W/m² and precision ± 10 W/m²) for measuring the flux of solar radiation on solar panel and five thermocouples type T

Fig. 2. Complete electronic diagram of the PIC system.

Table 1

Nomenclature in order of appearance in the text.

H	Air absolute humidity	($\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}_{\text{dry air}}^{-1}$)
τ	Air temperature	(K)
V_s	Specific air volume	($\text{m}^3 \text{kg}_{\text{dry air}}^{-1}$)
Q	Flux of ventilator	($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
t	Time	(s)
M	Wood moisture	($\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}_{\text{dry wood}}^{-1}$)
A	Wood drying area	(m^2)
m_{dry}	Wood dry mass	(kg)
q_{vap}	Latent heat of vaporization of wood water	(J kg^{-1})
σ	Convection heat transfer coefficient	($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)
G	Mass flux density of the air	($\text{kg}_{\text{air}} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
s	Cross section for air circulation	(m^2)
L	Half thickness of timber	(m)
D	Effective diffusion coefficient	($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
D_0	Reference diffusion coefficient	($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)
E_a	Activation energy	(J kg^{-1})
R	Universal gas constant	($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
T	Absolute temperature of wood	(K)
E	Energy	(J)
C_p	Heat capacity of wood	($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
C_{p0}	Heat capacity of the oven dry wood	($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
C_p^{water}	Heat capacity of water	($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
A_c	Additional energy in the wood–water bond	($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
q	Energy per mass unit	(J kg^{-1})
h	Enthalpy	(J kg^{-1})
S	Surface of the dryer solar panel	(m^2)
P_{rad}	Radiation density power	(W m^{-2})
ξ	Efficiency	
Subscripts		
w	Wet bulb	
FSP	Fiber saturation point	
e	Equilibrium	
0	Initial	
v	Vapor	
l	Saturated liquid	

(copper-constantan), installed on wood planks, for measuring wood temperatures. Fig. 1 shows the position of the thermocouples, T5 is located on wood with maximum exposure to drying, and sensors distribution corresponding to T1–T4 thermocouples responds to the supervision in regions with obstacles for air circulation. Type T thermocouples are suited for measurements in the -200°C to 350°C range. Since both conductors are non-magnetic, there is no Curie point and thus no abrupt change in characteristics. Type T

thermocouples have a sensitivity of about $43 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. The dryer was full filled with wet wood and data were collected continuously during 72 h (7223 data per thermocouple).

2.3. Psychrometric model

The ASAE D271.2, defined in April 1979 and reviewed in 2005 (ASABE Standards, 2006), was used for computing the psychrometric properties of the air in the dryer. This standard enables the calculation of all psychrometric data of air whenever two independent psychrometric properties of an air–water vapor mixture are known in addition to the atmospheric pressure. A network with eight sensors provides air temperature and relative humidity in eight critical points in the dryer. Absolute humidity H (water mass over dry air mass), wet bulb humidity H_w (water mass over dry air mass), wet bulb temperature (the temperature of a volume of air cooled adiabatically to saturation by evaporation of retained water) τ_w , specific volume V_s (air volume over dry air mass) and specific enthalpy h (enthalpy over dry air mass), characterized the air at each point (see Fig. 3). See nomenclature at Table 1.

2.4. Mass balance model: Smart-1

Two out of the eight Sensirion sensors were considered for this purpose (see Fig. 1): one located at the drying chamber inlet (after mixing with the recirculation air, S3 in Fig. 1), and the other one at the dryer outlet (S8 in Fig. 1). The estimation of the extracted water from the timber along each working day according the absolute humidity increase in the air is the basis of the SMART-1, the simplest smart sensor proposed in this work. The difference of absolute humidity of the air between the outlet H_{out} and the inlet H_{in} is considered to be the extracted water H_{ext} (see Fig. 4). At each time t the mass of extracted water per mass unit of dry air is computed according to

$$H_{\text{ext}} = H_{\text{out}} - H_{\text{in}}. \quad (1)$$

Considering the air density as the inverse of the specific volume, and the flux of ventilator Q (see Table 3), the rate of wood water extracted is computed as

$$\frac{dH_{\text{ext}}}{dt} = -\frac{1}{V_s(t)} Q H_{\text{ext}}(t). \quad (2)$$

The numerical integration of the previous expression based on the finite differences method, allows us to estimate the water loss of

Fig. 3. Psychrometric chart, air temperature τ versus absolute humidity H , for three Sensirion sensors located at solar collector inlet (·) and outlet (*), and dryer outlet (○) along 1 day data recording for Experiment 1. Time interval of 5 min was used between consecutive measurements. Contour plots represent lines of constant relative humidity of the air from 15% to 100%.

Fig. 4. Rate of wood water extracted $-dH_{\text{ext}}/dt$ along one drying day.

the wood for each working day. The accumulated water extracted along the complete drying cycle was compared with the reference measurements, based on gravimetric determination (see Fig. 5).

2.5. Dynamical model: Smart-2

It is possible to define a model based sensor that relays on the diffusion kinetics by means of assessing temperature and relative humidity of the air inside the kiln, in this case measured for the net of eight Sensirion sensors (see Fig. 1). This smart sensor will allow to determine the drying rate and the timber moisture distribution inside the dryer.

The drying rate expressed as $-dM/dt$, where M is the oven dry wood moisture (water mass over oven dry wood mass), allows identifying two different kinetics: one with a constant drying rate, for surface moisture M_s above the fiber saturation point M_{FSP} , and a second one for surface moisture below the M_{FSP} value, characterized for a decreasing drying rate.

For $M_s \geq M_{\text{FSP}}$, it is considered that the transient moisture diffusion through a wood sample (a porous and hygroscopic material) is quick enough to maintain a layer of free water in the wood–air interface. It is possible to define a state where the convection heat transfer and water mass transfer occur, from the wood surface to the hot and dry air, with a constant drying rate. The drying process depends, as external parameters, only on the temperature and the absolute humidity of the drying air. Geankoplis (1983) proposed the heat and mass transfer balances that allow to define the constant drying rate as

$$-\frac{dM}{dt} = \frac{A\sigma(\tau - \tau_w)}{m_{\text{dry}}q_{\text{vap}}}, \quad (3)$$

where the difference between the dry air τ and wet bulb τ_w temperatures acts as the impulsive force of this process, A is the drying area, m_{dry} is the dry mass of the timber, and q_{vap} is the latent heat of vaporization of wood water per mass unit at the temperature τ_w . Magnitude σ is the convection heat transfer coefficient of the air, again defined by Geankoplis (1983) as $\sigma = kG^{\zeta}$, where G is the mass flux density of the air, calculated as $G = Q(1 + H)/sV_s$, being Q the flux of the ventilator, H absolute humidity, s the cross section for drying air circulation, and V_s the specific volume (see coefficients in Table 3).

In a solar dryer, continuous changing surrounding conditions (H and τ of the drying air) in the drying chamber during drying process are observed due to transient variation of weather parameters. The model implementation as a time depending Matlab routine, allows us to recalculate continuously the $-dM/dt$. The numerical integration of $-dM/dt$ based on the finite differences method provides the timber moisture at the eight locations of Sensirion inside the kiln for this first drying period.

Table 2
Description of the proposed mathematical models.

	SMART-1	SMART-2	SMART-3
Type of model	Empirical	Analytical	Analytical
Estimated magnitudes	Wood Moisture (M)	Wood Moisture (M)	Energy efficiency of dryer (ξ) and wood moisture (M)
Measured magnitudes	Temperature (τ) and relative humidity (RH) of the air at dryer inlet and outlet	Temperature (τ) and relative humidity (RH) of local air at m positions inside the kiln	Solar radiation (P_{rad}) and local wood temperature (T) at n positions
Type (and number) of sensors	Sensirion (2)	Sensirion (m)	Solarmeter and thermocouple (n)
Parameters in the model	None	Reference diffusion coefficient (D_0) and activation energy (E_a)	Energy of the wood–water bond (q_{bond})
Input arguments	Air flow inside the dryer (Q) and initial wood moisture (M_0)	Drying wood area (A), dry mass of the timber (m_{dry}), cross section for drying air circulation (s), initial wood moisture (M_0) and half thickness of timber (L)	Daily initial and final wood moisture (M) and dry mass of the timber (m_{dry})
Need of feed-back from other Smart sensors	No	No	Yes: daily initial and final wood moisture from SMART-1 and/or SMART-2

Table 3

Parameters and input arguments for the equations used in the model SMART-2. (†) Values reported for softwoods as the pine one (Smith and Langrish, 2008).

A	7 m^2	M_0	0.6
m_{dry}	60 kg	L	0.0125 m
Q	$0.11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	$^\dagger D_0$	$0.000130 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$
s	0.004 m^2	$^\dagger E_a$	$1776.297 \text{ kJ kg}^{-1}$
k	14.278	R	$0.4615 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
ζ	0.8

Fig. 5. Accumulated wood water (W) extracted along a complete drying cycle estimated with SMART-1 (solid line) and gravimetric experimental measurement (dashed line).

