DEPARTAMENTO DE ENERGÉTICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS INDUSTRIALES

UPM

CARACTERIZACIÓN DE LA REACCIÓN SODIO – AGUA
(SODIUM WATER REACTION)
PARA PROPULSIÓN DE MOTORES COHETE

Autor: Juan Guerrero Padrón
Ingeniero de Armamento y Material

Director: Alberto Abanades Velasco
Doctor Ingeniero Industrial

2019

Tribunal nombrado por el
Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la
Universidad Politécnica de Madrid
el día 11 de Junio de 2019

PRESIDENTE

Dr. D. JOSE MARIA MARTINEZ-VAL PEÑALOSA

SECRETARIO

Dr. D. IGNACIO LOPEZ PANIAGUA

VOCALES

Dr. D. MANFREDO MONFORME MORENO

Dr. D. ALBERTO PEÑA BANDRES

Dr. D. AMALIO GARRIDO ESCUDERO

SUPLENTE

Dr. D. ANTONIO ROVIRA

Dr. D. ALBERTO ESCRIVÁ

Realizado el acto de defensa y lectura de la tesis el día de de 2019, en la E.T.S. Ingenieros Industriales.

CALIFICACIÓN:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Dedicatoria

A mi mujer Almudena por ser la inspiradora
de la idea central de esta tesis

A mis padres Juanjo y Saro por ser un modelo de vida
y un referente moral

Agradecimientos

Agradezco a mi Director de tesis D. Alberto Abanades por su dedicación y apoyo. De no haberlos tenido la tesis no habría salido adelante.

También quiero expresar mi gratitud al Profesor de la Escuela D. Ignacio López, que por su entusiasmo y amistad ha contribuido a elevarme el ánimo para desarrollar el esfuerzo necesario.

Igualmente quiero resaltar el trabajo realizado por mi compañero D. Iván Gil durante la fase de ensayos, en la que con gran ingenio ha resuelto todo tipo de problemas técnicos, habiendo contribuido decisivamente al éxito de las pruebas.

El Jefe del Servicio de Prototipado del INTA Campus La Marañosa, D. Raúl Herranz, ha desarrollado el utillaje necesario para realizar toda la campaña de ensayos y ha aportado soluciones innovadoras en el nuevo motor SWR de alimentación continua. Sus aportaciones han sido fundamentales.

Finalmente, el Jefe del Departamento de Optoelectrónica y Misilística del INTA, Tcol. D. Jesús Sánchez, ha propiciado la realización de todo el proyecto, consiguiendo que sea una línea de investigación de relevancia dentro de propio Instituto.

ÍNDICE

1	RESUMEN	1-1
2	SUMMARY	2-2
3	INTRODUCCIÓN	3-1
4	ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	4-1
5	FUENTE TRADICIONAL DE LA ENERGÍA QUÍMICA: LA COMBUSTIÓN.....	5-1
5.1	Consumo y reserva de los recursos naturales para producir la combustión	5-4
5.2	Características de la combustión.....	5-6
5.3	Calor de la combustión.....	5-7
5.4	Problemas asociados a la combustión	5-8
6	REACCIÓN SODIO-AGUA: NUEVA FUENTE DE ENERGÍA QUÍMICA	6-1
6.1	Características del sodio como elementos químico	6-1
6.2	Características de la reacción sodio agua	6-3
6.3	Aplicaciones potenciales SWR en el ámbito de la energía	6-5
6.4	Sostenibilidad de la reacción SWR.	6-7
6.5	Almacenamiento Energético basado en la Reacción Sodio - Agua.....	6-7
7	PROPULSIÓN COHETE.....	7-1
7.1	Tecnología básica de la Propulsión cohete	7-1
7.2	Magnitudes empleadas	7-2
7.3	Capacidades de los propulsores convencionales	7-3
8	ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LA REACCIÓN SODIO-AGUA.....	8-1
8.1	Caracterización de la SWR por medio de la presión y del volumen.	8-1
8.2	Análisis teórico del experimento.....	8-2
8.3	Método de Ensayo. Descripción del Experimento	8-5
8.4	Tratamiento de Datos y Exposición de resultados experimentales	8-11
8.5	Método experimental para determinar la proporción de ingredientes que determinan la presión en un volumen determinado	8-13

8.6	Ejemplo de aplicación del método.....	8-13
8.7	Figura de mérito	8-15
8.8	Ejemplo de aplicación del método con la figura de mérito	8-17
8.9	Verificación experimental.....	8-18
9	SISTEMA DE MOTOR COHETE CON PROPULSIÓN SWR	9-1
9.1	Investigación experimental realizada para determinar la viabilidad de la propulsión cohete con reactivos sodio – agua	9-2
9.1.1	Resultados de la investigación experimental	9-8
9.1.2	Conclusiones de la investigación experimental.....	9-13
9.2	Fase de investigación de un motor cohete sodio – agua por alimentación continuada de sus reactivos	9-14
9.2.1	Dimensionado del motor cohete.....	9-14
9.2.2	Ensayos	9-15
9.2.3	Dimensionado de un motor cohete basado en la reacción Sodio Agua	9-19
9.2.4	Requerimientos propulsivos del motor cohete	9-20
9.2.5	Condiciones estacionarias de la reacción	9-20
9.2.6	Cálculo de actuaciones del motor cohete	9-22
9.2.7	Dimensiones de la envolvente de la cámara de reacción	9-23
9.2.8	Análisis de los resultados	9-23
10	CONCLUSIONES	10-1
11	APORTACIONES DE LA TESIS AL ESTADO DEL LA TÉCNICA.....	11-1
12	TRABAJOS FUTUROS NECESARIOS DE INVESTIGACIÓN	12-1
13	ANEXO 1. RESULTADOS DE EXPERIMENTOS A VOLUMEN CONSTANTE ...	13-1
14	ANEXO 2. CÁLCULOS CEA.....	14-1
15	ANEXO 3. CÁLCULO CEA PARA COMPARACIÓN DEL EXPERIMENTO	15-1
16	ANEXO 4. HOJA TÉCNICA DE LA ALEACIÓN SODIO - POTASIO	16-1
17	REFERENCIAS	17-1

1 RESUMEN

La reacción entre el elemento químico sodio y el compuesto agua es bien conocida en los ámbitos docentes de las escuelas técnicas de ingeniería y en las facultades de química por su extraordinaria liberación de calor y tener una apariencia muy violenta y explosiva, sin embargo, ha sido muy poco estudiada hasta el presente.

La tesis que se expone sigue una línea de investigación en la que esta reacción es analizada y caracterizada, con la finalidad de poder aprovechar de forma controlada la energía liberada y conseguir el desarrollo de un nuevo tipo de motor cohete, basado en un propulsante cuya única composición lo formen el sodio y el agua.

Con la finalidad de reseñar la importancia de esta reacción en el campo de la energía y para dar a entender que podría constituir por si sola un nuevo vector energético, se inicia la tesis haciendo una exposición energética de la reacción de la combustión, entendiendo por tal la de cualquier combustible con el oxígeno atmosférico.

Posteriormente, se describen las capacidades que ofrece la reacción entre el sodio y el agua, especialmente desde sus características energéticas. Llama la atención la poca bibliografía existente al respecto.

A continuación, se expone una pequeña introducción de la balística interior de los motores cohete, también denominada actuaciones del motor cohete, por entender que es una teoría poco conocida en los ámbitos académicos convencionales, y que es necesario tenerla en cuenta para poder seguir las siguientes secciones de la tesis.

Se presenta, seguidamente, el método y los resultados del estudio experimental llevado a cabo para caracterizar la reacción sodio agua, en vaso cerrado, con distintas proporciones de los ingredientes, así como con variaciones del volumen en el que se produce la reacción. Como resultado se obtiene una expresión analítica que liga todas las anteriores variables con la presión generada.

Por último se presentan los logros conseguidos durante la primera fase de esta línea de investigación, en la que se demostró la viabilidad de la propulsión con un motor probeta mediante ensayos en banco estático y, también, lo que será la tercera fase: un motor experimental en banco que tendrá la peculiaridad de producir una reacción continuada de agua y sodio durante varios segundos, al menos 10. La segunda fase de la línea de investigación ha consistido en la caracterización de la reacción que se expone en la tesis.

La tesis se cierra con unas conclusiones, un desglose de las aportaciones al estado de la técnica en base a la investigación en curso y los trabajos futuros que se consideran necesarios llevar a cabo en esta línea de investigación.

2 SUMMARY

The chemical reaction between sodium metal and water to form sodium hydroxide (NaOH) and hydrogen gas is a well-known reaction among the world of chemical sciences and engineering because of its properties: fast exothermic reaction with extraordinary heat release and violent bursting. However, it has been little studied until the present.

The thesis follows a line of research in which the sodium water reaction is analyzed and characterized with the aim of taking advantage of the released energy in a controlled manner and develops a new type of rocket engine based on a propellant composed only by sodium and water.

The thesis starts providing an energetic overview of combustion, understanding as such the reaction between any fuel and environmental oxygen. The aim of this introduction is to illustrate the importance of the sodium water reaction in the field of the energy and suggest its use as a new energetic vector.

Then, the sodium water reaction capabilities are described, especially those related to its energetic properties. It should be noted the very limited bibliography on this issue.

Next, a brief outline of the internal ballistics of a solid-propellant rocket motor is explained, since this is a not so well-known theory in conventional academics and should be taken into account to understand the rest of the thesis.

After the background, the thesis describes the method and results obtained in the experimental study carried out to characterize the sodium water reaction, in closed vessel, with different proportions of reactants as well as variations of the volume in which the reaction is performed. As a result, an analytical expression is deduced by relating the reaction variables with the pressure generated. This was the second of the three lines of research proposed for the thesis. The other two lines of research are described hereafter.

First line of research consisted of demonstrating the viability of the propulsion of a test engine with tests in test bench. Achievements reached in this line are reported at the end of the thesis.

The third line of research consists of keeping the reaction for at least 10 seconds in an experimental engine in test bench and has not been addressed yet.

The thesis closes with some conclusions, a breakdown of the contributions to the state of the art and a reference to the pending works necessary to follow up these lines of research.

3 INTRODUCCIÓN

La Sociedad humana se está enfrentando a un reto sin precedentes para compensar su impacto en la atmósfera terrestre, al modificar la respuesta radiativa del planeta frente al espacio exterior, y tratar de evitar las consecuencias catastróficas que la modificación del clima puede ocasionar en los ecosistemas terrestres, y en la propia estructura demográfica y económica de la Humanidad. La dimensión planetaria de ese reto ha dado lugar a una conciencia sobre la necesidad de la acción coordinada global a nivel internacional que ha simbolizado el famoso Protocolo de Kyoto, y más recientemente la conferencia de París (COP 21) en 2015, y en las que se desarrollan cada año a partir de entonces. En esas reuniones al más alto nivel internacional, se abordó la necesidad de limitar el impacto antropogénico sobre la temperatura media de nuestra atmósfera a 2°C, con el consenso fundamental de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, e iniciar una transformación hacia una Sociedad libre de carbono.

Estos acuerdos internacionales, fundamentalmente tomados desde el punto de vista político, no toman decisiones sobre aspectos tecnológicos, dejando a cada país que tome las decisiones que considera oportunas para avanzar en esa decisión. En cualquier caso, esa transición va a suponer un cambio radical en la forma en que la Humanidad metaboliza los recursos naturales de que dispone, basada actualmente en la utilización a gran escala de recursos fósiles mediante su oxidación o combustión, generando grandes cantidades de dióxido de carbono, que no son compensadas por mecanismo alguno, saturando la capacidad del planeta para absorberlo o neutralizarlo.

El desarrollo de tecnologías sustitutivas de las actualmente dominantes y que no den lugar a emisión de gases de efecto invernadero es una necesidad si se quiere llegar a completar esa deseada transición hacia una sociedad libre de CO₂, y en la que el impacto de las actividades humanas en el equilibrio atmosférico sea irrelevante. Muchas de esas tecnologías están necesariamente ligadas al sector de generación energética, tales como las fuentes de generación renovable, las cuales podrían mantener activo todos esos procesos metabólicos de nuestro sector productivo. Pero para ello, hay que desarrollar también otros mecanismos relacionados con lo que se llama “economía circular”, que permita acceder a recursos cuyo procesamiento no genere residuos apreciables, o compuestos que no sean reaprovechables o reciclables, y aplicarlos a los procesos industriales y de toda índole que se producen en nuestra sociedad.

Uno de los pasos fundamentales para evitar las emisiones de gases de efecto invernadero es la sustitución del uso de la oxidación del carbono. La principal virtud de ese proceso de oxidación es su alta liberación de energía de forma controlada tecnológicamente que se ha producido desde el inicio de la actividad humana, desde el control del fuego en tiempos ancestrales hasta los motores a reacción, usando distintos recursos carbonatados (madera, carbón, petróleo, gas natural, biomasa).

En esta tesis se aborda una opción que puede encajar con estos objetivos de decarbonización del sistema, que es la liberación controlada de energía a través de la reacción sodio-agua, como alternativa la combustión de hidrocarburos. El enfoque está dirigido al sector de la propulsión de cohetes, que requiere control de la presión de empuje en un reactor de forma controlada. No obstante, se puede considerar la semilla para su consideración en otros campos, como puede ser el de la generación de potencia mecánica.

Hasta el momento presente, el empleo de la energía desprendida en la reacción química entre el sodio y el agua es algo que no se ha tenido en cuenta en los ámbitos del desarrollo energético, salvo para análisis de seguridad ligados al uso del Sodio como refrigerante. La energía liberada por la reacción es considerable y además, el agua es el compuesto químico más abundante de la corteza terrestre y el sodio es uno de los elementos químicos igualmente más abundantes. Teniendo en cuenta todas estas circunstancias, llama la atención la falta de investigaciones sobre las posibilidades de esta reacción como fuente de energía.

Desde hace décadas se investiga en nuevas tecnologías para extraer energía de fuentes tan poco densas como el aire o el sol, debido a su escasa aportación de gases de efecto invernadero. En el mismo contexto se puede colocar la investigación en combustibles llamados limpios, que consisten en la producción de hidrocarburos mediante transformaciones químicas o termo-químicas partiendo de energía renovable y compuestos como el propio CO_2 e H_2 . El Hidrógeno (H_2) se está considerando como vector energético. La oxidación de esos hidrocarburos limpios o del H_2 proporcionan un balance muy bajo de emisiones en su ciclo de vida, aunque evidentemente siguen ligados a un proceso clásico de oxidación, en el que la presencia de Oxígeno es fundamental. En el caso de los hidrocarburos limpios, se hace necesario el desarrollo de tecnologías eficaces de captura de CO_2 , lo que es particularmente complicado a pequeña escala.