For $M_s \leq M_{\text{FSP}}$, diffusion is the mechanism that govern a decreasing drying rate at this stage (Khater et al., 2004). There are many methods used to calculate drying diffusion, the most common being the solution of Fick's law (Crank, 1979; Luikov, 1968) for an infinite plate (one-dimensional problem), assuming that the moisture transport is primarily by diffusion with no external mass transfer limitation and that shrinkage is negligible

$$\frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \times \exp\left(-\left(\frac{(2n-1)\pi}{2L}\right)^2 Dt\right). \quad (4)$$

Equation above expresses the dimensionless timber moisture, where $M(t)$ and M_0 are the averaged wood moisture content at any time t and $t=0$ respectively. M_e is the equilibrium moisture content at timber surface that can be taken to be negligible because it assumed a dry hot air surrounding that avoid to stay water at timber surface making the values of M_e relatively small compared to $M(t)$ and M_0 . L is the half thickness of timber, and D represents the temperature dependent diffusion coefficient defined by the Arrhenius equation

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right), \quad (5)$$

where D_0 is the reference diffusion coefficient, E_a is the activation energy, R is the universal gas constant (see coefficients in Table 3) and T is the absolute temperature of wood taking into account that for this second drying period it has been consider negligible the difference between T and τ .

The equation that enable the drying rate calculation at low moisture content, taking into account that the diffusivity will depend on time since drying temperature varies according to it, is given by the following expression obtained as the derivative with respect to time of the first term $n=1$ in the expansion of Eq. 4:

Fig. 6. Evolution of oven dry wood moisture M along one drying cycle for $M_s \geq M_{\text{FSP}}$ (thick line) and for $M_s \leq M_{\text{FSP}}$ (thin line), corresponding to one Sensirion sensor (S3 in Experiment 1) located inside the kiln.

$$-\frac{dM}{dt} = \frac{2M_0}{L^2} \left(t \frac{dD}{dt} + D \right) \exp\left(-\left(\frac{\pi}{2L}\right)^2 Dt\right). \quad (6)$$

The SMART-2 model is defined for the combined resolution of Eqs. 3, 5, and 6 that allow to recalculate in real time a changeable drying rate (see Fig. 7) according with the temperature and absolute humidity of the air measured with the Sensirion in different positions inside the kiln. The integrated forms of these equations provides the evolution of wood moisture content for the constant drying rate and the decreasing drying rate kinetics (see Fig. 6).

2.6. Energy balance model: Smart-3

We can define a model based sensor regarding the temperature distribution data of the wood inside the dryer and also the solar radiation values. The temperature data are obtained from a suitable arrangement of thermocouples (a very low cost sensor) placed over the wood and distributed into the dryer (see Fig. 1). This smart sensor will provide us the wood moisture distribution into the dryer and the energy efficiency of the drying process.

Fig. 7. Evolution of drying rate along one drying cycle for two different kinetics: one with a constant drying rate (thick line) and the other one with a decreasing drying rate (thin line). The first intercept point marks the critical point. Data corresponding to one Sensirion sensor (S3 in Experiment 1) located inside the kiln.

Fig. 8. (Top panel) Density of power of the solar radiation P_{rad} along five solar cycles. Time starts at 00:00 on the first day of drying. The density of energy corresponding to every cycle has been indicated in kJ m^{-2} units. (All other panels) Temperature data of the five thermocouples T_1 – T_5 along the same five solar cycles. Note the increasing maximum temperature throughout the drying process.

As shown in Fig. 8, for each daily cycle we have essentially, neglected short time oscillations,¹ and assessed a minimum temperature corresponding to night cooling, and a maximum temperature due to the solar midday. The minimum temperature was approximately the same for every cycle. However, although the solar radiation was similar every day in this experiment, the maximum temperature increases for each cycle.

This behavior can be understood by means of a simple energy balance and considering the thermodynamics of the dry process. We can consider that the solar radiation energy E_{rad} is used to heat the wood (E_{heat}) and evaporate the water (E_{vap}), namely

$$E_{\text{rad}} = E_{\text{heat}} + E_{\text{vap}} + E_{\text{loss}}, \quad (7)$$

where E_{loss} represents the energy losses. Since the wood moisture decreases for successive cycles, and the wood heat capacity also decreases when the wood moisture decreases, the same energy will produce a greater temperature for successive cycles. Moreover, due to the wood moisture decreasing, the amount of evaporated water will be less for successive cycles, then the water vaporization energy will be less too, and a greater amount of energy will be used to heat the wood.

The heat capacity of wood C_p can be expressed as a function of the oven dry wood moisture M and wood temperature T (see Forest Products Laboratory, 1999, Ch. 3)

Table 4

Coefficients for the expressions of the heat capacity of wood used in the model SMART-3, and validity interval (Forest Products Laboratory, 1999, Ch. 3).

C_p^{water}	$4.19 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	b_1	$-6.191 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
a_1	$0.1031 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$	b_2	$0.0236 \text{ kJ kg}^{-1}$
a_2	$0.003867 \text{ kJ kg}^{-1}$	b_3	$-1.33 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
$280 \leq T \leq 420 \text{ (K)}$			

$$C_p = \frac{C_{p0}(T) + M \cdot C_p^{\text{water}}}{1 + M} + A_c(M, T), \quad (8)$$

where $C_{p0}(T)$ is the heat capacity of the oven dry wood, C_p^{water} is the heat capacity of the water, and $A_c(M, T)$ is an additional term that accounts for the additional energy in the wood–water bond. The heat capacity of oven dry wood follows a linear dependence with temperature

$$C_{p0}(T) = a_1 + a_2 T, \quad (9)$$

and the additional term can be expressed as

$$A_c(M, T) = \begin{cases} M(b_1 + b_2 T + b_3 M) & \text{if } M \leq M_{\text{FSP}} \\ 0 & \text{if } M > M_{\text{FSP}} \end{cases}, \quad (10)$$

being $M_{\text{FSP}} \approx 0.3$ the moisture corresponding to the fiber saturation point. If the moisture is below M_{FSP} then all molecules of water are bounded to wood, else there is free water. The numerical values of the coefficients above are represented in Table 4.

Considering the definition of the heat capacity, that is $C_p = (\partial q / \partial T)_p$, we can integrate Eq. 8 between the minimum temperature T_{min} and maximum temperature T_{max} for every daily cycle, obtaining an expression for the energy (per mass unit) $q_{\text{heat}} = E_{\text{heat}}/m_{\text{heat}}$ needed for the heating

$$q_{\text{heat}} = \left[\frac{1}{1 + M} \left(M \cdot C_p^{\text{water}} + a_1 + \frac{a_2}{2} \Sigma T \right) + M \left(b_1 + \frac{b_2}{2} \Sigma T + M b_3 \right) \right] \Delta T, \quad (11)$$

being $\Sigma T = T_{\text{max}} + T_{\text{min}}$ and $\Delta T = T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$. Reorganizing this expression we can obtain a polynomial in the variable moisture

$$AM^3 + BM^2 + CM + D = 0, \quad (12)$$

where $A = b_3 \Delta T$, $B = (b_1 + b_2 \Sigma T / 2 + b_3) \Delta T$, $C = (C_p^{\text{water}} + b_1 + b_2 \Sigma T / 2) \Delta T - q_{\text{heat}}$, and $D = (a_1 + a_2 \Sigma T / 2) \Delta T - q_{\text{heat}}$. The root of this polynomial with physical meaning will give us the wood moisture. Similarly, we can obtain a polynomial in the variable temperature

$$A'T_{\text{max}}^2 + B'T_{\text{max}} + C' = 0, \quad (13)$$

where $A' = [a_2 + b_2(1 + M)]/2$, $B' = a_1 + M[C_p^{\text{water}} + (1 + M) \cdot (b_1 + b_3 M)]$, and $C' = -[(A'T_{\text{min}} + B')T_{\text{min}} + (1 + M)q_{\text{heat}}]$. The positive root of this polynomial will give us the maximum temperature.

Summarizing, in the wood heating process, we have a relationship between the four variables $f(q_{\text{heat}}, M, T_{\text{min}}, T_{\text{max}}) = 0$, so that we can express one of them as a function of the three others. Notice that this relationship has the property $f(q_{\text{heat}}, M, T_{\text{min}}, T_{\text{max}}) = f(-q_{\text{heat}}, M, T_{\text{max}}, T_{\text{min}})$.

On the other hand, we have the energy used to evaporate the water. This energy corresponds to the enthalpy (or latent heat) of vaporization plus, if no fiber saturation, the energy of the wood–water bond. Using the ASHRAE data for the refrigerant R-718 (water/steam) (see ASHRAE, 2005, p. 20.37), we can obtain the enthalpy of vaporization for a temperature T as the difference between the enthalpy of saturated vapor $h_v(T)$ and saturated liquid $h_l(T)$. So that, we can obtain the energy of vaporization (per mass unit) $q_{\text{vap}} = E_{\text{vap}}/m_{\text{vap}}$ as an average of the enthalpy of vaporization in the interval of temperatures corresponding to the minimum and

¹ In order to determine the global minimum and maximum temperatures for each daily cycle, we have made a data smoothing by means of a least squares high degree polynomial fit of the thermocouples data.