La alternativa que se analiza en esta tesis es la utilización de sodio en combinación con agua. La reacción sodio-agua ejecutada en vaso cerrado se realiza completamente, liberando su energía disponible, sin que para ello sea necesario la evacuación de los productos de reacción. Además, estos productos, formados por hidrógeno e hidróxido sódico, tienen interesantes propiedades. El hidrógeno contribuye a incrementar la energía liberada en la reacción al combinarse con el oxígeno del aire presente en el recipiente, formando agua. El hidróxido sódico mezclado con el agua excedente, también aumenta la energía aprovechable de la reacción. Por último, el hidróxido sódico, puede ser reutilizado como materia prima industrial, o dejándolo expuesto al aire, tiene la propiedad de combinarse con el CO_2 atmosférico y formar carbonato sódico, compuesto sólido muy estable no agresivo. Es decir, captura CO_2 , uno de los principales agentes del efecto invernadero. También se puede procesar el hidróxido sódico para sintetizar sodio. El resultado general, es que, a partir de componentes muy abundantes en la naturaleza, como Sodio y agua, se logra extrae energía, con el único residuo efectivo de carbonato sódico, con captura de CO_2 , que también se podría reciclar en las condiciones adecuadas.

En consecuencia, debido a que los productos de la reacción son tratables de múltiples maneras y no son perjudiciales para el medioambiente, podría decirse que es una fuente de energía limpia, cumpliendo con las características requeridas para su integración en una Sociedad de bajas emisiones de Carbono, o incluso se puede estudiar su inclusión en procesos de economía circular.

Hasta el momento no se ha considerado que la reacción sodio-agua pueda ser un sustituto de la combustión por una serie de razones prácticas. En primer lugar, el sodio no se encuentra de forma aislada en la naturaleza, con lo que se hace necesaria la transformación previa de compuesto de sodio. En el caso de la combustión, el combustible, en sus diferentes formas, es un recurso natural directo (madera, carbón, petróleo, gas). Se trataría, por tanto, de un vector energético con características similares al Hidrógeno. El carácter altamente reactivo del sodio provoca que siempre se encuentre combinado para adoptar una forma estable en la naturaleza. Este hecho implica que haga falta mucha energía para revertir ese estado natural y aislarlo en forma atómica. En el caso de obtenerlo de la sal común, por ejemplo, se requeriría más energía de la que se obtiene de la propia reacción sodio-agua. Esto es un inconveniente para competir con la combustión tradicional de hidrocarburos, pero está en línea con el coste energético de otras tecnologías como la CCU (Captura de Carbono y su Utilización, “Carbon Capture and Utilization”).

Por tanto, la síntesis del sodio a partir de energía solar o eólica puede ser una vía muy interesante a tener en cuenta, pues en este caso el sodio sintetizado resultaría, a efectos, un potencial almacenador de la energía eléctrica empleada en su síntesis, que será liberada en su posterior reacción con el agua.

La reacción Sodio-agua se ha estudiado hasta el momento desde la perspectiva de la seguridad de instalaciones industriales y energéticas. En particular, la utilización de Sodio fundido como refrigerante asociado a centrales solares [35] o nucleares (Reactor Nuclear rápido refrigerado por Sodio, Sodium – Cooled Fast Reactor, SFR) ha sido el principal estímulo para el análisis de esta reacción en correspondencia a los riesgos que conlleva una posible fuga de refrigerante, que en contacto con el oxígeno del aire pueda dar lugar a detonaciones.

La vía de explotación del sodio como agente energético sintetizado mediante otras energías alternativas podría conducir a su uso masivo como agente energético. Además, su materia prima básica (sal común) es de acceso inmediato en todo el litoral de los continentes y en las minas de sal. La extracción tan solo requeriría acopio de agua de mar o del mineral en las minas. El proceso industrial de esta extracción es muy básico; nada parecido a otros como el de los hidrocarburos.

Una vez puesto de manifiesto lo anterior, resaltando la importancia que pueda tener el sodio como agente energético en su reacción con el agua en los ámbitos convencionales de la energía, es necesario indicar que la investigación de este doctorado se centra en las posibilidades energéticas de esta reacción del sodio para la propulsión en motores cohete,

debido a que los impulsos específicos que llega a tener esta reacción no están lejos de los propulsores de doble base.

Si se pueden conseguir estos valores, la importancia de la reacción sodio-agua para este tipo de aplicaciones es enorme, porque en lo referente al propulsante, el precio podría caer entre 2 y 3 órdenes de magnitud. Además, los problemas de envejecimiento que tienen los actuales propulsores serían absolutamente superados por los nuevos componentes: sodio y agua. El sodio almacenado preservado del contacto con el agua, permanece estable. Se habrían resuelto algunos problemas logísticos muy importantes que se plantean hoy en día.

La tesis que se presenta se enmarca dentro de un proyecto de investigación que persigue conseguir aplicaciones derivadas de la reacción sodio-agua. El campo es inexplorado y muy novedoso porque no se tiene constancia de que se haya iniciado alguna tecnología basada en la explotación de esta nueva fuente energética.

El avance realizado hasta ahora en la presente investigación ha sido en el ámbito de la propulsión cohete. Ha habido una fase preliminar en la que se han realizado diversos experimentos a fin de familiarizarse con la correcta manipulación de los ingredientes de la reacción sodio-agua, así como explorar posibles vías para obtener configuraciones viables de motor cohete basado en esta reacción.

En una segunda fase se ha realizado una campaña de ensayos dirigida a la caracterización de esta reacción en recipiente cerrado. El motivo está basado en las condiciones en que se realizará la reacción dentro del motor cohete. La base de la presente tesis es presentar los resultados y las conclusiones derivadas de estos ensayos.

En el desarrollo de este documento se describirán determinados aspectos energéticos de la combustión, para poder encuadrar las características peculiares de la reacción sodio-agua. También se indicarán los principios básicos de la propulsión cohete, describiendo el estado del arte de los propulsores de estado sólido, para poder comparar el nuevo propulsante basado en la reacción sodio agua que se caracterizará mediante cálculos termoquímicos utilizando el software CEA [27].

La idea de continuidad que debe tener esta línea de investigación está contenida en la siguiente fase, que se debe centrar en el desarrollo de un motor cohete experimental estático, en condiciones de laboratorio que sea capaz de mantener una reacción sodio – agua durante varios segundos en situación de presión constante.

La última fase de esta línea de investigación estaría dedicada al diseño y fabricación de un motor cohete basado en la reacción sodio – agua para realizar pruebas en vuelo, capaz de mantener la reacción durante al menos 10 segundos, tiempo suficiente para algunas aplicaciones de cohetes.

4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Inicialmente la tesis está articulada en una serie de informaciones y conceptos que giran alrededor de la combustión, como fuente primordial de extracción de la energía química, cuya importancia es total en el desarrollo humano desde un principio.

Sin embargo, como se describe más adelante se encuentran tres problemas que no son de fácil solución: se van agotando las reservas de los combustibles derivados del petróleo, cuya vida se estima en algunas décadas, el petróleo representa el 40% de los productos utilizados para la combustión [5] y finalmente, la combustión es el principal agente del efecto invernadero [1]

En el punto 5 se detallan la información encontrada respecto al consumo de los principales combustibles (hidrocarburos, carbón y gas) y los conceptos básicos de la combustión que plantean su uso.

Se concluye que, en esta realidad actual, es necesaria la investigación sobre las capacidades de otras fuentes de energía química que puedan, al menos complementar, a las fuentes basadas en la combustión, por lo que se presenta en el punto 6 la reacción sodio – agua como nueva fuente de energía. En este punto se introduce lo que es la reacción sodio – agua, desde un punto de vista energético. Finalmente se exponen en forma conceptual algunas aplicaciones tecnológicas en las que podría entrar la reacción sodio – agua como solución adecuada frente a la combustión.

Esta tesis se centra en una investigación para determinar la capacidad de la reacción sodio – agua como agente propulsor de motores cohete, por lo que en el punto 7 se presentan unas ideas básicas sobre esta tecnología, y las magnitudes que sirven para caracterizar este tipo de motores.

El punto 8 expone los resultados de una investigación realizada para caracterizar la relación entre las magnitudes directamente relacionadas en la combustión cohete con la reacción sodio – agua: masa porcentual de sodio, masa porcentual de agua, volumen libre de la reacción y presión de relajación alcanzada. Se obtiene una formulación analítica que involucra a todas estas variables.

Se presenta en el punto 9 otra investigación también realizada para determinar la viabilidad de la capacidad propulsiva de un motor cohete teniendo como reactivos sodio y agua. Esta fase ha dado a conocer estas capacidades, habiendo sido la primera vez, teniendo en cuenta los datos referenciales escrutados, que se ha conseguido una tipología cohete capaz de aprovechar las posibilidades de esta reacción. Se han conseguido curvas de empuje tiempo que han alcanzado más de 2000 N con solo 180 g de sodio y 350 g de agua, lo que ha supuesto una relación empuje/peso en torno a 22, dado que el motor probeta pesa 9 kg.

Seguidamente, en este punto, teniendo en cuenta las conclusiones de la investigación realizada, se presentan las bases teóricas para el desarrollo de un nuevo motor cohete, en el que los reactivos sodio y agua se proporcionen por alimentación continuada, en lugar de estar toda la masa de ambos presentes en la reacción inicial. Para ello se presenta un esquema conceptual sobre el nuevo motor de alimentación continua, que ha sido objeto de solicitud una patente mediante la OTRI del INTA (enero 2018). Igualmente se muestra el estado de la fabricación de este motor cohete en condiciones de laboratorio en las instalaciones del INTA Campus La Marañosa.

La verificación experimental del nuevo motor de alimentación continua deberá ser la continuación de la vía investigadora que se ha abierto.

Dentro de estos estudios se exponen los cálculos de las actuaciones de un motor cohete basado en la reacción sodio – agua, utilizando para ello un software específico de simulación desarrollado en la NASA [27], y el método analítico utilizado en el punto 8. Se hace una comparación con las actuaciones de motores cohete similares basados en agentes propulsantes convencionales de tipo sólido.

Se presentan en el punto 10 las conclusiones de la tesis y en el punto 11 se sugieren varias líneas de investigación que pueden abrirse a partir del conocimiento adquirido.

5 FUENTE TRADICIONAL DE LA ENERGÍA QUÍMICA: LA COMBUSTIÓN

Desde los inicios de la humanidad, hasta nuestros días, la forma primordial de explotar la energía química ha sido por medio de la reacción química de la combustión. Las aplicaciones de la combustión están presentes en la mayor parte de los procesos donde se requiere generación de calor.

A pesar de que hoy en día haya otras fuentes de energía alternativas a la energía química, como son la nuclear, eólica, solar, hidráulica o geotérmica, el uso de la combustión en relación a estas fuentes es abrumador en todos los países. Se muestra, al respecto, los datos obtenidos en la publicación BP Statistical Review of World Energy [3, 4, 5] en las siguientes tablas en las que las cantidades numéricas representan millones de toneladas de petróleo o medida equivalente para las otras energías que no emplean combustibles.

Tabla 1: Consumos energéticos de las principales fuentes de energía en los años 2014, 2015 y 2016. (Mtep)

	2014						
	OIL	GAS	COAL	NUCEAR	HYDRO	RENEW	% Combus
US	836.1	695.3	453.4	189.8	59.1	65	86.34%
EU	592.5	348.2	269.8	198.3	83.8	118.7	75.13%
WORDL	4211.1	3065.5	3881.8	574	879	316.9	86.31%

	2015						
	OIL	GAS	COAL	NUCEAR	HYDRO	RENEW	% Combus
US	851.6	713.6	396.3	189.9	57.4	71.7	86.01%
EU	600.2	361.9	262.4	194.1	76.4	136	75.08%
WORDL	4331.3	3135.2	3839.9	583.1	892.9	364.9	86.00%

	2016						
	OIL	GAS	COAL	NUCEAR	HYDRO	RENEW	% Combus
US	863.1	716.3	358.4	191.8	59.2	83.8	85.27%
EU	613.3	385.9	238.4	190	78.7	135.6	75.38%
WORDL	4418.2	3204.1	3732	592.1	910.3	419.6	85.52%

Figura 1: Consumo de las principales fuentes energéticas en el mundo hasta 2016

Figura 2: Cuota del consumo de las principales fuentes de energía en el mundo hasta 2016.

Figura 3: Reparto del consumo de energía por regiones en el mundo hasta 2016.

Los datos ponen de manifiesto una dependencia enorme de la combustión como fuente de energía en todo el planeta.

Entrando en la casuística sobre las aplicaciones que se le dan a la combustión como fuente fundamental de energía, de puede desglosar de una forma muy generalista las siguientes aplicaciones:

- Motores térmicos. Basados en la combustión generan el movimiento de vehículos terrestres, navales y aéreos.
- Sistemas generadores de electricidad que utilizan motores térmicos para producción de energía eléctrica.
- Hornos industriales de uso común en las industrias de transformación pesadas (acero, vidrio, cementos), como en las petroquímicas o las alimentarias.
- Calderas, ampliamente usadas para el calentamiento de fluidos caloportadores, como agua o aceites, destinados al acondicionamiento térmico de todo tipo de edificaciones, procesos industriales, generación eléctrica, etc.
- Procesado de basuras para generación de energía eléctrica también se hace mediante procesos de combustión en calderas.

Se puede decir que la civilización desde sus inicios ha utilizado y sigue utilizando la combustión como el proceso preferente para el suministro de la energía.

5.1 Consumo y reserva de los recursos naturales para producir la combustión

El recurso más ampliamente usado para generación de energía química por medio de la combustión es el de los hidrocarburos derivados del petróleo. En segundo lugar, es el carbón, que aunque su demanda crece en los últimos años, no lo hace todo lo que debiera por el uso cada vez más extendido del gas natural, del que se espera su época dorada en los próximos decenios por su menor impacto ambiental y el desarrollo creciente de su logística.

Figura 4: Evolución de la reservas petrolíferas previstas hasta 2016

Las reservas petrolíferas en los principales países con este recurso, de acuerdo con la referencia [5], se indican en la anterior figura. Totalizan 1706.7 miles de millones de barriles.

Si se tiene en cuenta el consumo diario de petróleo en el año 2016, que según [5], ha sido de 96.6 millones de barriles, las previsiones de petróleo rondan los 50 años con los yacimientos actualmente conocidos.

Según la referencia [5], las reservas de carbón en las principales regiones del mundo para 2016 dan los valores indicados en la siguiente figura. Totalizan 1139 millones de toneladas.

Figura 5: Evolución de la reservas de carbón previstas hasta 2016

El consumo de carbón en 2012 en todo el mundo fue de 3.7 [5] millones de toneladas. Esta cifra implica que las actuales reservas se agotarían en 153 años.

Figura 6: Reservas de Gas Natural en el mundo.

Las reservas de gas [5], se calculan en 186.6 trillones de metros cúbicos.

El consumo anual de gas natural en 2016 [5] en todo el mundo fue de 3542.9 billones de m^3 . En consecuencia, las reservas son muy abundantes para los consumos actuales.

De acuerdo con los datos ofrecidos, el petróleo, que es el recurso energético más utilizado entre los combustibles fósiles (40%) agotará sus reservas actuales en 4 o 5 décadas, según las estimaciones presentadas. Esto plantea un serio problema a medio plazo a la fuente de energía química por excelencia: la combustión.