Fig. 9. Evolution of the total energy efficiency ξ_{total} (solid line) and vaporization energy efficiency ξ_{vap} (dashed line) of the dryer throughout the drying process.

maximum temperature of each daily cycle, plus a term corresponding to the energy of the wood–water bond

$$q_{\text{vap}} = \frac{1}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \int_{T_{\text{min}}}^{T_{\text{max}}} dT [h_v(T) - h_l(T)] + q_{\text{bond}}, \quad (14)$$

where

Fig. 10. (Top panel) Time evolution of the average of the wood moisture calculated for each thermocouple position (solid line) and experimental wood moisture (dashed line). (All other panels) Time evolution of the wood moisture estimated for each thermocouple position M_1 – M_5 corresponding to the temperature data T_1 – T_5 in Fig. 8.

$$q_{\text{bond}} = \begin{cases} 316.32 \text{ kJ kg}^{-1} & \text{if } M \leq M_{\text{FSP}} \\ 0 & \text{if } M > M_{\text{FSP}} \end{cases} \quad (15)$$

is the wood–water bond energy (see Briggs, 1994, Ch. 9).

Finally, we need the solar radiation data [density of power $P_{\text{rad}}(t)$] provided by a meteorological station (see Fig. 8) to compute the solar energy received by the dryer along each daily cycle. Namely,

$$E_{\text{rad}} = S \int_{t_1}^{t_2} dt P_{\text{rad}}(t), \quad (16)$$

where S is the surface of the dryer solar panel, and (t_1, t_2) is the time interval corresponding to a solar cycle.

The information supplied by this model SMART-3, together with that of models SMART-1 and SMART-2, allows us to calculate the total energy efficiency of the dryer $\xi_{\text{total}} = (E_{\text{heat}} + E_{\text{vap}})/E_{\text{rad}}$, and the vaporization energy efficiency $\xi_{\text{vap}} = E_{\text{vap}}/E_{\text{rad}}$, as can be seen in Fig. 9.

Moreover, it is possible to estimate the moisture distribution into the dryer associated to the position of each thermocouple (see Fig. 10). For this purpose, the averaged minimum and maximum temperatures are used to obtain the value of the heating energy, then this value is used in order to estimate the moisture for every thermocouple.

3. Results and discussion

The implementation of the psychrometric model in a *ad hoc* Matlab routine, allows supervising in real time the drying air conditions in different points. In Fig. 3 environmental conditions can be observed through the Sensirion sensor located at solar collector inlet. Sensirion sensor located at collector outlet defines the drying air as a hot (varying from 50° to 75° C) and dry ($H \approx 0.015$) air mass. After drying process air experiments a decrease in the temperature and an increase in the absolute humidity, reaching in certain moments the saturation conditions.

Three SMART model based sensors are proposed in this work (see Table 2 and Fig. 11). The simplest smart sensor, SMART-1, using only two Sensirion sensors, allows to estimate the accumulated water extracted from wood along a complete drying cycle with a correla-

Fig. 11. Flowchart of the equations implemented for SMART-1, SMART-2 and SMART-3 models.

Table 5

Results of SMART-2 model implementation on sensors, sensirion by sensirion, in Experiment 1 (October) and Experiment 2 (July). ($\dagger$) $\bar{D}$: Mean diffusivity for the full period corresponding to each experiment; t_{ct} : time for the end of the constant drying rate period; t_{dc} : time for the beginning of the decreasing drying rate period.

	S3(EXP.2)	S3(EXP.1)	S4(EXP.1)	S5(EXP.1)	S6(EXP.1)	S7(EXP.1)
$\bar{D} \times 10^{-10}$	5.14 ± 1.00	5.12 ± 1.02	5.00 ± 1.01	4.60 ± 0.88	5.12 ± 1.04	5.21 ± 1.07
$t(h)$ for Fourier > 0.2	16.89	16.95	17.36	18.87	16.95	16.66
M_0	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
$t_{ct}(h)$	18	30	52.5	–	30.5	30
M at t_{ct}	0.38	0.48	0.4	–	0.48	0.49
$t_{dc}(h)$	32	53.5	75	–	54.4	51
M at t_{dc}	0.28	0.33	0.28	–	0.32	0.31

tion coefficient of 0.97 (a root mean squared error of 1.89 kg and mean bias error (MBE) of 1.52 kg) compared to the gravimetric experimental measurement (see Fig. 5). The MBE obtained indicates an over-stimulation of the extracted water by SMART-1. That could be explained considering that higher relative humidity during the night (due to lower temperatures and the disconnection of the fan at evening-night time for experiment 2) could increase the moisture content of the wood. Such increases (or sample weight gain) were not taken into account in the gravimetrically measurements, that were only carried out once at the end of each drying day.

Table 5 shows as the implementation of SMART-2 model allows to determine the diffusivity (see Eq. 5), being the average value of D for the drying cycle studied equal to $5.14 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ in July and equal to $5.12 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ in October for the same sensor S3, values in the same order of magnitude as are shown by (Janjai et al., 2010) for soft woods. The Fick's law solution described in the literature (Crank, 1979; Luikov, 1968) establishes that for a Fourier number $Dt/L^2 > 0.2$, the infinite series solution in Eq. 4 can be approximated by the first term $n = 1$ of the series (Tripathy and Kumar, 2009). So in this study the diffusion process which dominates the drying process of softwoods at low moisture contents will be correctly estimated for drying times higher than 17 h (see Table 5). In the SMART-2 model the point where the two drying kinetics (constant and decreasing drying rates) coincide, it is considered as the critical point which establishes the end of the constant drying rate period and the beginning of the decreasing drying rate one (Fito et al., 2001). Fig. 7 shows that for the drying cycle studied this occurs after an initial period of constant drying rate of 18 h for S3 in Experiment 2. In Fig. 6 averaged wood M value of 0.38 corresponds at this stage with the instant where $M_s = M_{FSP}$. The drying period from $M_s = M_{FSP}$ to reach the M_{FSP} at wood center is considered as a transition drying period. This period, from 18 to 32 drying hours in this work, is characterized by a similar behaviour of the constant and decreasing drying rates estimated (see Fig. 7). Literature establishes a reference value for M_{FSP} of 0.3 (Fernández-Golfín and Conde, 2007) and Table 5 shows that the average M wood content at this stage ranged from 0.28 to 0.33. The end of this transition period marks the clear beginning of the diffusion phenomenon. The higher initial moisture content in wood planks of Experiment 1 compared to that in Experiment 2 (0.8 vs 0.6) determines a longer initial constant drying period (30 vs 18 h for the same sensor position (S3)). The multidistributed supervision of the dryer in Experiment 1 shows up the lack of uniformity in drying conditions supported by the wood planks located in the inner or center of the drying chamber (S5 position (see Fig. 1)) versus the wood planks externally situated (corresponding to S3 and S7 sensor positions). The highest diffusivity values in the second case (see Table 5) make progress the decreasing drying rate period, while in the center mainly the highest air humidity registered by S5 determines that the constant drying rate kinetics predominate in this area of the drying chamber. The identification of these drying periods not only allows the correct estimation of M and $-dM/dt$

as a function of the drying kinetics but also will allow to program specific dryer regulations for each dryer area, period and weather conditions.

Moreover, as we can see in Fig. 9, the model SMART-3 indicates a decreasing efficiency along the drying process from 0.9 to 0.2. This fact is due to the well known effect of efficiency fall as the moisture decreases (Fernández-Golfín and Conde, 2007). However, we can observe a recuperation of the efficiency between the third and fourth drying cycles (72–96 h). This recovery seems to correspond to the inhomogeneous drying of the wood (see Fig. 10). Notice that the moisture corresponding to the position of the thermocouples T4 and T5 increases between the first and second drying cycles (24–48 h), and the moisture also increases slightly at the position of the thermocouple T3 between the second and third cycles (48–72 h). The location of thermocouples into the dryer is shown in Fig. 1. Further experiments are required to verify this correspondence and to design a control strategy (by means of the fan velocity and the recirculation gate) in order to improve the energy efficiency. Undoubtedly, a more homogeneous drying will improve the energy efficiency and also the quality of the wood.

4. Conclusions

The operation and decision making in most dryers systems is guided by highly empiric recipes and rules which are usually too rigid to adapt the operation to sudden changes in the process conditions, specially important in solar dryers. The implementation of these three proposed models on embedded electronics and wireless sensor networks will turn into smart sensors, where data corresponding to the temperature and relative humidity of the air inside the kiln collected by Sensirion sensors and wood temperature data from thermocouples, allow to estimate the most important and complex parameters in thermal drying as drying rate and wood moisture in real time.

Acknowledgments

The funding of this work has been covered by Comunidad de Madrid through TAGRALIA-CM research group, Technical University of Madrid, by the AECID program through A/019197/08 and A/9586/07 projects and by the MICINN with the project Smart-QC (GL2008-05267-C03-03).

References

- ASABE Standards, 2006. Psychrometric Data ASAE D271.1 APR1979, R2005, St. Joseph, MI.
- ASHRAE, 2005. Handbook-Fundamentals (SI), American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- Briggs, D., 1994. Forest Products Measurements and Conversion Factors, University of Washington, Institute of Forest Resources, Seattle.
- Camilli, A., Cugnasca, C.E., Saraiva, A.M., Hirakawa, A.R., Corrêa, P.L.P., 2007. From wireless sensors to field mapping: anatomy of an application for precision agriculture. Computers and Electronics in Agriculture 58, 25–36.