Como fuente adicional para combustión puede considerarse la biomasa. Su uso, todavía no se produce a gran escala, pero está teniendo una cierta expansión en determinados países, ya que está muy supeditada a los precios del petróleo, y a la productividad de la materia prima, (en tierra, en laboratorio, o en el mar) ya que aunque los costes de los combustibles fósiles sean mayores, tienen la ventaja de tener un poder calorífico superior, en torno a 6 y 8 veces la de la biomasa, una densidad energética muy superior y también el poder ser utilizados como fluidos (caso de los derivados del petróleo y el gas), lo cual facilita la integración de las instalaciones con un tamaño más reducido.

En resumen, los combustibles fósiles, principal fuente primaria para la combustión, son un recurso cuya expectativa de disponibilidad estará limitada hasta la entrada del próximo siglo XXII, si no antes. Los recursos renovables para generar energía por combustión están basados en el uso de la biomasa, cuya disponibilidad masiva estará también limitada por su ciclo de crecimiento, riqueza de los terrenos, disponibilidad de agua y de luz solar disponible, además de la posible competencia de otras actividades bioeconómicas como la alimentación. El consumo de recursos fósiles se enfrenta también al reto tecnológico que supone su uso limitando las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual es uno de los retos de mayor magnitud a los que se enfrenta la humanidad de cara a evitar cambios climáticos bruscos, con impredecibles impactos a todos los niveles.

5.2 Características de la combustión

Hay autores [2] que clasifican las fuentes de energía en dos grupos: las que generan residuos y las que no generan residuos. Entre las primeras están todos los procesos de combustión, además de la energía nuclear y entre las segundas las energías están las denominadas energías limpias (hidráulica, eólica, solar, etc.).

La combustión se define como una reacción rápida y fuertemente exotérmica, donde concurren un reactivo oxidante, normalmente el oxígeno que se encuentra en el aire, y un reductor (combustible fósil, biocombustible o similar). La combustión es un proceso que requiere para su sostenimiento la eyección de sus productos.

En el proceso de la combustión puede presentar llama o no [1]. La llama, a su vez, puede ser premezcla o de difusión. Aparecerá una u otra según la situación de los reactivos durante el proceso; que estén premezclados a nivel molecular o no. El primer caso se da en los motores de combustión. El segundo caso se da, por ejemplo, en la combustión de un trozo de madera, donde hay una interface en que se da la reacción entre el combustible y el comburente. También ocurre que los dos tipos de llama pueden aparecer indistintamente en una misma reacción.

La reacción de combustión conlleva la ruptura de enlaces moleculares de los reactivos y la ruptura de estos enlaces es la base de la energía que se libera durante el desarrollo de la reacción [7].

La llama que aparece en la mayoría de los procesos de combustión, manifiesta la existencia de elevadas temperaturas en los productos de la reacción y los gases que les rodean, siendo una emisión de radiación térmica en las zonas espectrales del visible y el infrarrojo, debido al salto cuántico de los electrones en las moléculas y caracterizado por la ley de Planck. Este fenómeno se identifica por la liberación de una gran energía, que se utiliza para ser transferida a un foco frío, y así producir trabajo y/o elevar su energía interna.

Tanto la producción de la combustión, como su mantenimiento requieren condiciones especiales, que, de no darse, no se posibilita su iniciación o se aborta su desarrollo. El proceso de inicio de la combustión se conoce como iniciación o ignición. Este proceso crea las condiciones energéticas adecuadas para que los reactivos reaccionen. Una vez iniciada la combustión, ya no es necesario más aporte energético. La combustión se mantiene con la propia energía que emite, consiguiendo la gasificación de los reactivos [8] que posibilitan la reacción de los mismos, dando lugar a los productos de la reacción.

Para que la combustión sea estable y no se sofoque, es necesaria la evacuación de los productos de la reacción, especialmente si el elemento oxidante o comburente es el oxígeno del aire. En el caso de la propulsión cohete con combustible sólido, no es así, porque el agente oxidante está presente en la formulación química del propulsor.

5.3 Calor de la combustión

El calor desarrollado en un proceso de combustión, depende mucho del combustible que va a reaccionar con el oxígeno del aire (no se consideran combustiones especiales que se realizan sin oxígeno molecular como agente oxidante). El calor de combustión es la magnitud que se toma normalmente para medir la energía térmica que se desarrolla en un proceso de combustión. Se exponen algunos valores para diferentes combustibles [9]:

Tabla 2: Calor de Combustión de algunos combustibles (PCS).

Hydrogen	120.0 MJ/kg
Natural Gas	54.0 MJ/kg
Methane	50.0 MJ/kg
Gasoline	45.0 MJ/kg
Diesel	43.3 MJ/kg
Coal Anthracite	36.0 MJ/kg
Ethanol	29.7 MJ/kg
Wood	13-15 MJ/kg

Estos valores representan el Poder Calorífico Inferior (PCI), o Superior (PCS), ya sea considerando o no el calor que se consume en la evaporación del agua que se obtiene como producto de la reacción.

El valor de este PCI es de importancia en aplicaciones aeroespaciales puesto que el peso de las aeronaves o cohetes son un factor importante de cara a su capacidad y rendimiento. Siendo deseable una densidad de energía en términos de PCI lo más alta posible, puesto que el vapor de agua producido se expulsa en estado gaseoso con el resto de productos de reacción.

5.4 Problemas asociados a la combustión

A la ventajosa capacidad calórica que tiene el proceso de la combustión hay que añadir el inconveniente que presentan por los productos de la reacción, que deben ser expulsados al entorno circundante y al estar formados por contaminantes [1], producen efectos de contaminación. Los productos de reacción son muy amplios: desde ingredientes parcialmente quemados a hidrocarburos, óxidos nítricos (NO, NO₂), monóxido y dióxido de carbono y óxidos de azufre, principalmente, cuya emisión depende de la naturaleza del combustible y de las condiciones en que se produce la reacción. Actualmente se imputan a varios gases, productos derivados de la combustión, estar entre los principales responsables del llamado Efecto Invernadero, que trae consigo un calentamiento global del planeta. Estos gases denominados GHG ("Greenhouse Gases") se caracterizan porque dispersos en la atmósfera absorben y emiten radiación dentro del rango infrarrojo térmico, modificando el balance radiativo del planeta.

Entre los gases más abundantes de efecto invernadero se encuentran el dióxido de carbono, con el puesto n° 2 después del vapor de agua) y el dióxido de nitrógeno, puesto n° 4 después del Metano [1]. Ambos gases son productos típicos de la combustión, el dióxido de carbono de forma inevitable, y los óxidos de nitrógeno en función de las condiciones de la combustión.

Se entiende que, aunque la reacción química de la combustión, ha contribuido más que ninguna otra fuente de energía al desarrollo de todas las civilizaciones de la humanidad, su empleo cada vez más intensivo y expansivo, plantea grandes problemas en el

medioambiente por los efectos de varios de sus productos de reacción, que son altamente contaminantes.

La sustitución de la combustión por otras fuentes de energía no contaminante no ha conseguido los éxitos necesarios para disminuir la cuota de empleo de la combustión, como fuente principal de energía, manteniéndose hoy en día en torno al 85.52% [5], cifra en sí misma muy elevada. Tampoco parece previsible que en unos plazos de décadas se consiga disminuir esta cifra a niveles sustancialmente menores, ya que la tendencia es creciente, como indica la figura 1. Esta situación junto con la previsión del agotamiento de las reservas del petróleo en algunas décadas, plantea un serio problema en un futuro más o menos próximo.

6 REACCIÓN SODIO-AGUA: NUEVA FUENTE DE ENERGÍA QUÍMICA

En esta tesis se presenta una nueva forma de obtención de energía química; también a partir de un tipo de reacción REDOX, como lo es la combustión, pero con una serie de diferencias que la hacen especialmente interesante para poder plantear que esta nueva fuente pueda sustituir en multitud de aplicaciones a los procesos de combustión. La nueva forma es la reacción Sodio – Agua (Sodium Water Reaction – SWR).

Es conocido por la mayor parte de los estudiantes de carreras relacionadas con asignaturas de química inorgánica, cómo el sodio reacciona violentamente con el agua, como cualquier metal alcalino, produciendo incluso explosiones, sin que sea necesaria una preparación de ambos reactivos para que tengan unas condiciones especiales, como es el caso de la combustión.

En las instalaciones de la SGDST-INTA (Madrid) está trabajando desde hace 3 años en la caracterización química y en el desarrollo de tecnologías para la explotación energética de la SWR. En estos años se han desarrollado y probado motores cohetes en banco estático, consiguiendo niveles de empuje con valores pico 2:1 respecto del peso del motor probeta. La línea de investigación permanece abierta, y se continúa investigando para conseguir mayores prestaciones en cuanto a empuje y duración temporal de la reacción. Esta tesis se encuadra dentro de los trabajos realizados a ese respecto.

Dentro de las tareas abordadas, se han hecho varias campañas de ensayos en un reactor de volumen constante, con la finalidad de caracterizar la reacción SWR. Se presentan en este trabajo los resultados y el método diseñado para conseguir determinar algunas magnitudes de especial importancia.

6.1 Características del sodio como elementos químico

El sodio se encuentra en la Tabla Periódica en la columna de los metales alcalinos, con el número atómico 11. Cuenta con un electrón en su corteza externa, preparado para ser donado lo que le confiere un carácter muy reactivo, hasta tal punto que en la naturaleza no se encuentra aislado, sino combinado.

Su densidad es de 968 kg/m^3 y su punto de fusión de 98°C , por lo que flota durante su reacción sobre el agua y además se licúa formando pequeñas bolas que van remitiendo a medida que transcurre la reacción. El punto de ebullición es de 883°C , por lo que no es previsible que se gasifique durante las reacciones SWR.

La abundancia del sodio en la corteza terrestre es muy grande [10]. Ocupa la sexta posición entre los elementos químicos. También es el más abundante de los metales alcalinos. Se produce industrialmente para aplicaciones muy especializadas. Anualmente se producen 100.000 toneladas [11] en el mundo.

El sodio metálico se sintetizó por primera vez en 1855 en el proceso Deville para la producción de aluminio [12]. Actualmente el sodio se sintetiza a partir de la sal común (cloruro sódico) mediante electrolisis en la Célula de Down, proceso que fue patentado en 1924 [13]. También hay un método alternativo, pero más costoso energéticamente, que es el Proceso Castner, basado en la electrolisis del hidróxido de sodio. Las producciones recientes (2009) establecían unos precios de US\$ 3.30/kg por tonelada [6].

Figura 7: Abundancia de los elementos químicos por 10^6 átomos de silicio. El sodio es de los más abundantes.

Las aplicaciones industriales que actualmente tiene el sodio metálico son de tipo especial, por ejemplo el sodio líquido se usa como fluido para transferencia de calor en reactores del tipo SFR (sodium-cooled fast reactor) en el ámbito nuclear [14], [15], debido a su alta conductividad térmica y a su baja sección eficaz de absorción de neutrones, requerida para conseguir una buena economía neutrónica en un reactor atómico y permitir que la constante de criticidad del núcleo pueda ser suficiente para operar el reactor de forma continuada, permitiendo el uso de venenos neutrónicos adicionales para su control. Al ser un moderador ligero, el flujo de neutrones resultante en el reactor es más rápido, mejorando la utilización de elementos transuránicos como combustible nuclear. Además, por su elevado punto de ebullición, puede permanecer operativo a presiones iguales a las del entorno ambiental. Esta característica hace que se le haya considerado también como refrigerante de centrales termosolares.

También industrialmente se utiliza para síntesis de índigo, sodium borohydride, sodium azide. Tiene un uso específico en las lámparas de vapor de sodio, de amplio uso en la iluminación de poblaciones y carreteras, aunque está perdiendo mercado frente a las lámparas LED. Hay otros usos de este metal pero que son tan específicos o más que los indicados. No obstante, y a pesar de su abundancia en la naturaleza, el sodio no es actualmente una materia prima de amplio uso industrial.

6.2 Características de la reacción sodio agua

La reacción sodio agua (SWR) está ampliamente referenciada al ámbito de la energía nuclear [15], donde hay una preocupación especial en prevenir fallos estructurales en los equipos del generador de vapor de los LMFR (steam generator of liquid metal fast reactor), debido a que por efecto fatiga, ante la aparición de fisuras en los tubos, puedan ponerse en contacto el fluido caliente (sodio), con el fluido frío (agua) que se encuentra a una presión muy superior; 300bar agua, frente a pocos bar del circuito de sodio [24], y, en consecuencia, el agua se inyecta a través de cualquier fisura que aparezca en los tubos del intercambiador y se produciendo reacciones catastróficas para el equipamiento.

Es muy amplia la cantidad de artículos generados en el ámbito nuclear. En esos trabajos, por ejemplo, se estudia con detalle la cinética química de la reacción [16] mediante códigos desarrollados para tal misión como el SERAFIN, multidimensional y multifase de flujo reactivo (multi-dimensional and multiphase reacting flow) [17]. Se han realizado modelos para predicción de las temperaturas de pico del chorro (jet) de un flujo de vapor introduciéndose en una masa de sodio fundida [18], [20], etc. En general estos estudios van dirigidos a estudiar la seguridad en los Reactores Rápidos (FR) [24].

Todos los estudios realizados en el ámbito nuclear consideran el sodio en exceso y fundido [22], pudiéndose dar, fundamentalmente la reacción [19]:

El calor de la reacción ha sido medido en bomba calorimétrica por Eugene E. Ketchen y W. E. Wallace [21] y comparado con los de otros investigadores anteriores. El dato que aportan es:

$$-\Delta H = 44350 \pm 70 \text{ cal/g átomo de metal} = 8.074 \pm 0.013 \text{ MJ/kg of sodio}$$

Sofia Carnevali [24], establece que la reacción en proporciones estequiométricas sodio – agua el calor liberado es 141 kJ/mol (6.130 MJ/kg de Na), pero que, con exceso de agua, debido a la reacción del Na(OH) resultante con el agua, el calor de reacción pasa a ser 188 kJ/mol (8.174 MJ/kg de Na), dato muy próximo al de Ketchen y Wallace [21].

Considerando una reacción SWR con exceso de agua, en el proceso que tiene lugar, el agua en contacto con la periferia del sodio en la zona de reacción se vaporiza y a su vez,

en el inicio de la reacción, el calor de reacción generado es suficiente para conseguir que la masa de sodio llegue a su punto de ebullición, produciéndose una fragmentación en burbujas del propio metal en forma explosiva [23]. A esta explosión también contribuye el hidrógeno formado, que se combina rápidamente con el oxígeno libre del aire, encontrado en el entorno de la reacción.

La conversión de sodio sólido a fase gaseosa puede suceder en pocos milisegundos, según cálculos realizados [23], no obstante, la velocidad y tasa de reacción dependerá de la disipación rápida o no de los productos de la reacción de la zona de reacción. Si la reacción es lenta, el sodio no llega a vaporizarse, quedando en fase líquida.

La aseveración indicada en la referencia [23] sobre la rápida sublimación del sodio, ha sido comprobada en nuestros ensayos realizados en vaso cerrado, donde se ha observado que aparecían trazas de sodio sin reaccionar proyectadas sobre las partes superiores de la cavidad cilíndrica, a pesar de que los dos reactivos (agua y sodio) se encontraban en la parte inferior.