- Chen, H., Hernandez, C.E., Huang, T., 2005. A study of the drying effect on lemon slices using a closed-type solar dryer. *Solar Energy* 78, 97–103.
- Corsi, C., 2007. Smart sensors. *Infrared Physics and Technology* 49, 192–197.
- Crank, J., 1979. *The Mathematics of Diffusion*. Clarendon Press.
- Cunha, C.R., Peres, E., Morais, R., Oliveira, A.A., Matos, S.G., Fernandes, M.A., Ferreira, P.J.S.G., Reis, M.J.C.S., 2010. The use of mobile devices with multi-tag technologies for an overall contextualized vineyard management. *Computers and Electronics in Agriculture* 73, 154–164.
- Fargali, H.M., Nafeh, A.A., Fahmy, F.H., Hassan, M.A., 2008. Medicinal herb drying using a photovoltaic array and a solar thermal system. *Solar Energy* 82, 1154–1160.
- Fernández-Golfín, J.I., Conde, M., 2007. *Manual técnico de secado de maderas*, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho (AITIM), Madrid.
- Fito, P., Andrés, A.M., Barat, J.M., Albors, A.M., 2001. *Introducción al secado de alimentos por aire caliente, 2001-1092*, Departamento de Tecnología de los Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Forest Products Laboratory, 1999. *Wood handbook, FPL-GTR-113*, US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison.
- Geankoplis, C.J., 1983. *Drying of Process Materials Transport Processes and Unit Operations*. Allyn and Bacon, Boston.
- Haque, M.N., Langrish, T.A.G., 2005. Assessment of the actual performance of an industrial solar kiln for drying timber. *Drying Technology* 23 (7), 1541–1553.
- Janjai, S., Intawee, P., Kaewkiew, J., 2010. A solar timber drying system: experimental performance and system modeling. *International Energy Journal* 11, 131–144.
- Khater, H.A., Helwa, N.H., Enayet, M.M., Hashish, M.I., 2004. Optimization of solar kiln for drying wood. *Drying Technology* 22 (4), 677–701.
- Kitchen, N.R., 2008. Emerging technologies for real-time and integrated agriculture decisions. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 1–3.
- Luikov, A.V., 1968. *Analytical Heat Diffusion Theory*. University of Illinois, Department of Energy Engineering, Illinois.
- Luna, D., Nadeau, J.P., Jannot, Y., 2009. Solar timber kilns: state of the art and foreseeable developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 1446–1455.
- Matese, A., Di Gennaro, S.F., Zaldei, A., Genesio, L., Vaccari, F.P., 2009. A wireless sensor network for precision viticulture: the NAV system. *Computers and Electronics in Agriculture* 69, 51–58.
- Nadimi, E.S., Søgaard, H.T., Bak, T., Oudshoorn, F.W., 2008. ZigBee-based wireless sensor networks for monitoring animal presence and pasture time in a strip of new grass. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 79–87.
- Reuss, M., Benkert, S., Aeberhard, A., Martina, P., Raush, G., Rentzell, B.V., Sogari, N., 1997. Modelling and experimental investigation of a pilot plant for solar wood drying. *Solar Energy* 59 (4–6), 259–270.
- Smith, S.A., Langrish, A.G., 2008. Multicomponent solid modeling of continuous and intermittent drying of *Pinus radiata* sapwood below the fiber saturation point. *Drying Technology* 26, 844–854.
- Son, J.D., Niu, G., Yang, B.S., Hwang, D.H., Kang, D.S., 2009. Development of smart sensors system for machine fault diagnosis. *Expert Systems with Applications* 36 (9), 11981–11991.
- Sorensen, C.G., Pesonen, L., Fountas, S., Suomi, P., Bochtis, D., Bildsøe, P., Pedersen, S.M., 2010. A user-centric approach for information modelling in arable farming. *Computers and Electronics in Agriculture* 73, 44–55.
- Spencer, B.F., Ruiz-Sandoval, M.E., Kurata, N., 2004. Smart sensing technology: opportunities and challenges. *Journal of Structural Control and Health Monitoring* 11 (4), 349–368.
- Tøgersen, F.A., Skjøth, F., Munksgaard, L., Højsgaard, S., 2010. Wireless indoor tracking network based on Kalman filters with an application to monitoring dairy cows. *Computers and Electronics in Agriculture* 72, 119–126.
- Tripathy, P.P., Kumar, S., 2009. A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: application to solar drying. *Journal of Food Engineering* 90, 212–218.
- Umstätter, C., Waterhouse, A., Holland, J.P., 2008. An automated sensor-based method of simple behavioural classification of sheep in extensive systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 64, 19–26.
- Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C., Bednarz, C., 2008. A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 44–50.
- Wharton, P.S., Kirk, W.W., Baker, K.M., Duynslager, L., 2008. A web-based interactive system for risk management of potato late blight in Michigan. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 136–148.
- Zhu, X., Li, D., He, D., Wang, J., Ma, D., Li, F., 2010. A remote wireless system for water quality online monitoring in intensive fish culture. *Computers and Electronics in Agriculture* 71, S3–S9.

Anexo 5: Assessing the dynamic behavior of WSN motes and RFID semi-passive tags for temperature monitoring

Assessing the dynamic behavior of WSN motes and RFID semi-passive tags for temperature monitoring

Ricardo Badia-Melis^{a,*}, Javier Garcia-Hierro^b, Luis Ruiz-Garcia^c, Tatiana Jiménez-Ariza^d, José Ignacio Robla Villalba^b, Pilar Barreiro^d

^a Department of Electrical Engineering, College of Engineering, ENB118, University of South Florida, 4202 E. Flower Ave., Tampa, FL 33620, USA

^b Sensors Technology Laboratory, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CENIM-CSIC), Avenida Gregorio del Amo, 8, 28040 Madrid, Spain

^c Departamento de Ingeniería Rural, ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid, Spain

^d Laboratorio de Propiedades Físicas y Tecnologías Avanzadas en Agroalimentación, Universidad Politécnica de Madrid, CEI-Campus Moncloa. ETSI Agrónomos, Edificio Motores, Avda. Complutense s/n, 28040 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 August 2013

Received in revised form 14 January 2014

Accepted 20 January 2014

Keywords:

Cold chain

Monitoring

Logistics

Temperature sensors

RFID

Wireless sensors

ABSTRACT

Wireless Sensor Networks (WSN) and Radio Frequency Identification (RFID) are two wireless technologies that are being used for cold chain monitoring and tracking. Several applications in this field have been reported in the last few years. However, there are no studies about the the dynamic behavior of this hardware and how this affects the measurements. Therefore the purpose of this study is to evaluate the dynamic behavior of the sensors. A series of trials were designed and performed, covering temperature steps between cold chamber (5 °C), room temperature (23 °C) and heated environment (35 °C). Three WSN motes, with different sensor configurations, and four RFID tags (with and without housing), were compared. In order to assess the dynamic behavior two alternative methods have been applied for adjusting experimental data to a first order dynamic response that allows extracting the time response (τ) and corresponding determination coefficient (r^2). The shortest response time (10.4 s) is found for one of the RFID semi-passive tags. Its encapsulated version provides a significantly higher response (60.0 s), both times are obtained with the same method. The longest τ corresponds to one of the sensors embedded in a WSN mote (308.2 s). We found that the dynamic response of temperature sensors within wireless and RFID nodes is dramatically influenced by the way they are housed (to protect them from the environment); its characterization is basically to allow monitoring of high rate temperature changes and to certify the cold chain.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

WSN and RFID are changing and entering a new phase in the agro-food sector. A notorious advantage of wireless transmission is a significant reduction and simplification in wiring and harness. Many applications of wireless systems are being developed, such as: traceability by means of RFID, food packaging, history checking and contamination, or inventory control and food inspection (Wang et al., 2006; Ruiz-Garcia and Lunadei, 2011).

Relevant environments for the application of wireless systems include monitoring of fruit and vegetable containers and cold-storage facilities, or monitoring quality and senescence of specialty crops during transport (Ruiz-Garcia et al., 2009). The economic impact of product losses stays around 10% in Europe (6–7% in retailers)

and 15% in USA (Pang et al., 2012), while reaching 30% in developing countries (mostly to the lack of temperature control). In either case, with transport distances above several thousand kilometers (Jedermann et al., 2011).

Food chains have become highly distributed, heterogeneous, cooperative, and globalized with extremely diverse requirements, and thus declares the need for convergence of all the necessary technical requirements (with dedicated analysis for wireless technologies), corresponding operation models, networking protocols, hardware (WSN vs RFID), and software. According to the authors (Pang et al., 2012), a scenario is an abstraction of a class of deployment environments, and so a particular scenario may appear multiple times at different positions among the entire sequence link, from produce and manufacturers to sellers or consumers (Pang et al., 2012).

These technologies are being used for cold chain monitoring and tracking. WSN motes have been validated for their use under cooling conditions in warehouses, studying the behavior of the

* Corresponding author. Tel.: +1 8636609984.