Durante la reacción, el sodio reacciona con agua vaporizada que toma parte del calor de reacción, convirtiéndose en vapor saturado, con una entalpía dependiente de la presión donde transcurre la reacción. El resto del calor produce el incremento de la temperatura del sodio, hasta superar el punto de fusión, formándose pequeñas esferas líquidas durante la reacción cuyo tamaño viene fijado por la tensión superficial del sodio líquido

Se ha observado en los experimentos llevados a cabo que si la proporción en masa sodio/agua estaba por encima de 0.36 tenía lugar, después de la reacción, la aparición de una masa irregular en el fondo del recipiente, como una costra blanquecina de gran dureza, que no es soluble en agua, al menos con rapidez. Esta masa es NaO_2 . Para proporciones menores en sodio no aparece esta masa. Lo que queda es una solución acuosa de hidróxido sódico.

La reacción sodio – agua realizada en un entorno de aire produce una presión que tiene dos picos: el primero es debido a la propia reacción sodio – agua y el segundo a la reacción del hidrógeno liberado con el oxígeno del aire presente [24]. Kilpatrick et al. [25], hicieron pruebas en reactores cerrados con atmósfera de aire y de nitrógeno, usando como reactivos una aleación de sodio y potasio (NaK_2) y agua. Esta reacción es similar a la que se estudia:

Establecieron que se producían los dos picos de presión indicados, siendo el segundo bastante mayor que el primero, cuando la atmósfera de la reacción era aire. Si la atmósfera era nitrógeno entonces el segundo pico desaparecía.

Sofia Carnevali, et al. describen dos tipos de experimentos [24], llevados a cabo en dos reactores; en un primer caso el reactor (con un volumen de 100 l) contiene una muestra de sodio en una rejilla a una cierta altura del fondo del reactor. La atmósfera es de nitrógeno. Se inyecta agua en el fondo del reactor con un determinado caudal, hasta que la muestra de sodio se alcanza. Como consecuencia de la reacción tiene lugar una elevación variable de la presión con un solo pico. Estos picos de presión son del orden de 0.1 a 0.3 bar, debido a que las muestras de sodio son pequeñas (25 gramos).

También ha hecho experimentos en un segundo reactor con atmósfera de nitrógeno a volumen cerrado de 40 l [24], con muestras de sodio de 100 a 400 gramos. En este caso el sodio estaba retenido en una posición superior y se dejaba caer sobre un lecho de agua. En este caso se registraban presiones máximas en torno a 20 bares.

6.3 Aplicaciones potenciales SWR en el ámbito de la energía

Si bien, en gran medida, los estudios SWR llevados a cabo están dentro del ámbito nuclear, y tienen que ver con la prevención de los efectos que puedan causar los accidentes al entrar en contacto agua y sodio, en esta tesis se quiere poner de manifiesto las grandes posibilidades energéticas que ofrece la reacción SWR, para poder ser aprovechada como una fuente de energía química, pudiendo complementar, o incluso, desplazar a determinadas aplicaciones de los procesos de combustión que hoy en día se realizan.

El ciclo Rankine es tal vez, el más utilizado en los procesos industriales y de generación eléctrica. Normalmente, el aporte entálpico al fluido caloportador lo hace una caldera de combustión. En estos procesos cabe estudiar la sustitución de la caldera por un reactor de sodio que tendría el esquema indicado en la siguiente figura.

Figura 8: Esquema en bloques de una caldera basada en la reacción SWR.

El esquema representa una caldera de sodio agua en forma idealizada. Consta de 4 recipientes: 1 alimentador de sodio, 2 vasija de reacción SWR, 3 depósito de agua, 4 intercambiador calor.

El modo de funcionamiento consiste en la generación de la reacción SWR en el recipiente 3, siempre con exceso de agua. La disolución sosa y agua con un nivel alto de entalpía, se circula al intercambiador de calor 4, donde hay un circuito de agua que se calienta por acción de la elevada entalpía de la disolución. El recipiente 1 inyecta sodio en el 2. El 3 inyecta agua cuando tras varias operaciones de inyección de sodio, la disolución contiene demasiada sosa.

El recipiente 3, también recibe la disolución excedente en sosa del recipiente 2. De esta forma el agua contenida en el recipiente 3 se va “dopando” hasta que llega un momento en que es necesaria su sustitución. Cabría también la opción de ir retirando la solución acuosa rica en sosa del recipiente 2, con lo cual el recipiente 3 se iría vaciando progresivamente. Esta opción necesitaría más volumen que la anterior al tener que duplicarse prácticamente el recipiente 3.

Todas estas operaciones se ejecutan mediante un sistema de control no representado en el esquema.

Con el proceso indicado se consigue elevar la entalpía del de agua que circula por el intercambiador, siendo este el fluido caloportador que realiza el ciclo de Rankine, pero sin la caldera convencional de combustión, con lo que no se producirían emisiones de gases de efecto invernadero. El recipiente de agua 3 es removible para tratar la sosa en la forma conveniente para su aprovechamiento.

Una segunda aplicación en la que puede tener interés el aprovechamiento energético de la caldera de sodio indicada en la figura anterior es para calentamiento del foco caliente de un motor Stirling. Si la caldera indicada, contiene aceite térmico en el fluido que pasa por el recipiente 4, será posible portar este fluido con temperaturas de hasta 250 °C hasta el foco caliente de un motor Stirling para conseguir una diferencia térmica elevada respecto de su foco frío y obtener rendimientos elevados.

De la misma forma, este generador de calor constituido en base a la reacción sodio – agua, podría formar parte de un ciclo BRAYTON en el cual se sustituiría la cámara de combustión por un intercambiado de calor en el que el fluido caliente procediese de un reactor sodio – agua.

También es posible usar la SWR en aplicaciones mecánicas que requieran el empleo de un aumento de presión, como es el caso de los motores de explosión.

Todas estas posibilidades indicadas sería objeto de líneas de investigación aparte de la que se ha seguido.

6.4 Sostenibilidad de la reacción SWR.

La reacción sodio-agua tiene como productos la formación de hidróxido sódico y agua, al tener como ingredientes sodio y agua en exceso. Esta forma de aprovechamiento del sodio como fuente de energía se puede hacer de forma sostenible integrada en un ciclo del Na, en el que el producto de esa reacción pueda ser utilizado para la síntesis, de nuevo, del reactivo necesario para la reacción.

De esa forma se tiene en exceso de agua un esquema del tipo:

El proceso Castner sirve para sintetizar el sodio a partir del NaOH mediante electrolisis [31]. En el proceso a partir de NaOH fundido a 330 °C. Tienen lugar las siguientes reacciones en los electrodos:

En consecuencia, se aprovecha el producto de la reacción (NaOH) para sintetizar de nuevo el sodio.

En este proceso es necesario aportar energía para conseguir la realización de ambas reacciones.

6.5 Almacenamiento Energético basado en la Reacción Sodio - Agua

Desde hace algunas décadas es bien conocida la importancia que se da a los sistemas de almacenamiento energético eléctrico. Las tecnologías disponibles son [33]:

- Mecánicas.
 - Aire comprimido (CAES). Se utilizan cavernas, grutas naturales o instalaciones preparadas en las que se inyecta aire comprimido mediante bombeo, activando los respectivos motores mediante energía eléctrica excedente. Cuando se requiere energía eléctrica, se recupera parte del aire inyectado haciéndolo pasar por turbinas conectadas a generadores eléctricos, produciendo, así, energía eléctrica. Es una tecnología parcialmente madura.
 - Hidráulica de bombeo. En las proximidades de las presas se recircula hacia el embalse el agua liberada mediante bombeo con la energía eléctrica

excedente, recuperando para el embalse determinadas cantidades de agua. Es una tecnología madura.

- Volantes de inercia. Consiste en almacenar la energía eléctrica en forma de energía cinética en volantes de inercia que están actuados por un motor en su eje. La energía eléctrica se extrae poniendo al motor en forma de generador conectado a la red. Es una tecnología madura a muy poca escala.
- Almacenamiento electroquímico.
 - Almacenamiento interno. Baterías REDOX de Vanadio (VRB). Son escalables en capacidad eléctrica y energética, pero necesitan manejo de grandes cantidades de productos químicos ácidos.
 - Almacenamiento interno. Baterías de NaS. Tienen una alta eficiencia (75-85%). E escalable en grandes instalaciones. Requieren unas elevadas temperaturas de operación 290 – 390 C, ya que el sodio y el azufre deben estar en fase líquida.
- Electroquímicas.
 - Almacenamiento de hidrógeno. Se genera hidrógeno a partir del agua mediante hidrólisis, con la energía eléctrica excedente. Se almacena el hidrógeno en emplazamientos o tanques. Es la tecnología con mayor densidad energética. Presenta dificultades de seguridad en el almacenamiento y la manipulación.
- Térmicas.
 - Almacenamiento de sales fundidas. En las centrales solares se licúan sales fundiéndolas hasta unas temperaturas de 390 C. El calor almacenado se transfiere a electricidad mediante intercambio con u intercambiador de calor con agua, produciendo vapor que mueve una turbina acoplada a un generador. No se requiere energía eléctrica durante el almacenamiento. Es una solución a gran escala.

Hay otras tecnologías de menor relevancia que no se citan.

La síntesis de sodio, no investigada desde hace más de 100 años, está basada en la hidrólisis de la sal común (ClNa método de Down) y de la sosa caústica NaOH (método de Castner). Debido a que ambas síntesis utilizan la energía eléctrica como medio energético, la producción de sodio podría ser considerada de facto, como un proceso de descarga proveniente del almacenamiento de energía eléctrica en forma química, ya que una parte de la energía eléctrica invertida en la producción de sodio, se empleará en otro momento y circunstancia para generar energía en otros procesos y en otras formas; por ejemplo en la propulsión de vehículos.

La energía eléctrica requerida bien podría venir de la eólica, en los momentos en los que el parque no estuviese enganchado a la red por estar fuera de contrato del *pool* energético.

7 PROPULSIÓN COHETE

El motor cohete es un sistema de propulsión que, por medio de la emisión de gases a muy alta velocidad, propulsa al móvil que impulsa mediante un empuje según el principio de acción y reacción.

La siguiente Tabla 3 presenta una clasificación genérica de los motores cohete [28].

Tabla 3: Clasificación de los motores cohete.

Sistema de propulsión		I_{sp} (segundos)	ΔV (km/s)	E/gM (-)	Max. E (N)	Propulsantes típicos
Química	Sólido	150-300	6-7	10^2	10^7	NG, NC, HTPB, N_2O_2 , O_2 , H_2 , N_2H_4 , RP-1, etc...
	Híbrido	200-400	7-10			
	Líquido	300-500	7-12			
Nuclear	Fisión	600-800	10-20	3×10^1	10^8	H_2
	Fusión	1,000-10,000	20-100	10^1	10^8	
Eléctrica	Electrotérmicos	150-1,200	3.5-30	10^{-4} - 10^{-2}	10^1	H_2 , NH_3 , N_2H_4 , Ca, Xe, Kr, Ar, Teflón,
	Electroestáticos	1,200-10,000	30-250	10^{-4} - 10^{-4}	3×10^{-1}	
	Electromagnéticos	700-5,000	15-100	10^{-4} - 10^{-4}	10^2	

Las magnitudes que se comparan en la tabla son: I_{sp} impulso específico, ΔV incremento de velocidad, E/gM relación empuje masa y Max. E máximo empuje. En esta tesis el interés se centra en los sistemas de propulsión química y dentro de estos en los del tipo sólido, denominados SFR (Solid Fuel Rocket) o cohetes de propulsante sólido.

7.1 Tecnología básica de la Propulsión cohete

Conceptualmente los SFR están constituidos por una carcasa cilíndrica que en su parte anterior va unida a lo que es la carga útil del cohete y en la posterior a la tobera por donde se eyectan los gases de la combustión del propulsante [28]. Este consiste en una masa sólida cilíndrica que ocupa casi la totalidad del espacio vacío de la carcasa. En su composición lleva el combustible mezclado con el comburente, lo cual asegura su combustión una vez se inicia con la llama de una pequeña carga de pólvora, denominada iniciador o *ignitor*.

Los gases que se generan en la combustión del propulsante son acelerados por acción de la tobera y en consecuencia el cohete experimenta un empuje que lo propulsa. Un esquema de este tipo de propulsor se muestra en la figura.

Figura 9: Esquema básico de un motor cohete de propulsante sólido.

El propulsante, en su forma cilíndrica puede estar ranurado con geometrías muy diversas, para conseguir distintas formas de progresión de la llama de combustión, lo cual conferirá diferentes curvas de presión de cámara y, por consiguiente, de empuje del motor.

7.2 Magnitudes empleadas

Para conocer las capacidades de los propulsores integrados con la cámara de combustión, se han concebido una serie de magnitudes físicas que, dando un valor numérico, permiten hacer una calificación cuantitativa de los mismos. Entre estas, las más comunes son [26, 28]:

Velocidad característica. Supone una evolución iso-entrópica de la combustión hasta la garganta de la tobera y en condiciones uniformes.

Su expresión final es:

$$c^* = \frac{\sqrt{R \cdot T_c}}{\Gamma(\gamma)} \quad (1)$$

Donde R es la constante de los gases de la combustión, calculada a partir de su masa molecular media M y de la constante universal de los gases R :

$$R = \frac{R}{M} \quad (2)$$

T_c es la temperatura de cámara y $\Gamma(\gamma)$, se obtiene de la relación (γ) de calores específicos de los gases, cuya función tiene la siguiente expresión:

$$\Gamma(\gamma) = \sqrt{\gamma} \cdot \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{\frac{\gamma+1}{2 \cdot (\gamma-1)}} \quad (3)$$

Esta magnitud está relacionada con el grado de liberación de energía alcanzado en la combustión, por lo que caracteriza el propulsante con el diseño de la cámara de combustión.

Coeficiente de empuje. Mide la eficiencia de la tobera. La expresión es:

$$C_E = \frac{E}{P_c \cdot A_g} \quad (4)$$

Siendo, E el empuje, P_c la presión de cámara y A_g el área de garganta de la tobera.

Impulso específico. El impulso específico es una medida del impulso producido por unidad de propulsor gastado y se mide en m/s. También se puede definir como el tiempo durante el cual una unidad de peso de propulsante genera una unidad de empuje, en este caso sus unidades son segundos (s). La expresión en función de la velocidad característica es:

$$I_{sp} = c^* \cdot C_E \quad (5)$$

Su valor es un indicativo de la eficiencia del propulsante. El valor de la magnitud dada en m/s o en segundos, viene de que el impulso específico tiene por unidades sin simplificar N·s/kg (reduciendo quedan m/s), pudiéndose expresar, también, el impulso específico dividiendo su valor dado en N·s/kg por el valor de $1g$ (9.817 m/s^2), quedando, en consecuencia, en unidades de segundo.

7.3 Capacidades de los propulsores convencionales

De las tres magnitudes anteriores, la que sirve para valorar las capacidades de distintos propulsores entre sí, es el impulso específico, ya que no depende ni de las condiciones de la cámara ni de la eficiencia de la tobera.