E-mail address: ricardobadia@live.com (R. Badia-Melis).

motes in fruit chambers and then tested in refrigerated trucks during international transportation (Ruiz-Garcia et al., 2008, 2010). The fresh fish logistic chain has been also monitored using wireless sensing technologies (Hayes et al., 2005; Abad et al., 2009). RFID semi-passive tags were validated for monitoring cold chain in refrigerated trucks (Jedermann et al., 2009) and also for temperature tracking in a commercial shipment of pineapples from Costa Rica to the USA (Amador et al., 2009). Jedermann et al., 2011 focus mainly in the use of WSN in transport, and more precisely in the high attenuation of signal in packed food which has turned out to be the major problem for monitoring packed food transports. According to the authors, about 20% of the sensor data are lost because there is no physical route possible between a sensor node and the base station, while additional sensor data are lost because the protocols are not able to detect the correct routing (4% of the sensor data). Another conclusion of this study is the fact that electronics has to be protected against high humidity, condensed water, and mechanical stress during transshipments, while automated localization of the sensors inside the container could be very useful, because it cannot be guaranteed that the workers in the packing station may report the sensor positions properly (Jedermann et al., 2011). The sensors need protection against damage but at the same time this protection affects the way they respond to changes in the environment.

In the cold chain, perishable food products must be at controlled temperature during all stages. Sometimes, during transitions (like airport runaways, container docks, etc.) or incorrect handling (like unloading in non-refrigerated ambience) the products can change very quickly from one cool ambience to another that is not refrigerated. In a hot country, that could mean a difference of tens of degrees in just few seconds (Bogatay et al., 2005). Up to consumption, potential problems may occur in any phase: loading, unloading, handling and storage. Products can exceed the upper or lower limits with significant deviations from optimal conditions. Delays during loading and unloading are very common; products are exposed to not proper temperatures, reducing the shelf life or producing chilling injury in the products (Likar and Jevšnik, 2006; Montanari, 2008).

For example, ice cream should be maintained around -20°C , but in a country like Spain outside temperatures can raise up to 40°C . That means 60°C of difference between inside and outside temperature. Thus inappropriate unloading of the product can happen very quickly. However, it takes longer time to the sensor to realize actual temperature, and the product can be spoiled by the time it gets that temperature. How long will the sensor take to measure the real temperature? Will it be fast enough? Are WSN and RFID ready for measuring the cold traceability of the products? Are they able to capture the real temperatures during loading and unloading?

In many occasions sensor nodes require a specific housing to protect the electronics from harsh environmental conditions, since this kind of equipment was not originally designed for those conditions, i.e. meteorological data acquisition system (Lee et al., 2010), however this effort always shows as contra wise effect, the lack of sensitivity of sensors.

Up to date there is no scientific information available about the dynamic behavior of WSN and RFID as related to sensor housing or mounting in the base electronics. The aim of this study is therefore to assess the dynamic behavior of the sensors because it is crucial for a proper characterization of history reconstruction.

2. Material and methods

A series of trials were designed and performed using WSN and RFID devices. The experimental work covers three different

situations: cooling (5°C), ambient temperature (23°C) and heated environment (stove at 35°C).

These tests involve two types of wireless ZigBee motes: IRIS and NLAZA. In the case of NLAZA one of the motes included a temperature sensor Sensirion embedded in the motherboard while the other mote has the sensor at the end of a cable (aerial mount, see Fig. 1). Besides, the IRIS module is provided, in this study, with a Sensirion and Intersema sensors; finally, four different RFID tags have also been used: two Turbo Tag 702-B (one with the default cover from the factory and the other one without that cover) and two Turbo Tag 700 (with the cover and without the cover as well); covers will also be referred as sensor housing further in the text.

2.1. WSN motes

The first type of motes have a microcontroller board (IRIS) together with an independent transducer board (MTS400) attached by means of a 52 pin connector. Its processor and radio platform is a XM2110CA. The RF power was configured to 3 dBm. Power was supplied by two AA alkaline batteries.

The MTS400 board hosts a variety of sensors: temperature and relative humidity (Sensirion SHT), barometric pressure and temperature (Intersema MS5534B), light intensity (TAOS TSL2550D) and a two-axis accelerometer (ADXL202JE). A laptop computer is used as the receiver, and communicates with the nodes through a Mica Z mounted on the MIB520 ZigBee/USB gateway board; this device also provides a USB programming interface. In this study the data from Sensirion and Intersema are used.

The Sensirion SHT is a single-chip relative humidity and temperature multi-sensor module that delivers a calibrated digital output. Each SHT is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into the OTP (One Time Programmable) memory. These coefficients are used internally during measurements to calibrate the signals from the sensors.

For temperatures significantly different from 25°C , and according to the manufacturer recommendation, compensation is performed based on humidity and temperature.

The Intersema MS5534B is a SMD-hybrid device including a piezoresistive pressure sensor and an ADC-Interface IC data encoding that makes use of a 16 bit data word from a pressure and T (-40 to $125^{\circ}\text{C} \pm 2.0^{\circ}\text{C}$) dependent voltage. Additionally the module contains six readable coefficients for a highly accurate software calibration of the sensor.

The NLAZA motes include a sensor Sensirion SHT which measures temperature in the range -40°C to 125°C with a precision of $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ and from 0% to 100% ($\pm 2.0\%$) relative humidity. The mote communicates with a wireless hub by the ZigBee protocol. Data

Fig. 1. NLAZA module with the temperature sensor mounted at the end of a cable.

can be stored in a USB removable memory or downloaded in real time via Ethernet to a computer; each mote requiring 3 AA batteries.

As we can see in Fig. 1, the modified mote includes: (1) an air mounted temperature and relative humidity sensor Sensirion (SHT 75 connected with pins), (2) an on/off switch, (3) a transmitter, receptor and (4) an electrical connector. This mote represents an improved version of the NLAZA motes. The first prototype had the Sensirion (SHT 15) sensor embedded into the motherboard,

2.2. RFID semi-passive tags

RFID tags can be active, passive, or semi-passive. Passive and semi-passive RFID send their data by reflection or modulation of the electromagnetic field that was emitted by the Reader. The battery of semi-passive RFID is only used to power the sensor and recording logic (Ruiz-Garcia and Lunadei, 2011). In this study we used semi-passive tags.

The two types of tags used in this experiment are the Turbo Tag T700 (−30 °C a +55 °C) and the T702-B (−70 °C to +80 °C), both have temperature sensors KSW Microtec, with accuracy ±0.5 °C and can record until 700 measurements. Both tags operate in the band of 13.56 MHz (ISO 15693-3 compliant) and have the size of a credit card.

As one can see in Fig. 2, both tags have an antenna (1) surrounding the device, as well as a temperature sensor (2) and the battery (3).

2.3. Methods

In order to study the influence of sensor housing and covers, such parts are removed in both types of RFID tags (T700 and T702-B) and therefore a Turbo Tag of each type was opened, and their sensors exposed directly to air, as a mean for demonstrating the effect of thermal inertia of the covers (see Fig. 2).

We started the test by placing three IRIS motes: one in the stove (at 35 °C), another one in the fridge (with a temperature of 5 °C) and the last at room temperature, as a reference for static temperatures. On the other hand, the evaluated modules with regard to their dynamic behavior were first positioned in the fridge with data gathered every 4 s.

After 20 min all modules were stabilized at fridge temperature, and so the WSN motes and the Turbo Tags were transferred to the stove where they remained 20 min inside the stove, time enough to observe temperature stabilization; note that data from wireless sensors (reference and evaluated ones) could be monitored directly from the computer in real time.

Afterwards, all modules were transported back to the refrigerator where they remained 30 min, again until stabilization was

complete. Finally, modules were again transferred to the stove, and the process was repeated.

2.4. Data analysis

Dedicated Matlab routines have been programed as to achieve logarithmic and non-linear fit of the first order response of the sensors, where the time response of the sensors is characterized based on the equation that represents the behavior of a first order system (Pallás Areny, 2004), thus there is an element that absorbs and release energy: the sensor house. Therefore, the relationship between the input $x(t)$ and the output $y(t)$ is made by a differential equation as follows (Eq. (1))

$$a1 * \frac{dy(t)}{dt} + a0 * y(t) = x(t) \quad (1)$$

The corresponding transfer function is shown in Eq. (2).

$$\frac{Y(s)}{K(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2)$$

where $k = 1/a_0$ is called static sensitivity, and $\tau = a_1/a_0$ is known as the system time constant. The natural frequency ω_c is given by $1/\tau$. The system is characterized therefore by two parameters k for the static response and ω_c or τ for the dynamic response.

The response of a first order system when using a step-shaped temperature decrease also follows an exponential downward trend (Eq. (3))

$$y = k * x * e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad (3)$$

while the rise trajectory under step-shape excitation is expressed by Eq. (4).

$$y = k * x * \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)}\right) \quad (4)$$

Considering that in our test we shift from a base temperature (5 °C) to an upper bound limit (35 °C) and back to the initial temperature (5 °C), previous mathematical expressions are adapted to Eqs. (5) and (6).

$$y = a * \left(1 - e^{\left(\frac{-x}{b}\right)}\right) + c \quad (5)$$

$$y = a * \left(e^{\left(\frac{-x}{b}\right)}\right) + c \quad (6)$$

In the equations above “a” is the temperature step (30 °C temperature shift), “x” the time interval, “b” standing for τ which is the sensor response time (s), and “c” being the initial annealing temperature for the upward trajectory and the final stabilization in the downward trend.

2.5. Curve fitting

As mentioned, two alternative procedures have been used for adjusting experimental data to the above mentioned first order dynamic response: logarithmic transform and non-linear least square fit. The former is the traditional procedure which makes use of a logarithmic transformation of the experimental data and further linear fit, while the latter makes use of the Matlab curve fit libraries where the fit model is defined in algebraic terms followed by setting the optimization constraints such as start point, upper and lower boundaries of the coefficients.

On the other hand, the non-linear least square fit makes use of a maximum number of model evaluations (600), and 400 fit iterations, while the termination tolerance on the function (model) value is set by default to 10^{-6} .

Fig. 2. Turbo Tags T-700 and T702-B with and without coating.

Table 1

Response times as derived from TLA and NLF dynamic responses.

	Response time with TLA (s)				Response time with NLF (s)			
	Rise		Recover		Rise		Recover	
	Mean	Deviation	Mean	Deviation	Mean	Deviation	Mean	Deviation
T 700 without coating	10.4	1.9	17.5	1.2	12.4	2.8	54.7	4.1
T 700 with coating	60.0	7.5	38.6	4.6	83.5	7.8	86.2	3.5
T 702-B without coating	22.1	3.9	13.8	2.8	36.1	3.6	27.4	3.1
T 702-B with coating	65.1	3.7	55.9	6.7	104.6	5.0	122.2	2.2
Nlaza cable	14.2	1.7	12.7	2.0	22.0	0.8	32.0	10.3
Nlaza Motherboard	55.9	12.2	50.7	4.2	70.3	3.8	103.2	1.4
Iris Sensirion	83.4	8.0	171.1	24.5	308.2	16.1	254.2	18.7
Iris Intersema	93.9	12.0	212.4	34.1	301.4	34.9	294.8	19.6

Fig. 3. Goodness of fit (r^2) as derived from traditional logarithmic and non-linear fit of first order dynamic response. **Fig. 4.** Comparison between rise response and time to recover. **Fig. 5.** Detail of temperature rise from the fridge to the stove.

3. Results

A qualitative comparison is made on the reaction rate of the temperature sensors (Table 1), when shifting between 5 and 35 °C, with the result of a faster response corresponding to T700 (without cover), followed by the aerial-mounted Nlaza module, and the T702-B card without cover, this fact highlights the influence of coating and sensor montage on the motherboards regard to the reaction rates. Besides, encapsulated RFID tags show to be faster than the Nlaza module where the sensor is soldered onto the motherboard, while the lowest speed corresponds to the Intersema sensor in IRIS Crossbow. First order response parameters are provided in Table 1.

The results obtained with both procedures are evaluated in terms of determination coefficient (r^2), as well as related to the standard error of prediction for the time response parameter (τ , s). Also a computation of absolute bias is regarded as an additional evaluation parameter.

Fig. 6. Comparison of average reaction rate speed of the different sensors.

Table 2

Analysis of Variance conducted as to assess the effect of sensor type, housing and path (rise/recover) on the dynamic time response when using non-linear fit (NLF).

Analysis of Variance					
Source	Sum sq.	d.f.	Mean sq.	F	Prob > F
X1 (sensor)	1721.9	2	861	8.55	0.0014
X2 (rise/rec)	2352.3	1	2352.3	23.37	0.0001
X3 (housing)	37156.4	1	37156.4	369.13	0
X1 * X2	614.5	2	307.3	3.05	0.0644
X1 * X3	1470.3	2	735.1	7.3	0.003
X2 * X3	23.5	1	23.5	0.23	0.6333
Error	2617.2	26	100.7		
Total	45956.1	35			

Fig. 3 shows the goodness of fit (r^2) for the temperature rise and recover according to logarithmic and non-linear fit. A major conclusion is that the determination coefficient (r^2) always reaches better results for the non-linear procedure compared to the traditional logarithmic method. The validity of the adjustments is confirmed by the values of r^2 , all very close to one.

Beside, Table 1 provides the time response (τ , s) for each sensor and fit procedure (NLF and TLA), with a quicker reaction rate (lower response time, s) for the tags without coating as well as for the Nlaza modified mote (air mounted sensor), which provides the largest slope. Third in the ranking comes the coated T700 and T702-B tags; then the Sensirion in the IRIS module, the NLAZA and finally the Intersema with the lowest slope, that is to say largest response time. The τ obtained shows that response times are lower for un-housed T700 tag than for the encapsulated ($\tau = 12.4$ s and 10.4 s for NLF and TLA respectively), while the encapsulated version provides $\tau = 83.5$ s and 60 s for NLF and TLA respectively. The next one is the Nlaza module with aerial-mounted sensor with $\tau = 22.0$ s and 14.2 s for NLF and TLA respectively, and this is followed by the motherboard version (70.3 s NFL and 55.9 s TLA).

Such response times (required to reach 63% of static response) contrast with the very high τ which corresponds to the Intersema with the $\tau = 301.4$ s and 93.9 s for NLF and TLA respectively, followed by the Sensirion (308.2 s for NLF).

Fig. 4 compares both the time to rise and recover in modules with and without housing, or aerial mount for data fitted with NLF and TLA. The recovering time is usually larger than the rise time, with an exponential behavior.

As has been pointed previously in the document, the first experiment was carried out with the motes IRIS (containing the Intersema and Sensirion sensors) and four Turbo Tags. The collected measures of these modules are shown in Fig. 5 where is shown the moment of the transition from the fridge to the stove.

Fig. 5 shows the temperature rise in the transition from the fridge to the stove; please note the reaction of the devices when the change between the two environments happens. The two vertical black stripes are showing the time of the transition. It can be seen that actual temperature in the refrigerator is not the same for all devices, with differences of up to two and a half degrees. It can also be appreciated that the T700 tags experience an earlier response than the rest of devices regarding to the stimulus of temperature rise due to door opening of the refrigerator; the rest do not react until they are removed from the refrigerator. The horizontal lines at the top, at the middle and at the bottom of the graphic represent the three motes positioned in the fridge, the ambient and the stove, with their two sensors Sensirion and Intersema as a reference temperature for the experiment.

Fig. 6 compares the response time (s) as derived from non-linear fit (NLF) and traditional logarithmic approach (TLA). Results are congruent in most cases except for Iris Sensirion and Iris Intersema where NLF leads to much slower dynamic response compared to TLA. Such cases also correspond to lower coefficient of determination for the TLA (r^2 around 0.9) compared to proposed NLF (r^2 around 0.96, see Fig. 3), thus making it more reliable the values for the latter compared to the former. Bold black figures correspond to rise and white correspond to recover.

Finally, Analysis of Variance is conducted as to assess the effect of sensor type, housing and path (rise/recover) on the dynamic time response (Table 2). Since the NLF case shows better r^2 , the detailed study of the variance of TLA will be left out of this analysis, the highest effect is due to housing (369), followed by rise and recovers (23) and finally type of sensor (8.55).

4. Discussion

The authors of this work had verified in a previous work (Ruiz-García et al., 2008) the need for addressing the correct performance of WSN sensors due to battery fluctuations, which can be automated by means of time derivative analysis (Ruiz-García et al., 2008), while Jedermann et al. in 2009, studied the assessment of the required precision and resolution of temperature sensors in RFID devices, followed in 2011 by the analysis of attenuation of signal due to the high water content of agricultural products which makes it difficult to face transport monitoring compared to other storage facilities (Jedermann et al., 2011).

Also in the referred study of Ruiz-García et al. in 2008, a detailed quantification of the number of packet loss was set, and the uneven distribution in time was related to the activation and disconnection of the cold unit which appeared to generate a strong electromagnetic interference. In this early work the strong effect

of sensor mounting was found when comparing aerial mount with sensors fixed to the electronics.

This work therefore comes back to the issue by making a full analysis of the effect of sensor housing and montage. The results clearly point that we may expect even one order of magnitude difference from the quickest to the slowest dynamic response (approximately from 20 s to 200 s): aerial mount compared to motherboard soldering, respectively. In all cases a rather similar rise/recover response is found except for the quickest dynamic response (aerial mount), where we can obtain double time to recover in comparison with the time to rise.

The first question that arises is to decide whether these values are good enough for tracing cold chain of perishable products as demanded by Tanner and Amos (2003). Therefore, end-users need to consider the most restrictive situation (around 300 s of dynamic response, 5 min). Finally, the feasibility of capturing the real temperatures could be faced based on the proposed dynamic model.

As a conclusion this work provides a relevant insight into the considerations that need to be taken into account when trying to ensure the cold chain maintenance, which although being important for perishable food, may be of utmost relevance in other technical domains such as pharmaceutical industry and organ transplantation activities.

5. Conclusions

The dynamic response of temperature sensors within wireless and RFID nodes is dramatically influenced by the way they are housed (to protect them from the environment). Its characterization is basic to allow monitoring temperature changes at high rate as well as to certify the cold chain.

In this study the fastest response time remains around 11 s which indicates those temperature cycles of higher frequency cannot be addressed with available wireless technologies. On the other end, the slowest response (308.2 s) corresponds to surface-mounted sensors, which refers the need of a dedicated design.