De acuerdo con George P. Sutton [26], los impulsos específicos de los propulsores más comunes, son los siguientes:

Tabla 4: Impulsos específicos para distintas formulaciones de propulsores.

Propulsante	Impulso Específico	
	(s)	(m/s)
DB	220-230	2160-2259
DB/AP/Al	260-265	2553-2602
DB/AP-HMX/Al	265-270	2602-2651
CTPB/AP/Al	260-265	2553-2602
HTPB/AP/Al	260-265	2553-2602
PBAA/AP/AL	260-265	2553-2602

Los propulsores se indican por sus componentes básicos:

DB doble base (nitroglicerina y nitrocelulosa)
 AP perclorato amónico
 Al Aluminio
 HMX tetranitramina ciclotetrametileno
 CTPB polibutadieno carboxi terminal
 HTPB polibutadieno hidroxil terminal
 PBAA ácido polibutadieno acrílico

Los propulsores se han caracterizado con una presión de cámara de 70 bar y una expansión de tobera hasta 1 bar, según condiciones normalizadas.

8 ESTUDIO DE CARACTERIZACIÓN DE LA REACCIÓN SODIO-AGUA

Una vez analizado el estado del arte de los propulsores sólidos, se ha procedido a analizar la conveniencia de la reacción Sodio-Agua para su posible utilización como tal. Para ello se ha estudiado su viabilidad energética, se ha evaluado la reacción mediante simulación con un código específico (CEA), se han establecido el diseño y la realización de un desarrollo experimental para su validación, el análisis de los datos de la experimentación, y el desarrollo de una metodología para su aplicación en el diseño de motores cohete para la determinar la mezcla de los reactivos más eficiente.

8.1 Caracterización de la SWR por medio de la presión y del volumen.

La caracterización experimental de la reacción SWR se ha realizado en un reactor especialmente diseñado para medir y albergar con seguridad ensayos de combinación de sodio y agua en el interior de una celda aislada y blindada. En los ensayos se ha controlado la masa de los ingredientes y el volumen libre del recipiente (volumen del vaso menos el volumen de los reactivos), donde tenía lugar la reacción, siempre en condiciones de vaso cerrado.

La variable fundamental medida ha sido la presión. También se ha medido la temperatura, pero en la disolución acuosa que se generaba por los productos de reacción. Al estar su valor afectado por las fugas de calor, principalmente por las paredes, no ha aportado información relevante al análisis de la reacción, por lo que no se ha podido integrar en la presentación de los resultados, ni obtener conclusiones fiables. Las condiciones iniciales de presión y temperatura han sido las de ambiente.

La presión es el dato principalmente requerido para determinar la capacidad de utilización de la reacción como propelente en aplicaciones aeronáuticas, y que proporcionará el impulso a través de la tobera del motor cohete. Por ello los ensayos realizados se ha hecho en un volumen constante, que en el caso del reactor utilizado es de 3.8 litros, volumen reducido en comparación con los escasos experimentos que se han realizado hasta la fecha, puesto que se busca la viabilidad de la reacción como propelente, y no desde el punto de vista de la seguridad en aplicaciones energéticas

Los ensayos han sido agrupados en cuatro familias dependientes de la masa de los ingredientes; concretamente 200g, 300g, 400 g y 500g, con las aportaciones de Sodio y Agua descritos en la

Tabla 5. A su vez, dentro de cada familia, se ha variado la composición másica de estos ingredientes, teniendo al final los casos indicados en la tabla siguiente. Cada ensayo se repite tres veces, para tener un control estadístico de resultados. Los ensayos con irregularidades de funcionamiento se repiten, así como los que han dado resultados anómalos. De esa forma se ha logrado identificar experimentalmente un conjunto de medidas estadísticamente coherentes.

Tabla 5: Conjunto de mezclas Sodio-Agua analizadas.

Masa Ingredientes							
200 g		300 g		400 g		500 g	
Na (g)	H ₂ O (g)	Na (g)	H ₂ O (g)	Na (g)	H ₂ O (g)	Na (g)	H ₂ O (g)
10	190	20	280	20	380	20	480
20	180	30	270	30	370	30	470
30	170	40	260	40	360	40	460
40	160	50	250	50	350	50	450
50	150	60	240	60	340	60	440
		70	230	70	330	70	430
		80	220	80	320	80	420
						90	410

La reacción entre sodio y agua es muy rápida y violenta. No requiere elementos iniciadores ni catalizadores. Por este motivo, el reactor donde se realiza esta reacción debe estar preparado para que se produzca la unión de ambas sustancias en el momento adecuado y con la masa de los ingredientes al completo. Ambos requerimientos son complicados de conseguir, sobre todo si hay que garantizar que la reacción se realice a presión constante, sin fugas.

8.2 Análisis teórico del experimento

Se han desarrollado pocos modelos de cálculo y simulación de la reacción sodio-agua. De entre las pocas opciones disponibles se ha seleccionado un código de la NASA denominado CEA diseñado para llevar a cabo este tipo de balances químicos de reacción orientada al estudio de propulsantes [27]. Con el objeto de evaluar la capacidad del software CEA como herramienta adecuada para el cálculo termoquímico de la reacción sodio – agua, se realiza el cálculo de uno de los experimentos realizados y se comparan los resultados obtenidos por el software con los del experimento.

Para ello se utiliza el módulo de cálculo HP, en el cuál se aporta como datos la entalpía específica de los ingredientes dividida por la constante universal de los gases, la presión que sale del experimento y la composición másica de los ingredientes. La entalpía específica de los reactivos se calcula a partir de los datos obtenidos en NIST (*National Institute of Standard ad Technology*).

En el experimento de verificación y cualificación del código se toma la mezcla de 70 gramos de sodio y 330 gramos de agua, en un volumen de 3,828 litros.

El cálculo de la energía específica por mol de sodio se presenta en el siguiente informe generado por el CEA:

$$t_s := 280 \cdot \frac{K}{1000 \cdot K} \quad \Delta H_{f_Na} := 2.41 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

$$\begin{aligned} A_s &:= 40.25707 & D_s &:= -3.641872 & H_s &:= 2.406001 \\ B_s &:= -28.23849 & E_s &:= -0.0798774 \\ C_s &:= 20.69402 & F_s &:= -8.782300 \end{aligned}$$

$$\Delta H_{Na} := \left(A_s \cdot t_s + \frac{B_s}{2} \cdot t_s^2 + \frac{C_s}{3} \cdot t_s^3 + \frac{D_s}{4} \cdot t_s^4 - \frac{E_s}{t_s} + F_s - H_s \right) \cdot \frac{kJ}{mol} = -0.592 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

$$H_{Na} := \Delta H_{Na} + \Delta H_{f_Na} = 1.818 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

De forma análoga, para el cálculo de la energía específica por mol de agua se obtiene el siguiente informe de resultados:

$$H_{Na} := \Delta H_{Na} + \Delta H_{f_Na} = 1.818 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

$$t_a := 280 \cdot \frac{K}{1000 \cdot K} \quad \Delta H_{f_H2O} := -285.8 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

$$\begin{aligned} A_a &:= -203.6060 & D_a &:= 2474.455 & H_a &:= -285.8304 \\ B_a &:= 1523.290 & E_a &:= 3.855326 \\ C_a &:= -3196.413 & F_a &:= -256.5478 \end{aligned}$$

$$\Delta H_{H2O} := \left(A_a \cdot t_a + \frac{B_a}{2} \cdot t_a^2 + \frac{C_a}{3} \cdot t_a^3 + \frac{D_a}{4} \cdot t_a^4 - \frac{E_a}{t_a} + F_a - H_a \right) \cdot \frac{kJ}{mol} = -1.37 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

$$H_{H2O} := \Delta H_{H2O} + \Delta H_{f_H2O} = -287.17 \cdot \frac{kJ}{mol}$$

El cálculo del número de moles de sodio y agua se realiza según:

$$\begin{aligned} m_{Na} &:= 70 \cdot gm & m_{H2O} &:= 330 \cdot gm \\ Pm_{Na} &:= 23 \cdot \frac{gm}{mol} & Pm_{H2O} &:= 18 \cdot \frac{gm}{mol} \\ mol_{Na} &:= \frac{m_{Na}}{Pm_{Na}} = 3.043 \cdot mol & mol_{H2O} &:= \frac{m_{H2O}}{Pm_{H2O}} = 18.333 \cdot mol \end{aligned}$$

El Cálculo de la entalpía específica de los ingredientes de la reacción se tiene como:

$$H_{\text{reac}} := H_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \text{mol}_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{Na}} \cdot \text{mol}_{\text{Na}} = -5259 \cdot \text{kJ}$$

$$h_{\text{reac}} := \frac{H_{\text{reac}}}{(m_{\text{Na}} + m_{\text{H}_2\text{O}})} = -13148 \cdot \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para el cálculo de la entalpía específica de los ingredientes dividida entre la constante universal de los gases se tiene:

$$\underline{R} := 8314 \cdot \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \quad \frac{h_{\text{reac}}}{R} = -1581 \cdot \frac{\text{mol} \cdot \text{K}}{\text{gm}}$$

La relación másica de los ingredientes es: 0.175 Na, 0.825 H₂O.

La presión que se introduce es la presión pico obtenida del experimento: 47 bar, y que se obtiene de la gráfica siguiente, que muestra la variación de la presión en función del tiempo, consecuencia de la reacción. La presión introducida el cálculo es la de pico (47 bar). En la sección siguiente se explica en detalle el aparato experimental utilizado

Figura 10: Curva de presión para un dosado de 70 gramos de sodio y 330 gramos de agua, en un volumen del reactor de 3,828 litros.

El resultado del cálculo que sirve para ser comparado con el del experimento, es la densidad de los productos. En el Anexo 3 se muestra el listado de resultados que suministra el software para el caso estudiado, en el que se resalta la densidad calculada. Los resultados finales obtenidos son:

Densidad según CEA:	105.7 kg/m ³
Densidad en experimento:	104.5 kg/m ³
Diferencia porcentual:	1.2%

Con estos datos, se puede afirmar que los resultados y las simulaciones de la reacción son compatibles.

8.3 Método de Ensayo. Descripción del Experimento

En las instalaciones de nuestro laboratorio se ha diseñado y utilizado un reactor que consigue reunir las tres capacidades descritas: control del momento de iniciación de la reacción, inicio de la reacción con toda la masa de ambos componentes y presurización de la reacción.

El esquema de los elementos utilizados en los ensayos es el que se indica en la siguiente figura:

Figura 11: Esquema de la Instalación para caracterización de la reacción sodio agua en vaso cerrado.

La nomenclatura de los elementos que intervienen es la siguiente:

- A Compresor de aire
- B Cilindro receptor de agua para el ensayo
- C Data Logger
- D Reactor de reacción sodio – agua
- E Recipiente de recogida de productos líquidos de la reacción

F Recipiente de borboteo

La nomenclatura de las mangueras es:

- L1 Manguera de aire a presión
- L2 Manguera de conducción de agua a presión
- L3 Manguera de evacuación de aire
- L4 Manguera de alivio de presión después de la reacción. Se conecta alternativamente a la L3
- L5 Evacuación de productos líquidos de la reacción

La nomenclatura de los cables es:

- W1 Cable de datos del transductor de presión
- W2 Cable de datos del sensor de temperatura

El reactor se describe en la **Figura 12**. Consiste en un cuerpo vertical cilíndrico (5) de paredes gruesas en acero inoxidable, con una tapa superior (1) y una inferior (13). Contiene un cuerpo cilíndrico denominado “cilindro receptor de agua” (19), con una tapa (4) soldada en su parte superior, que tiene dos orificios: uno para la admisión de agua (14), al cual va roscada una válvula antirretorno (25), y otro orificio para la salida del aire (15) que se evacúa conforme va entrando el agua. Esta salida de aire se abre o cierra por medio de la válvula 24.

En el cuerpo del reactor (5) hay un orificio pasante (32) para la toma de medidas por el transductor de presión (30). Hay otros dos orificios que no son de aplicación para estos ensayos y están cerrados por sus respectivos tapones (7, 9).

La tapa inferior del reactor (13), recibe la muestra de sodio en su plano superior (26). Tiene dos orificios: uno es para el sensor de temperatura (31) y el otro, controlado por la válvula de cierre (27), para el vaciado de los productos líquidos de reacción.

Las características básicas del reactor se muestran en la Tabla 6.

Figura 12: Reactor utilizado para los ensayos SWR en volumen cerrado.

Tabla 6: Características del reactor experimental.

Parámetro	Valor	Unidad
Altura interior	425	mm
Diámetro interior	105	mm
Altura exterior	596	mm
Diámetro exterior	220	mm
Volumen interior	3.8	l
Diámetro del cilindro de agua	83	mm
Altura del cilindro de agua	191	mm
Rango de presión del transductor	INDUSENS Serie 500, range: 0-600 bar	
Termopar	K-type, range 0-500 °C	

Se ha utilizado la siguiente instrumentación equipo de adquisición de datos:

- Transductor de temperatura: Termopar tipo K (níquel-cromo/níquel) efecto Seebeck, rango medida 0-500 °C.
- Pressure Transducer INDUSENS Serie 500, rango de medida 0-600 bar.
- Amplifier System MGCplus AB22A de HBM
- Software de adquisición y procesamiento de datos CATMAN

La operación de un ensayo pasa por las siguientes fases:

1. Preparación

1. Se coloca la membrana de obturación (21) en el cilindro receptor de agua (19)
2. Con el reactor abierto (tapa (1) desenroscada), se colocan en el fondo del recipiente la muestra de ensayo de sodio (26) y la varilla percutora (22).
3. Se introduce en el reactor el cilindro receptor de agua (19), con su membrana elástica (21) acoplada y se cierra el reactor roscando la tapa (1).
4. Se conecta la manguera de inyección de agua (23) en la válvula antirretorno (25) del reactor, se abre la válvula de salida de aire (24) y se cierra la válvula de vaciado (27).
5. En el recipiente de agua (B) se introduce la cantidad de agua que va a reaccionar.

2. Inyección de agua

1. Mediante el compresor (A) se inyecta aire comprimido en el recipiente de agua por medio de la manguera L1. El agua es conducida hacia el interior del cilindro receptor de agua (19) a través de la manguera (L2-23), y queda depositada sin posibilidad de fugarse por impedirlo la membrana (21). El agua queda almacenada en el cilindro receptor de agua (19) y en una posición superior respecto del sodio (26) dentro del reactor.
2. A medida que el agua se ha introducido en el cilindro receptor de agua (19), el aire presente se ha ido desalojando a través de la válvula de salida de aire (24), siendo conducido por la manguera L3 a un recipiente de cristal (E-20) que contiene agua y hace que se produzca un borboteo.
3. Se sabe cuándo se ha inyectado la masa total de agua necesaria para la reacción porque el borboteo pasa a ser muy intenso. En este momento se cierra la válvula de salida de aire (24) y se pone en modo grabación el Data Logger (C), que comienza a grabar datos de Temperatura (W2) y Presión (W1).

3. Inicio de la reacción.

1. Se pone en marcha de nuevo el compresor (A) que ahora inyecta solamente aire a través del recipiente de agua (B) por la manguera de inyección de agua (L2-23), al no tener ya agua en su interior. El aire pasa, a través de la válvula unidireccional (25) al interior del cilindro receptor de agua (19) en el interior del reactor.
2. El aire entrante provoca que la membrana (21) situada en la sección inferior se vaya hinchando, hasta que toca la punta de la varilla percutora (22) y revienta, liberando el agua que cae en masa sobre la muestra de sodio, produciéndose la reacción.

4. Fin del registro de datos

1. Se espera un tiempo de 1 ó 2 minutos, para comprobar en el Data Logger (C) que la presión se estabiliza.
2. Se conecta a la válvula de salida de aire (24) la manguera de evacuación de vapores (L4), y se abre progresivamente hasta que la presión en el reactor cae a la atmosférica.
3. Se para el registro de datos en el Data Logger (C).

4. Se abre la válvula de vaciado (27) y el contenido líquido cae sobre el recipiente E -29 preparado al efecto, con la finalidad de poder medir la masa de este líquido.
5. Se abre el reactor desenroscando la tapa (1) y se procede a su limpieza con agua abundante, realizando después un secado para el inicio de una nueva operación.

La curva de presión típica de esta reacción en las condiciones de operación descritas, tiene la forma que se expone en la **Figura 13**. La curva representada en este ejemplo es de una reacción de 70 g de sodio y 230 g de agua. La despresurización final que muestra la curva es debido a la apertura de la válvula 24, que se hace al dar por concluida la reacción.

Figura 13: Curva típica de presión tiempo registrada en los ensayos.

La aparición de los dos picos de presión ha sido ya descrita por Sofia Carnevali, et. al. [24]. El primer tipo es debido a la propia reacción de sodio-agua, con un segundo pico más pronunciado debida a la reacción del hidrógeno producido. El pico representa la llegada de la onda de presión al sensor procedente del comienzo súbito de cada reacción. La presión final de reacción y de interés para la aplicación sería la que se encuentra estabilizada.

Se observa cómo después de la pronunciada caída de la presión a partir del pico máximo, hay una leve y progresiva caída de la curva. Es debida al enfriamiento de los productos de reacción en el reactor, ocasionada, fundamentalmente por la transmisión de calor y la consecuente pérdida energética por las paredes del recipiente. La fuerte caída posterior se produce al abrir la válvula de evacuación del cilindro al final de la toma de datos para la extracción de los productos de la reacción.

8.4 Tratamiento de Datos y Exposición de resultados experimentales

De cada experimento se obtiene una curva semejante a la presentada, de la cual es necesario obtener el valor de la presión. El comportamiento que se describe en la curva, a partir del pico de presión máxima, es el de un fenómeno de relajación. Por tanto, se trata de obtener la presión en condiciones de relajación. Se han seguido los siguientes pasos

1. Se minora la presión de pico (la más elevada), por un coeficiente de valor entre 0.3 y 0.5, para obtener un valor que esté en una franja de 10% a 15% por encima de la curva en condiciones estacionarias (p_c).
2. Se obtiene el valor de la variable tiempo (t_c) para la presión minorada.
3. Se obtiene la constante temporal de relajación aplicando la expresión:

$$\tau = \frac{t_c}{\ln \frac{1}{0.3}} \quad (6)$$

4. Se aplica un incremento de tiempo $5 \cdot \tau$, desde el valor correspondiente al de la presión de pico, y se lee el valor de la presión resultante en la gráfica. Este valor es el de la presión de relajación.

Posteriormente se halla la media en los experimentos realizados con la misma composición de ingredientes, indicados en la tabla 5, siendo este valor el registrado.

Se obtiene el producto de la presión registrada por el volumen libre, que consiste en restar del volumen del reactor vacío el volumen ocupado por los ingredientes de la reacción.

Representando en una gráfica por familias las reacciones (masa de los ingredientes 200 g, 300 g, 400 g y 500 g), para cada masa proporcional de sodio el correspondiente valor del producto presión registrada por volumen libre, resulta la gráfica que se presenta en la figura.

Figura 14: Líneas de tendencia que caracterizan la reacción sodio agua en vaso cerrado, agrupadas por masa de ingredientes.

Las cuatro rectas marcan las líneas de tendencia de cada familia. Se observa un comportamiento muy lineal en el dominio estudiado. Las líneas de los extremos indican la frontera del dominio, donde tiene validez el estudio realizado. Se han encontrado dificultades para realizar ensayos con proporciones más elevadas de sodio, ya que implicaban acercarse a las proporciones estequiométricas. En estas condiciones, debido a la rápida vaporización de una parte importante del agua, el sodio que por el calor está en fase líquida, sale proyectado, por la acción de las ondas de presión que se generan durante la reacción, depositándose trazas de sodio sin reaccionar en la parte superior de las paredes del reactor. Sin embargo, cuando la proporción de sodio es menor, la reacción se completa consumiendo todo el sodio, porque el agua consigue mojar cualquier traza proyectada.

Las cuatro líneas de tendencia tienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 \text{Ingredientes 500 g: } y &= 35269 \cdot x - 724,52 \\
 \text{Ingredientes 400 g: } y &= 28207 \cdot x - 613,13 \\
 \text{Ingredientes 300 g: } y &= 17851 \cdot x - 245,73 \\
 \text{Ingredientes 200 g: } y &= 11681 \cdot x - 308,71 \quad (7)
 \end{aligned}$$

El valor y hace referencia al producto de la presión por el volumen libre ($P \cdot V$) y el x a la proporción másica de sodio ($m\%Na$).

8.5 Método experimental para determinar la proporción de ingredientes que determinan la presión en un volumen determinado

La gráfica anterior va a permitir conocer qué proporción de ingredientes sodio – agua y en qué volumen van a dar una presión determinada de antemano.

El método es el siguiente:

1. Se establece una presión objetivo (P_r) que es necesario conseguir, en un recipiente de un volumen determinado (V_r).
2. Se entra en la gráfica leyendo en ordenadas el producto $P_r \cdot V_r$ y se elige una de las rectas de masa de reactivos leyendo la abscisa correspondiente %Na, o bien despejando de su propia ecuación $y = a \cdot x + b$, el valor de x .
3. Con la masa de los reactivos y el %Na se obtiene el volumen libre V_l .
4. Se entra de nuevo en la gráfica ahora con el producto $P_r \cdot V_l$ y sobre la línea elegida antes de masa de reactivos se vuelve a leer la nueva abscisa %Na, o como se ha indicado se despeja de la ecuación correspondiente el valor de x ,

$$x = \frac{y-b}{a} \quad (8)$$

5. Repetir los pasos 3 y 4 hasta que se cumpla:

$$V_{l,i} - V_{l,i-1} < \varepsilon \quad (9)$$

Siendo ε un error admisible previamente fijado.

6. Finalmente se ha obtenido la cantidad de sodio sobre la masa de reactivo que para un volumen libre V_l da una presión objetivo P_r que será la presión de relajación de la reacción buscada.

8.6 Ejemplo de aplicación del método

En una cámara cilíndrica de $L_c = 120 \text{ mm}$ de longitud y diámetro $D_c = 70 \text{ mm}$, se quiere conocer la masa de los reactivos (sodio y agua, de densidades 980 kg/m^3 y 1000 kg/m^3 , respectivamente) para conseguir una presión de relajación de 100 bar. Se considera un error en volumen $\varepsilon \leq 0,001 L$.

Se siguen los pasos del método:

Paso 1. La presión objetivo es $P_c = 100 \text{ bar}$

Paso 2. Cálculo de la proporción másica de sodio.

Se obtiene inicialmente para el volumen del recipiente vacío,

$$V_c = \pi \cdot \frac{D_c^2}{4} \cdot L_c = 0,462 \text{ L}$$

La energía medible de la reacción es:

$$V_c \cdot P_c = 4618 \text{ J}$$

Entrando en la gráfica, se decide escoger la opción de la línea de masa de reactivos 300 g.

$$m_r = 300 \text{ g}$$

Despejando de la ecuación correspondiente la proporción másica de sodio, se tiene:

$$\%Na_1 = \frac{P_c \cdot V_c + 245.73}{17851} = 0,272$$

Paso 3. Cálculo del Volumen Libre.

La masa de sodio es: $m_{Na_1} = m_r \cdot \%Na_1 = 82 \text{ g}$

La masa de agua: $m_{H_2O_1} = m_r - \%Na_1 = 218 \text{ g}$

Volumen Libre: $VL_1 = V_c - \frac{m_{Na_1}}{\rho_{Na}} - \frac{m_{H_2O_1}}{\rho_{H_2O}} = 0,160 \text{ L}$

Paso 4. Cálculo de la proporción másica del sodio con el Volumen Libre obtenido.

$$\%Na_2 = \frac{P_c \cdot VL_1 + 245.73}{17851} = 0,103$$

Paso 5. Repetición pasos 3 y 4 hasta que el error en Volumen Libre sea inferior a ε

La masa de sodio es: $m_{Na_2} = m_r \cdot \%Na_2 = 31 \text{ g}$

La masa de agua: $m_{H_2O_2} = m_r - \%Na_2 = 269 \text{ g}$

$$\text{Volumen Libre:} \quad Vl_2 = V_c - \frac{m_{Na,2}}{\rho_{Na}} - \frac{m_{H_2O,2}}{\rho_{H_2O}} = 0,161 \text{ L}$$

$$\text{Se verifica que } Vl_2 - Vl_1 = 0,001 \text{ L} \leq \varepsilon$$

Por lo que se concluye que, para obtener una presión de relajación de 100 bar en la cámara considerada, es necesario que los reactivos sean 31 g de sodio y 269 g de agua. EL Volumen Libre que queda es 0,161 L.

8.7 Figura de mérito

Además de la agrupación de resultados por familias, expuesto en la figura 14, se puede conseguir una figura adicional de mérito agrupándolos según la expresión $\frac{P \cdot Vl}{m}$ en función de la fracción de sodio en masa x_{Na} , siendo P la presión de relajación en Pa, Vl el volumen libre de la cámara de reacción en m^3 , y m la masa total de los reactivos en gramos. La siguiente figura expone el resultado. Se ven los datos experimentales agrupados en torno a una recta, cuya ecuación es:

$$\frac{P \cdot Vl}{m} = 55,808 \cdot x_{Na} \quad R^2=0,9452 \quad (10)$$

Con el dato de regresión indicado, se infiere una buena aproximación de los resultados respecto de la regresión lineal.

La gráfica posibilita obtener la necesaria proporción de sodio – agua que en un cierto volumen libera una determinada presión.

Figura 15: Línea de tendencia resultante que caracterizan la reacción sodio agua en vaso cerrado.

Igual que en el caso anterior de las familias de curvas de regresión lineal, es posible ahora determinar la proporción de ingredientes de forma general, de manera que, para un volumen dado, produce una cierta presión. El método es como sigue:

1. Establecer la presión (P) objetivo a alcanzar en un determinado volumen (V).
2. Se escoge una masa de reactivos inicial (m), obteniendo una fracción preliminar de sodio (xNa), para la presión objetivo.
3. Obtener el volumen libre VI, restando el volumen ocupado por los reactivos del volumen interior de la cámara V.
4. Iterar con el volumen libre estimado (VI) y la presión objetivo, repitiendo los pasos 1 y 2 hasta obtener la correcta fracción de sodio (xNa).
5. Repetir las iteraciones hasta alcanzar un error admisible ε , definido por:

$$V_{l,i} - V_{l,i-1} < \varepsilon$$

8.8 Ejemplo de aplicación del método con la figura de mérito

Se repite el ejemplo anterior para comprobar la equivalencia de los resultados.

1. Presión objetivo de cámara $P_c = 100$ bar.

2. Cálculo porcentual de la masa:

Volumen interior del reactor vacío:

$$V_c = \pi \cdot \frac{D_c^2}{4} \cdot L_c = 0,462 \text{ L}$$

El producto de ambos, resulta:

$$V_c \cdot P_c = 4618 \text{ J}$$

Asumiendo una masa de reactivos de 300 g:

$$m_r = 300 \text{ g}$$

Se resuelve la ecuación correspondiente a la relación indicada en la figura:

$$\%Na_1 = \frac{P_c \cdot V_c}{m \cdot 55.808} = 0,276$$

3. Se calcula el volumen libre:

$$\text{Masa de sodio: } m_{Na_1} = m_r \cdot \%Na_1 = 82,7 \text{ g}$$

$$\text{Masa de agua: } m_{H_2O_1} = m_r - \%Na_1 = 217,3 \text{ g}$$

$$\text{Volumen libre: } Vl_1 = V_c - \frac{m_{Na_1}}{\rho_{Na}} - \frac{m_{H_2O_1}}{\rho_{H_2O}} = 0,160 \text{ L}$$

4. Cálculo de la proporción de masa de sodio en el volumen libre calculado:

$$\%Na_2 = \frac{P_c \cdot Vl_1}{m \cdot 55.808} = 0,103$$

5. Iteración de los pasos 3 y 4 hasta que el error del volumen libre sea menor que ε :

$$\text{Masa de sodio: } m_{Na_2} = m_r \cdot \%Na_2 = 31 \text{ g}$$

$$\text{Masa de agua: } m_{H_2O_1} = m_r - \%Na_1 = 269 \text{ g}$$

$$\text{Volumen libre: } Vl_2 = V_c - \frac{m_{Na_2}}{\rho_{Na}} - \frac{m_{H_2O_2}}{\rho_{H_2O}} = 0,161 \text{ L}$$

$$\text{Error: } Vl_2 - Vl_1 = 0,001 \text{ L} \leq \varepsilon$$

En consecuencia, se necesitan 31 g de sodio y 269 g de agua para obtener una presión de relajación de 100 bar en una cámara de reacción con un volumen libre de 0,161 L.

8.9 Verificación experimental

Las ecuaciones obtenidas en la fase experimental han sido verificadas mediante pruebas adicionales, en las que se ha modificado el volumen de la cámara de reacción mediante la inserción de varios discos de teflón, para disminuir la capacidad del recipiente. Por sus características tienen un comportamiento inerte durante la reacción.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla. La columna Vr muestra el volumen disponible en la cámara de reacción. La columna P indica la presión de relajación obtenida en cada test. La columna P·VI* indica el valor experimental (producto de la presión de relajación P y el volumen libre VI). Finalmente, la columna P·VI** muestra el valor obtenido del método explicado.

Las diferencias entre las dos últimas columnas se indica en la columna Dif mediante porcentajes. Los valores obtenidos son aceptables en la fase de diseño de la cámara de combustión de un cohete, donde los coeficientes de seguridad estructural se mueven entre 1,4 y 1,6 veces la máxima tensión de diseño y los test se realizan con 1,15 a 1,25 veces la máxima presión de diseño. Por lo tanto, el método resulta consistente.

Tabla 7: Experimentos de validación.