The first thing that one can think is that 308.2 s are a little bit more than 5 min and there are many perishable products at that range do not have any danger to be damaged. The question is whether those 5 min are the onset of a large temperature change, which could lead to a non-reversible loss of product, then with faster devices there would be the opportunity of a faster reaction of the transport industry.

The response times need to be evaluated always under the same device configuration, with the nodes and tags by default from the factory or only modified because the covers are removed, because it is a feature characteristic of each device. Perhaps the manufacturer should indicate it as well as accuracy of the sensor or the number of samples that the nodes are able to record. Maybe for a further experiments would be interesting test the devices in different environments, such as temperature changes out of the temperature ranges of the sensors – extremely cold to less cold and vice versa – or with different levels of humidity, to check if the same device configurations has the same reaction rate. In addition, the effect of sensor location is another dynamic effect which is not addressed in this study, but which could be addressed with the proposed methodology, since in a isolated position inside a pallet the time response would be even larger than considered at current

stage, please note that those reaction rates would not be characteristic of the devices itself, it would be the device plus the isolation, hence these experiments would need a detailed study of the different isolations surrounding the nodes, for instance a pallet of medicines or food. Moreover, when the product would be extremely sensitive to high temperatures, the reaction rate would not be good enough, thus limiting the adaptation capabilities of the devices.

Acknowledgements

The funding of this work has been covered by the MICINN with the project “Sensórica inteligente para el Control de la Calidad en línea de procesos alimentarios Smart-QC” (ALG2008-05267-C03-03), by MITYC, plan Avanza with the project “Plataforma de Control Logístico Avanzado para el seguimiento de la cadena de frío de productos Sanitarios y Agroalimentarios CLARISA” (TSI-020100-2009-851), and by the European Commission with the project InsideFood “Integrated, sensing and imaging devices for designing, monitoring and controlling microstructure of foods” (FP7-KBBE-2B-226783).

References

- Abad, E., Palacio, F., Nuin, M., González de Zárate, A., Juarros, A., Gómez, J.M., Marco, S., 2009. RFID smart tag for traceability and cold chain monitoring of foods: demonstration in an intercontinental fresh fish logistic chain. *J. Food Eng.* 93, 394–399.
- Amador, C., Emond, J.P., Nunes, M.C.N., 2009. Application of RFID technologies in the temperature mapping of the pineapple supply chain. *Sens. Instrum. Food Qual. Saf.* 2009, 26–33.
- Bogataj, M., Bogataj, L., Vodopivec, R., 2005. Stability of perishable goods in cold logistics chains. *Int. J. Prod. Econ.* 93–94, 345–356.
- Hayes, J., Crowley, K., Diamond, D., 2005. Simultaneous web-based real-time temperature monitoring using multiple wireless sensor networks. *Sens. IEEE* 4.
- Jedermann, R., Becker, M., Gorg, C., Lang, W., 2011. Testing network protocols and signal attenuation in packed food transports. *Int. J. Sens. Networks* 9, 170–181.
- Jedermann, R., Ruiz-García, L., Lang, W., 2009. Spatial temperature profiling by semi-passive RFID loggers for perishable food transportation. *Comput. Electron. Agric.* 65, 145–154.
- Lee, W.S., Alchanatis, V., Yang, C., Hirafuji, M., Moshou, D., Li, C., 2010. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Comput. Electron. Agric.* 74, 2–33.
- Likar, K., Jevšnik, M., 2006. Cold chain maintaining in food trade. *Food Control* 17, 108–113.
- Montanari, R., 2008. Cold chain tracking: a managerial perspective. *Trends Food Sci. Technol.* 19, 425–431.
- Pallás Areny, R., 2004. *Sistemas de primer orden Sensores y acondicionadores de señal*. MARCOMBO S.A.
- Pang, Z., Chen, Q., Zheng, L., 2012. Scenario-based design of wireless sensor system for food chain visibility and safety. In: Wu, Y. (Ed.), *Advances in Computer, Communication, Control and Automation*. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 541–548.
- Ruiz-García, L., Barreiro, P., Robla, J.I., 2008. Performance of ZigBee-based wireless sensor nodes for real-time monitoring of fruit logistics. *J. Food. Eng.* 87, 405–415.
- Ruiz-García, L., Barreiro, P., Robla, J.I., Lunadei, L., 2010. Testing ZigBee motes for monitoring refrigerated vegetable transportation under real conditions. *Sensors* 10, 4968–4982.
- Ruiz-García, L., Lunadei, L., 2011. The role of RFID in agriculture: applications, limitations and challenges. *Comput. Electron. Agric.* 79, 42–50.
- Ruiz-García, L., Lunadei, L., Barreiro, P., Robla, J.I., 2009. A review of wireless sensor technologies and applications in agriculture and food industry: state of the art and current trends. *Sensors* 9, 4728–4750.
- Tanner, D.J., Amos, N.D., 2003. Modelling product quality changes as a result of temperature variability in shipping systems. *Proceedings of the 21st International Congress of Refrigeration: 17–22 August 2003; Washington DC, United States: Paper*.
- Wang, N., Zhang, N.Q., Wang, M.H., 2006. Wireless sensors in agriculture and food industry – recent development and future perspective. *Comput. Electron. Agric.* 50, 1–14.

Anexo 6: Design of a solar incubator. Part 1: Monitoring temperature and enthalpy gradients under commercial production

DESIGN OF A SOLAR INCUBATOR.PART 1: MONITORING TEMPERATURE AND ENTHALPY GRADIENTS UNDER COMMERCIAL PRODUCTION

Javier Garcia-Hierro^{1*}, José I. Robla¹, Pilar Barreiro²,
Eva C. Correa-Hernando², Belen Diezma²

¹ *Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Av. Gregorio del Amo 8, Madrid, 28040 Spain*

² *LPF_Tagrafia. UPM. CEI_Moncloa, Av. Complutense s/n, Madrid, 28040 Spain*

* E-mail: j.hierro@cenim.csic.es

Abstract

Solar heating systems have been used in agribusiness to dry fruits and crops, diminishing the use of traditional energy sources. Beyond, solar energy can be used in other processes than do not require a large amount of heat. An interesting field is eggs incubation, where the temperature needed (37.5°C) is easily reachable by solar systems. The temperature of egg depends of four factors: 1) temperature of the air of incubator, 2) heating of embryo development, 3) heat loss due to water evaporation and 4) heat transfer between air and egg.

In this work, a commercial incubator has been monitored to quantify the gradients of temperature and relative humidity within, during two completed incubation processes. A 3D map highlights the existence of such gradients of temperature (T) and relative humidity (RH). The average temperature varies from 36.6 to 37.9 °C, near the set point value (36.7°C). Relative humidity varies from 41.5 to 46.2% (always higher than set point relative humidity of 40%). It has much higher fluctuations than temperature since its control is more difficult. Although ambient parameters are not always within the optimal range for incubation, the birth rate is high (about 72%) taking into account that there is no initial discrimination of unfertilized eggs. So the future solar heating control should perform similar to the actual as to maintain the actual quality standard.

Key words: Smart sensors, low-input production, renewable energy

1. Introduction

The real increase in energy prices and the intention of reducing pollutant emissions in developed countries makes it worth using solar energy for all the processes where its application is feasible, and according to authors it is worth using solar energy as heat source for small-scale hatchery (Kisaalita et al., 2010)(Kuye et al., 2008).

The optimum temperature and relative humidity needed for the incubation of eggs are well established: 37.5-37.8 °C (Visschedijk, 1991) (Decuypere & Michels, 1992) and 45-60% relative humidity (RH). In order to supervise the actual operating conditions and to monitor the time evolution, a combination of temperature and relative humidity sensors is required, while the solar heating system must be designed and sized accordingly.

Meijerhof and Van Beek (1993) formulated the analytical equations that describe the influence of weather and climate conditions on moisture loss and temperature during hatching eggs, and French (1997) presented a simple model to describe the relationship between the temperature of the developing embryo, incubator temperature, embryo heat production and thermal conductivity of the eggs and its surrounding, since eggshell temperature differs from incubator temperature. A simple model can be expressed by Eq.

$$T_{egg} = T_{inc} + \frac{H_{emb} + H_{water\ loss}}{K} \quad \text{Eq.1}$$

Where T_{egg} = temperature of egg, T_{inc} =temperature of incubator (°C), H_{emb} =heat production of embryo (W), $H_{water\ loss}$ = heat loss from evaporative cooling (W) and K = thermal conductance of egg and surrounding boundary (W/°C).

At the beginning of incubation, H_{emb} is negligible so the incubator temperature is higher than that of the egg. However, for the last days in the incubation process, $H_{emb} \gg H_{water\ loss}$ and therefore $T_{inc} < T_{egg}$.

Lourens et.al (2005) conducted an experiment to study the effects of different eggshell temperature profiles during incubation with regard to embryo mortality and hatchability. An average eggshell temperature of 37.8 °C and a fluctuation of 5°C were observed in commercial single-stage incubators, depending of development and position of the egg in the machine (Lourens, 2001). Such temperature gradients have also been reported by Van Brecht, Aerts et al.(2003). To optimize the hatching success, the temperature gradient needs to be reduced and the uniformity of air temperature needs to be improved by controlling the airflow pattern in a more optimal way.

There are good scientific reviews about on the use of solar energy to for drying fruits, coffee and or crops, and it has been demonstrated, that those systems are practical, and economically and environmentally profitable. The application of solar energy for poultry production has not received comparable attention, especially in the developed countries (Bolaji, 2008), though Enibe (2001) proposed that natural circulation air solar heaters could be used for poultry egg incubation.

Kuye (2008) designed a solar incubator using a solar collector with water heating, which has shown very good results. The decreasing price of solar collectors as well as an enhanced experience gained in the use of such kind of installations is making profitable the use of solar incubation for developed countries, beyond the small-scale facilities found in developing countries.

This work aims at assessing ambient gradients inside a commercial incubator as a preliminary step for incorporating solar energy as to improve the system efficiency,

2. Materials and Methods

2.1 Incubator and location

Two completed incubation processes have been monitored in a VICTORIA© commercial incubator with a capacity of 9200 quail eggs (Fig.1) in a volume of 6.42m³(194x180x184). The incubator is property of a partridges hatchery sited in the village of Galapagar (Madrid) (40° 34' 35" N, 4° 0' 7" W and 800m above sea.). The incubator is in an insulated room with two more hatches.

2.2. Sensors

The SENSIRION© SHT7x integrates sensor elements plus signal processing in compact format and provide a fully calibrated digital output. Relative humidity is measured by a capacitive sensor while a band-gap sensor measures temperature. Both sensors are seamlessly coupled to a 14bit analog to digital converter and a serial interface circuit.

Each SHT is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into the OTP (One Time Programmable) memory. The small size and low power consumption makes SHT7x the ultimate choice for even the most demanding applications. SHT7x is supplied on FR4 with pins which allows for easy integration or replacement.

2.3. Data Acquisition

A data acquisition card has been entirely designed and assembled by the GERA (Grupo de Energía Renovables Aplicadas of Universidad de Oriente de Santiago de Cuba) and CENIM (Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas), getting the possibility to use up to 28 sensors simultaneously and to monitor processes using a CEC-TESTPOINT® program. The card is based on the MICROCHIP® PIC18LF4620 flash microcontroller.

2.4. Methods

A pool of 18 SENSIRION® SHT75 has been uniformly distributed, under a 3 D mesh sensor network (Fig 2).

FIGURE 1. Inside View of VICTORIA© incubator

FIGURE 2. Sensors distribution inside incubator. Yellow sensors are in the side closest to the door. Blue Sensors are in the side closest to the fan, electrical heating and humidifier

In this work, two complete incubations of 9200 partridge's eggs have been monitored.

TABLE 1. Experiments Summary

Experiment	Date (dd/mm/yy)	Measuring Frecuency (min)	Eggs (n)	Birth Rate
1	03/05/11-21/05/11	3	9200	70.5
2	24/05/11-11/05/11	3	9200	74.1

MATLAB® interpolation functions, well known and used in previous works on same authors, have been used to analyse data, and a 3D plot that represent the gradients of temperature and relative humidity has been obtained, as shown in Figure 3 and 4. Besides, a zero-order filter function from the signal processing MATLAB® toolbox has been used to compute the smoothed temperature and relative humidity values that overcome the lack of resolution of the sensors (Fig. 5 and 6).

For computing psychrometric properties of air inside incubator, the ASAE D271.2, defined in April 1979 and reviewed in 2006 has been used and program in MATLAB® environment (Fig. 7).

3. Results and Conclusions

3.1. Results

For process characterization, average Temperature (T_m) and average Relative Humidity (RH_m) have been calculated for each sensor. Standard deviation of T and RH represents the

variation refereed to the average data. These values are summarized in Table 2 for both incubations, the minimum T_m is found for position 1, which is far from heating electrical resistances. Data shows that the location 6 shows the highest temperature stability (lower Std_T), while area 18 is the most variable due to the heating cycles of the electrical resistances. The high Std_{RH} found for position 4 during the first incubation is unrealistic, as due to the abnormally low values at specific times which cannot be explained at current stage.

TABLE 2: Incubation Data Summary.

	Incubation	T_m (°C)	Std_T (°C)	RHm	Std_{RH} (%)
Maximum	1	37.89 (10)*	0.36 (18)	46.19 (8)	3.00 (4)
	2	37.43 (2)	0.38 (18)	46.07 (8)	1.87 (14)
Mininum	1	36.91 (1)	0.10 (6)	42.23 (3)	1.29 (8)
	2	36.64 (1)	0.18 (6)	41.53 (3)	1.40 (9)
Mean	1	37.28	0.25	43.63	1.52
	2	37.01	0.22	43.63	1.52

(*) Sensor number

The 3D temperature map (Fig.3) clearly highlights the gradient generated by the transmission of heat under forced convection airflow. The hottest part of the incubator is located near the heating resistances, while the coldest remains near the corners and next to the door. What it is more difficult to explain is why the zone next to the humidifier (rear-down-right) has not a higher relative humidity than the rest. It is possible that the higher density of water (respect to air) makes it to accumulate in the bottom also where the air stream changes direction (red zone in Fig.4).

FIGURE 3. Three Dimensional Map of Temperature during first incubation

FIGURE 4. Three Dimensional Map of Relative humidity during first incubation

Temperature data are discrete due to the A/D internal conversion of the SENSIRION® sensor, with a resolution of 0.1°C as shown in Figure 5. Using 'the zero-order filter' the values are smoothed and the heating cycles are clearly observed, as due to the control of regulator. A change in set point during the process is also found in Figure 5.

FIGURE 5. Filter function applied to Sensor 13 Temperature. Second Incubation

The regulation of relative humidity inside the incubator is more complicated, and larger oscillations are found (Fig. 6).

FIGURE 6. Filter function applied to Sensor 13 Relative Humidity. Second Incubation

Data obtained by zero-filtering the RH signal has been used to compute psychrometric diagram that is shown in figure 7. There are two areas clearly segregated: first days of incubation is on the right side of the diagram, when the T and RH were higher. At the moment when the set-point was changed, the T and RH decreased (left side of the diagram).

FIGURE 7. Psychrometric Data in first incubation process

3.2. Conclusions

The actual regulation system used to control temperature and relative humidity in the studied commercial incubator is working much more accurately than expected according to bibliography, with below 1°C of gradient, and 0.4 °C time variability, also with birth rates between 70 and 75% which are high taking into account that there is no initial discrimination of unfertilized eggs. The challenge now is to maintain the uniformity by decreasing external energy input by implementing solar heating. That kind of control of temperature can be used in a future implementation of a solar heating source. Gas exchange as related to metabolism will also be a matter of study for further research.

Acknowledgements

The funding of this work has been covered by: MICINN with the project Smart-QC (AGL2008-05267-C03-03) and AECID with the project A/030569/10
We would like to thank all the help and lessons provided by Francisco Pérez and Ángel López of FINCA CINEGÉTICA DEHESA VIEJA (Galapagar)

Reference list

1. ASABE. 2006. Psychrometric data ASAE D271.2 APR1979, R2005. St. Joseph, MI.
2. IIR/UNEP. 2002. Industry as a Partner for Sustainable Development Refrigeration.
3. Bolaji, B. O. (2008). "Design and Performance Evaluation of a Solar Poultry Egg Incubator." Thammasat Int. J. Sc.Tech. **13**(1): 47-55.
4. Decuypere, E. and Michels, H. (1992). "INCUBATION-TEMPERATURE AS A MANAGEMENT TOOL - A REVIEW." Worlds Poultry Science Journal **48**(1): 28-38.
5. Enibe, S. O. (2002). "Performance of a natural circulation solar air heating system with phase change material energy storage." Renewable Energy **27**(1): 69-86.
6. French, N. A. (1997). "Modeling incubation temperature: The effects of incubator design, embryonic development, and egg size." Poultry Science **76**(1): 124-133.
7. Kisaalita, W. S., Bibens, B., Lane, E., Young, P., Kinsey, V. R. and Some, S.. (2010). "Design and Testing of an Avian Hatchery Solar Energy Incubator for Smallholder Poultry Farmers from the Sudano-Sahelian Belt." Ama-Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America **41**(2): 84-90.
8. Kuye, S. I., Adekunle, N.O., Adetunji, O.R. and Olaleye, D.O. (2008). Design and Construction of Solar Incubator. Third Conference on Science and National Development, Nigeria.
9. Lourens, A. 2001. The importance of air velocity in incubation. World Poultry **17**(3):29–30.
10. Lourens, A., Van den Brand, H., Meijerhof, R. and Kemp, B. (2005). "Effect of eggshell temperature during incubation on embryo development, hatchability, and posthatch development." Poultry Science **84**(6): 914-920.
11. Meijerhof, R. and Van Beek, G. (1993). "Mathematical Modelling of Temperature and Moisture Loss of Hatching Eggs." Journal of Theoretical Biology **165**(1): 27-41.
12. Van Brecht, A., Aerts, J. M., Degraeve, P. and Berkman, P. (2003). "Quantification and control of the spatiotemporal gradients of air speed and air temperature in an incubator." Poultry Science **82**(11): 1677-1687.
13. Visschedijk, A. H. J. (1991). "PHYSICS AND PHYSIOLOGY OF INCUBATION-1." British Poultry Science **32** (1): 3-20.