Na (g)	H2O (g)	Vr (l)	P (bar)	%Na	P·VI* (Pa·m ³)	P·VI** (Pa·m ³)	Dif.
60	450	2.717	14.68	0.118	3280.1	3424.8	-4.4%
50	350	3.136	10.4	0.125	2881.6	2912.6	-1.1%
50	250	2.717	12.21	0.167	2988.4	2729.4	8.7%
50	150	2.717	9.324	0.250	2376.5	2611.5	-9.9%

9 SISTEMA DE MOTOR COHETE CON PROPULSIÓN SWR

Realizada la caracterización de la reacción sodio – agua, la siguiente tarea necesaria consiste en conseguir una reacción continuada que tenga una duración en torno a 10 segundos, de forma que proporcione unas condiciones de vuelo propulsado duraderas, respecto a los cohetes de propulsores sólidos actuales, que con diámetros de la sección recta inferiores a 90 mm, tienen tiempos de combustión que no suelen superar los 2 segundos [29], [32].

Figura 16: velocidades del frente de quemado (burning rate) en función de la presión de cámara [26].

Eso es debido a que normalmente el frente de llama en los propulsores sólidos tiene dirección radial respecto al eje del cohete. En consecuencia, el recorrido del frente de llama depende del diámetro del grano propulsor, por tanto, para los cohetes considerados ($D = 90$ mm), este recorrido suele ser inferior a 17 mm, debido a la forma interior del canal, que no suele ser circular [30], [26].

Considerando la gráfica de la figura y las curvas de los propulsores convencionales doble base y composita a temperatura de ambiente, para un rango de presiones entre 60 bar (870 psi) y 130 bar (~1900 psi), se obtiene una velocidad del frente de llama de 8 mm/s a 20 mm/s, según casos. En consecuencia, el recorrido total, al estar en torno a 17 mm, el frente de llama lo supera en menos de 2 segundos.

Por lo tanto, la propulsión cohete SFR tiene una restricción por diseño en lo que se refiere al tiempo de quemado, que en definitiva es el tiempo de la combustión. Consiste en la

imposibilidad de conseguir una prolongada generación de gases de quemado para mantener la presión que requiere el empuje del cohete durante un tiempo largo, ya que esta generación de gases se produce mientras exista propulsante para ser quemado.

Como el frente de quemado se propaga en la dirección de la menor dimensión, que es la radial, acaba extinguiéndose en poco tiempo. Si evolucionase en la dirección longitudinal, el tiempo de combustión será mucho más largo, pero la generación de gases resultaría muy pequeña por ser el área de emisión de gases mucho menor que en el caso anterior y en consecuencia, la presión y el empuje son comparativamente pequeños.

En consecuencia, al ser radial el quemado, su tiempo será muy pequeño, y solo podría ser aumentado, aumentando el diámetro del cohete, pero este es un requisito básico que suele ser inamovible.

El motor que se propone realiza una alimentación continuada de los ingredientes de la reacción; sodio y agua, en la forma que se ve más adelante. Este tipo de motor se denomina *hypergólico* [26], por producirse de forma inmediata la reacción cuando los reactivos se ponen en contacto, sin necesidad de iniciación previa.

Con la configuración del motor indicada, se posibilita aumentar significativamente este tiempo de reacción, sin que sea necesario aumentar el diámetro del cohete. La ventaja consiste en haber conseguido un impulso total mayor. Esta ventaja justifica totalmente la línea de investigación que se presenta en la tesis.

9.1 Investigación experimental realizada para determinar la viabilidad de la propulsión cohete con reactivos sodio – agua

Durante la etapa investigadora se estudió la posibilidad de conseguir una configuración inicial de motor cohete propulsado con sodio y agua. El objetivo era ver si esta posibilidad era viable, o por el contrario, no iba a ser posible su desarrollo.

Se hicieron varios intentos iniciales que fracasaron ante las dificultades técnicas que surgían para mezclar el sodio y el agua de forma conveniente, sin que, al mezclarse, la propia violencia de la reacción expulsase la mayor parte de los reactivos fuera del vaso de reacción, sin conseguir ningún empuje apreciable.

Estos primeros intentos tuvieron como base de diseño el siguiente esquema.

Figura 17: Diseño conceptual del primer motor cohete de prueba para la reacción sodio –agua..

Este diseño se materializó en el prototipo que se muestra en las siguientes fotos, en las que se presenta un ensayo.

Figura 18: Ensayo realizado con el primer motor cohete experimental.

El sodio se alojaba en el cuerpo inferior del recipiente y el agua en el superior. Una válvula de cierre (válvula para mezcla) separaba a ambos reactivos. Encima de estos dos alojamientos había una electroválvula (válvula para expulsión) que se mantenía cerrada hasta que la válvula de cierre se hubiese abierto dejando que se produjese la mezcla total entre el sodio y el agua. Posterior mente debía abrirse y se tenía que salir la mezcla de productos de reacción por la parte superior donde se encontraba la tobera, ejerciéndose, en consecuencia, un empuje sobre la placa base del conjunto.

No ocurría esto debido a que al reaccionar el sodio y el agua la presión que aparecía propiciaba la fuga de los reactivos por el eje de muñones de la válvula de cierre y cuando se abría la electroválvula, la presión en el interior era poco superior a la atmosférica, por lo que apenas había emisión de masa al exterior.

A la vista de los resultados se concluyeron las siguientes líneas maestras que debía tener el diseño del motor cohete:

1. Eliminación de la válvula de cierre. El sodio y el agua, aunque inicialmente separados, debía encontrarse en el mismo recipiente y mezclarse de forma abrupta ambas masas a la vez.
2. El recipiente debería ser un vaso cilíndrico y continuo. Cualquier conexión con el exterior debería garantizar total estanqueidad respecto a una elevación de presión en su interior.
3. Eliminación de la electroválvula. Sería necesario encontrar otro método para conseguir que la reacción sodio y agua se completase y se produjese la eyección de contenido en las condiciones de presión adecuadas.

Para conseguir los criterios de diseño anteriores se concibió el siguiente plano:

Figura 19: Diseño detallado del segundo motor cohete.

En la figura se ve el motor cohete que concebido a partir de los requerimientos anteriores. Su disposición para el ensayo es vertical con la tobera posicionada en la parte superior para expeler los reactivos hacia arriba y mediar los empujes por la parte inferior. Los elementos indicados en la figura son:

- 1 Tubo o recipiente de la reacción
- 3 Cierre adaptador de la Tobera
- 5 Pieza de tobera
- 7 Obturador

- 2 Tapón del Tubo
- 4 Junta elastomérica con tobera
- 6 Junta elastomérica con Obturador
- 8 Tapón de Tobera

La disposición inicial para el experimento es como sigue. El motor cohete, que está en disposición vertical, como se ha indicado, tiene en su interior depositado sobre el Tapón del Tubo (2) la muestra de sodio para el ensayo. La muestra de agua se encuentra preparada en un recipiente exterior y será introducida mediante aire comprimido a través la Válvula antirretorno (11), en cuya parte interior hay un globo (no representado), cuya finalidad es recibir el agua en el interior del Tubo (1) sin que contacte con el sodio durante el trasvase. Una vez transferida toda el agua al globo, comienza a llegar a su interior el aire a presión de impulsión del agua, hasta que el globo estalla y el agua cae súbitamente sobre el sodio, en su cantidad predeterminada.

En las siguientes figuras se muestran cómo se hace la preparación de una muestra de sodio, que se adosa al Tubo Sifón (10) mediante cinta aislante, para posteriormente introducir este conjunto en el interior del Tubo (1).

Figura 20: Preparación de la muestra de sodio que va envuelta en papel secante y se adosa al Tubo Sifón mediante cinta adhesiva.

La reacción se inicia y a medida que discurre, la presión se va elevando en el interior del Tubo (1). El Obturador (7) impide que el contenido se salga fuera del Tubo (1), pero está tarado para que se rompa a una presión determinada. A partir de este momento los productos de reacción comienzan a salir fuera a través de la tobera, pero no directamente,

sino a través del Tubo Sifón (10), que consigue alargar el recorrido de escape y permitir que se complete mejor la reacción. A través salen al exterior los componentes gaseosos de los productos, con un incremento de la velocidad función del salto de presión que experimentan desde el interior del motor a la presión de ambiente del exterior.

Figura 21: Elementos necesarios para realizar una prueba de funcionamiento del motor cohete con reactivos sodio – agua.

Se han realizado varias pruebas con distintas proporciones másicas de los ingredientes sodio – agua, pero estando siempre el agua en exceso. La figura anterior expone la disposición de los elementos que intervienen en el ensayo:

Figura 22: Secuencia temporizada de la eyección de agua en fase vapor (ensayo n°1 09-06-2015).

Las imágenes de la figura 22 muestran varios instantes del proceso de eyección. Llama la atención los instantes entre 300 y 333 ms en los que la llama que se presenta es consecuencia de la combustión del hidrógeno resultante de la reacción con el oxígeno circundante del aire. Una parte de este hidrógeno ha debido quemarse en el interior del Tubo (1) con el aire almacenado en ella. La figura pone de manifiesto el buen funcionamiento del diseño del motor cohete, que como se observa, realiza la eyección durante más de 0,8 segundos.

9.1.1 Resultados de la investigación experimental

Las dos tablas siguientes muestran, respectivamente, una primera información de las condiciones de los ensayos (tabla primera) y sus resultados (tabla segunda).

En la primera tabla, la columna correspondiente al Obturador indica qué tipo de material se usó: DAF duraluminio fuerte, DAD duraluminio débil, Latón o Acero. También indica el espesor de la placa. Las celdas en blanco corresponden a ensayos donde no se registró este dato.

En el ensayo 2º de 01-07-2015 se averió el captador de presión y no se dispuso de otro hasta el ensayo 06-08-2015. En los ensayos 13-07-2015, 14-07-2015 y 15-07-2015 no hubo registro de instrumentación.

En líneas generales, se detecta unas roturas prematuras del globo de admisión de agua, que produce una reacción precipitada, evitando que entre toda el agua prevista para el ensayo. Ocurre de forma reiterativa cuando la cantidad de agua a introducir es de 1000g, que es la mayoría de los casos. Por este motivo, fundamentalmente, no se han conseguido hacer ensayos en condiciones repetitivas, por ser incontrolada y desconocida la cantidad de agua que entraba en cada ensayo.

Esta situación plantea la necesidad de reformar el sistema de mezcla de agua y sodio por otro que garantice, no solo la seguridad, como hace el actual, sino también la dosificación.

Otra carencia que tenía el diseño en un principio era que el captador de presión, directamente conectado al Tubo (1), estaba sometido a grandes incrementos de temperatura por su proximidad a la reacción. El segundo captador que se empleó se conectó por medio de un tubo largo y fino de acero, que evitaba el inconveniente anterior. Ello permitió hacer varias medidas, de hasta 200 bar, sin presentar problemas.

Figura 23: Curva de presión para 1ª prueba de 01-07-2015.

La figura anterior muestra la forma de la curva de presión en un ensayo típico. Hay una primera elevación de la presión en torno a 6 bar que corresponde a la fase de entrada de agua en el globo y su estallido, después una súbita elevación de la presión, en este caso hasta 52 bar, coincidente con la rotura del Obturador (7), momento en el cual comienza la descarga, que en este caso dura 0,60 segundos. Esta descarga se produce a caudal constante por la acción de las condiciones críticas de la tobera. En esta prueba todavía no estaba configurada la célula de carga, por lo que no hubo registro de datos de empuje.

Figura 24.: Curva de presión para 2ª prueba de 07-08-2015.

Se presentan en la figura 24, los resultados de la 2ª prueba del ensayo de fecha 07-08-2015 con la instrumentación totalmente operativa para registrar temperatura, presión y empuje. Se consideró una cantidad de agua pequeña (357 gramos) que fue totalmente introducida en la Cámara Experimental, para reaccionar con 179 g de Na. El Obturador (7) estaba compuesto por 3 placas de latón de 0,4 mm, que son las de mayor resistencia (Tabla 6.2). El motivo era que se deseaba ver la evolución de la presión y la temperatura en

el interior de la Cámara Experimental sin que hubiese eyección; es decir, hacerla funcionar como una Bomba Manométrica. Sin embargo, tuvo lugar la rotura del Obturador unos segundos (~20 s) después del inicio de la reacción y en consecuencia el fenómeno de la eyección.

En la curva correspondiente de la figura 23, se ve una elevación progresiva de la presión hasta alcanzar 200,7 bar. La curva de empuje indica el momento en que se rompe el Obturador (7) ($t = 45,63s$) iniciándose de forma súbita el empuje que alcanza 1988 N, seguido de un proceso de descarga de duración 0.38 s. Se observa un gran desfase temporal con los datos de temperatura, debido al tiempo de respuesta del transductor, lo que le hace poco apropiado para este fenómeno tan dinámico.

Tabla 8: Relación de ensayos registrados. La columna Expulsión Agua indica si se produjo expulsión de agua por tobera después de haberse consumado la eyección por la acción de la reacción sodio – agua.

Fecha	Ensayo	Cantidades	Obturador	Eyección	Expulsión Agua
01-07-2015	1º	51g Na 1002g H ₂ O	DAD – 0.3 mm	si	si
	2º	50g Na 1000g H ₂ O	DAD – 0.3 mm	si	si
	3º	54g Na 1000g H ₂ O	DAD – 0.3 mm	si	si
10-07-2015	1º	66g Na 1001g H ₂ O		si	
	2º	73g Na 1002g H ₂ O		si	si
	3º	85g Na 1000g H ₂ O		si	
13-07-2015	1º	50g Na 1005g H ₂ O		si	si
	2º	50g Na 1003g H ₂ O		si	no
	3º	50g Na 1003g H ₂ O		no	-
14-07-2015	1º	50g Na 1000g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	no	-
15-07-2015	1º	75g Na 1000g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	si	
	2º	75g Na 1000g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	si	
16-07-2015	1º	75g Na 1000g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	si	
	2º	75g Na 1000g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	si	
17-07-2015	1º	75g Na 1000g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	si	
	2º	75g Na 1000g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	si	
	3º	175g Na 1000g H ₂ O	2 DAF – 0.3 mm	si	
06-08-2015	1º	50g Na 1002g H ₂ O	DAF – 0.3 mm	si	no
	2º	50g Na 1000g H ₂ O	2 DAD – 0.3 mm	no	-
	3º	107g Na 250g H ₂ O	2 Latón – 0.4 mm	-	
07-08-2015	1º	50g Na	DAF – 0.3 mm	no	-

		1000g H2O			
	2º	179g Na 357g H2O	3 Latón – 0.4 mm	si	no
1-09-2015	1º	180g Na 360g H2O	acero – 3 mm	explosión cámara	-

Tabla 9: . Relación de ensayos registrados con los valores registrados de la instrumentación. (el tiempo no es mejor en segundos?)

Fecha	Ensayo	Cantidades	Presión Cámara (bar)	Tiempo 10% (ms)	Empuje Máximo (N)
01-07-2015	1º	51g Na 1002g H2O	52.06	0.60	-
	2º	50g Na 1000g H2O	(*)	-	-
	3º	54g Na 1000g H2O	-	-	-
10-07-2015	1º	66g Na 1001g H2O	-	0.38	1068
	2º	73g Na 1002g H2O	-	0.88	252
	3º	85g Na 1000g H2O	-	0.67	676
13-07-2015	1º	50g Na 1005g H2O			
	2º	50g Na 1003g H2O			
	3º	50g Na 1003g H2O			
14-07-2015	1º	50g Na 1000g H2O			
15-07-2015	1º	75g Na 1000g H2O			
	2º	75g Na 1000g H2O			
16-07-2015	1º	75g Na 1000g H2O	-	0.41	533
	2º	75g Na 1000g H2O	-	0.95	590
17-07-2015	1º	75g Na 1000g H2O	-	0.61	1455
	2º	75g Na 1000g H2O	-	1.31	293
	3º	175g Na 1000g H2O	-	0.59	1133
06-08-2015	1º	50g Na 1002g H2O	28.5	0.78	360
	2º	50g Na 1000g H2O	4(*v)	-	-
	3º	107g Na 250g H2O	28.2, 30.0 (v)	-	-
07-08-2015	1º	50g Na 1000g H2O	31	(**)	-
	2º	179g Na 357g H2O	200.7	0.38	1988
1-09-2015	1º	180g Na 360g H2O	203.8	-	(***)

(*) Rotura del transductor de presión.

(**) Ensayo en vaso cerrado.

(***) Fallo catastrófico de la Cámara Experimental y rotura de la Cámara de Experimentación.

(*v) Fallo por fuga. Faltó junta tórica de tobera.

(v) Comportamiento anormal: dos picos de presión y fallo en célula de carga.

Se analiza a continuación (figura 24 el ensayo 1º de 01-09-2015, que acabó en fallo catastrófico con rotura completa de la Cámara Experimental. La figura 25 muestra varias imágenes de la Cámara Experimental después del fallo catastrófico.

Figura 25: Curvas de presión y empuje de la 2ª prueba de 01-09-2015, en la que ocurrió el fallo catastrófico de la Cámara Experimental.

Este ensayo se realizó con la intención de repetir el anterior (2º de 07-08-2015), para conseguir la situación de ensayo manométrico y ver la evolución de la presión y temperatura sin eyección. Para conseguir esta capacidad con la Cámara Experimental se puso un Obturador (7) de acero de 3 mm de espesor, que superaba en resistencia a las tres placas de latón del ensayo previo. Sorpresivamente reventó la Cámara Experimental en lugar del Obturador (7), sin embargo, se tomaron los datos de presión y empuje que indican las gráficas de la figura 25.

Se puede ver en la primera gráfica la evolución de la presión y el momento de rotura ($t = 43,17$ s), haciéndola coincidir con la gráfica de empuje (la inferior). La presión a la que rompe es de 203,8 bar. En este momento comienza la saturación de la célula de carga (empuje), lo que indica que se ha producido alguna fuga en la propia cámara. La presión evoluciona un poco más hasta 205,2 y comienza su fase de caída por la descarga.

Las fotos expuestas en la figura 26 muestran el estado de la Cámara Experimental después de este último ensayo. Llama la atención el retorcimiento Tubo Sifón (10). Teniendo en cuenta cómo se adosa el paquete de sodio en éste (ver figura 7-3), cabe pensar que el sodio sujeto en esta posición y reaccionado inicialmente con el agua, ha podido producir un

calentamiento local muy grande, que ha dilatado a las fibras del tubo en contacto con él, produciendo el doblado que muestran las figuras. Incluso cabe pensar que la fisura de la virola de la cámara ha podido iniciarse por la acción del tubo durante su dilatación, que ha presionado por su extremo libre la pared de la cámara, ya sometida a una temperatura muy elevada, ejerciendo un esfuerzo puntual que termina por crear una entalla y abrir una fisura que rompe catastróficamente por la presión interior acumulada.

Figura 26: Estado de la Cámara Experimental después del fallo catastrófico producido por el ensayo 01-09-2015.

9.1.2 Conclusiones de la investigación experimental

Se concluyó con la fase experimental realizada que la propulsión cohete era viable, realizando una serie de ajustes con un diseño mejor dimensionado.

Sin embargo, las curvas empuje tiempo registradas durante los experimentos desvelaron que tenía una forma tipo pulso (figura 24), mientras que lo deseable en la propulsión cohete es que estas curvas tengan una forma cuadrada con un empuje constante durante un cierto tiempo como es el caso de la figura 27.

Con el modelo del diseño realizado, donde el sodio y el agua que van a reaccionar están en sus cantidades completas desde el inicio de la reacción, esto no iba a ser posible. Siempre que se diese esta situación, la curva de empuje tendría que tener la forma de la figura 23, más parecida a un disparo cañón de un proyectil que al de un cohete.

Se ha visto que la forma de solventar este inconveniente puede ser la alimentación continua de sodio agua dentro del Tubo (1), en lugar de tener todo el sodio de la reacción en su interior.

Este es el motivo de realizar una nueva fase experimental para caracterizar un nuevo motor cohete con la alimentación de sus reactivos de forma continuada.

9.2 Fase de investigación de un motor cohete sodio – agua por alimentación continuada de sus reactivos

En esta fase es necesario conseguir un motor cohete que trabaje en condiciones estáticas de laboratorio y sea capaz de mantener la reacción sodio – agua durante un tiempo mínimo de 10 segundos, proporcionando un empuje constante. Esta fase está por desarrollar, no obstante, se han realizado varios cálculos teóricos que sirven de preparación para su inicio y desarrollo y se exponen en la actual tesis.

9.2.1 Dimensionado del motor cohete

Se utilizarán el software CEA [27] y la ecuación de caracterización de la reacción obtenida [10] para determinar la proporción másica de los reactivos, el volumen de la cámara y las secciones de garganta y salida de tobera, que generen una presión fijada de antemano.

En la siguiente figura se indica el esquema del motor cohete objeto de esta fase. Consta de tres elementos: Cámara de Reacción, Recipiente de Sodio y Recipiente de Agua.

Los recipientes de sodio y agua conectan por su parte superior con la Cámara de Reacción a la que suministran los caudales másicos adecuados de los correspondientes reactivos. Para ello disponen de un émbolo que está sometido a la misma presión en sus caras superior e inferior, procedente de la Cámara de Reacción. Por otra parte, el vástago de este émbolo asoma fuera del recipiente, por lo que existe una fuerza diferencial entre las dos caras del émbolo, siendo el sentido de esta fuera hacia arriba en el esquema. Esta situación provoca que se inyecte en la Cámara de Reacción el correspondiente reactivo en su interior, y se produzca la reacción mientras los dos émbolos van hacia arriba.

Los productos de la reacción se evacúan por medio del Tubo de Salida y la Tobera, hacia el exterior, produciéndose, en consecuencia, un empuje en el conjunto de la Cámara de Reacción.

El sodio debe estar en fase líquida en su recipiente. Por ello es necesario mantenerle a una temperatura algo superior a su punto de fusión 98 °C.

Figura 26: Esquema del motor cohete basado en la reacción sodio agua.

Es necesario también conseguir el caudal másico de ambos ingredientes, de acuerdo con los cálculos de software CEA. Para ello se realizarían pruebas con distintas secciones de paso de los conductos de inyección a la Cámara de Reacción, hasta dar con los diámetros de paso adecuados.

9.2.2 Ensayos

El motor será instrumentado para recabar los datos de presión y temperatura en cámara, caudales másicos de agua y sodio y empuje durante la reacción.

El registro de la presión en función del tiempo dará las curvas de presión, dato fundamental para evaluar el comportamiento del motor en las condiciones de operación.

En las instalaciones del INSTITUTO NACIONAL DE TÉCNICA AEROESPACIAL (INTA Campus La Marañosa) se ha iniciado el desarrollo de este nuevo motor cohete para estudio de este tipo de propulsión en condiciones estáticas de laboratorio.

Para ello se ha realizado un esquema de funcionamiento operacional dado por el siguiente plano.

izquierdo y sodio en el derecho, que por necesitar ser atemperado a más de 96°C, se encuentra en el interior de una cuba con aceite para ser calentado y conseguir la licuación del sodio.

El cilindro central de la parte B es en el que se realiza la reacción de forma continuada hasta agotarse las existencias de los reactivos en los cilindros almacenadores de agua y sodio. En su base hay una célula de carga para registrar el empuje durante la reacción. Dispone también de un captador piezoeléctrico de presión.

Los cilindros de la zona A almacenan aceite que actúa sobre los émbolos de los cilindros almacenadores de aceite y agua. La actuación tiene lugar a partir de sus vástagos que están unidos por una palanca, como se aprecia en el plano. Al vascular la palanca hacia abajo, realiza un recorrido mayor en el cilindro más alejado de la bisagra, que en el otro por lo que el gasto del cilindro alejado es mayor que el del otro y en consecuencia, el cilindro que contiene agua (conectado al de mayor recorrido) generará un gasto mayor que el del sodio (conectado al del menor recorrido).

La posición de los vástagos de los cilindros de aceite en la palanca es regulable, por lo que la relación de gastos es variable dentro de un rango. Por los experimentos realizados anteriormente, se van a realizar experimentos con dosados enriquecidos en agua.

El montaje de los elementos está bastante avanzado, como puede verse en las dos siguientes figuras, que muestran el estado actual del desarrollo (febrero 2019).

Figura 28: Cilindros de control de gasto.

Figura 29: Bancada del motor cohete con el cilindro de reacción (en medio), el cilindro de almacenamiento de agua (a la derecha) y cuba del cilindro de almacenamiento de sodio (izquierda).

Queda por realizar la conexión hidráulica entre los dos elementos para la ejecución de un plan de pruebas de verificación.

El funcionamiento en continuo está basado en el uso de la presión de la cámara de reacción para el movimiento autónomo de los cilindros de aceite que, a su vez, actuarán sobre los de agua y sodio generando el gasto hasta el final de la existencia de cualquiera de los dos reactivos.

Las pruebas de verificación consistirán en la presurización de la cámara de reacción, con presiones en torno a 100 bar, la anulación hidráulica del circuito de sodio y la habilitación del de agua, para comprobar que se realiza la inyección de agua en la cámara de reacción. También se medirá el gasto para distintas posiciones del vástago del cilindro de aceite interviniente (zona A de la figura 27).

Se realizará lo mismo con el circuito de sodio, anulando el del agua. Igualmente se medirá el gasto de sodio con varias posiciones del respectivo vástago del cilindro de aceite sobre la palanca (zona A figura 27).

Una vez terminadas las pruebas anteriores, se estará en condiciones para iniciar los experimentos con reacción continuada.

La realización de estos experimentos dará a conocer lo que sucede con la presión de cámara cuando la alimentación de los reactivos es constante. Hasta ahora, por lo conocido en las referencias localizadas, y en los propios experimentos, solamente se conoce lo que pasa con la curva de presión cuando las masas de los reactivos están presentes desde un principio en la cámara de reacción, y no hay aportes adicionales. Las figuras 10 y 13 muestran la forma que sigue la presión en estas circunstancias.

Figura 30: Bancada del motor cohete y el conjunto de los cilindros del control de gasto conectados con las mangueras hidráulicas.

9.2.3 Dimensionado de un motor cohete basado en la reacción Sodio Agua

Se analiza y realiza un dimensionado preliminar de un motor cohete que utiliza la reacción sodio agua, como agente propulsivo, empleando el software de cálculo específico: CEA [27] (*Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications*). Este software contiene una biblioteca de componentes con sus propiedades químicas y tiene un módulo de cálculo para cohetes, que se utiliza para determinar las capacidades propulsivas de la reacción sodio agua.

El método que se sigue es el siguiente:

1. Requerimientos propulsivos del motor cohete. Se establecen las condiciones iniciales que debe tener el motor cohete a efectos de la propulsión.
2. Establecer las condiciones estacionarias de la reacción. Inicialmente, con el objeto de determinar la relación másica de ingredientes que mayor impulso específico da para la presión de reacción que se va a considerar, se hace un análisis paramétrico con el CEA que recorra una lista de proporciones másicas de ingredientes y calcule el impulso específico correspondiente a cada una de ellas. En esta relación debe haber un máximo local, que dará la relación de masas con mayor impulso específico. Posteriormente se calcula, mediante la expresión de mérito del párrafo 3.6, el volumen libre de la reacción y además la masa del sodio y el volumen total de la cámara de reacción.
3. Cálculo de actuaciones del motor cohete. Fijadas las proporciones másicas del agua y del sodio, según el cálculo realizado con el CEA, que considera, además, una relación de áreas salida de tobera – garganta de tobera, que consiga una presión de expansión similar a la de ambiente (1 bar), se realiza el cálculo de las actuaciones del motor cohete, con la finalidad de obtener el empuje y el impulso total.
4. Análisis de resultados. Se hace una comparación de los resultados obtenidos con los de un cohete de propulsante convencional tipo doble base.

Se explica con un ejemplo el detalle del desarrollo de los puntos anteriores.

9.2.4 Requerimientos propulsivos del motor cohete

Se plantea hacer el dimensionado básico de un motor cohete con agente propulsivo sodio – agua, con una cámara de combustión cilíndrica de diámetro interior 70 mm, con una presión de reacción de 100 bar. Se considera una masa de agua de 50 gramos.

9.2.5 Condiciones estacionarias de la reacción

Se procesa con el CEA una mezcla de ingredientes sodio – agua, estableciendo una lista de proporción másica oxidante/combustible, que recorre los valores 0.9 a 1.5 con incrementos de 0.1. En el anexo 1 se listan los resultados que proporciona el software CEA. Obteniéndose la siguiente correlación.

Tabla 10: Impulsos específicos obtenidos para la relación másica agua- sodio.

Ox/Comb.	I_{sp} (m/s)
1,5	1280
1,4	1292
1,3	1300
1,2	1302
1,1	1297
1,0	1281
0,9	1253

El máximo local para se encuentra para la proporción en masa H_2O/Na de 1,2, donde el impulso específico obtenido es de 1302 m/s.

A partir de los datos que se disponen: relación Oxidante/Combustible 1,2, masa de agua de 50 gramos, presión de la reacción 10 MPa (100 bar). Inicialmente se calcula la proporción en masa de sodio correspondiente a los anteriores valores.

$$m_{Na} = \frac{m_{H_2O}}{Ox/Comb} = \frac{50}{1.2} = 41,67 \text{ g}$$

Ahora se obtiene el porcentaje en masa de sodio

$$\%Na_1 = \frac{m_{Na}}{m_{H_2O} + m_{Na}} = \frac{41.67}{50 + 41.67} = 0,455$$

Se calcula el volumen libre a partir de la siguiente expresión, despejando y sustituyendo los valores conocidos

$$\%Na_1 = \frac{P_c \cdot V_l}{m_t \cdot 55,808}$$

El volumen libre resulta:

$$V_l = \frac{\%Na_1 \cdot m_t \cdot 55,808}{P_c} = \frac{0.455 \cdot 91,67 \cdot 55,808}{10^7} = 0,000233 \text{ m}^3 = 0,233 \text{ L}$$

Y el volumen total de cámara donde tiene lugar la reacción, es:

$$V_c = V_l + \frac{m_{Na_1}}{\rho_{Na}} + \frac{m_{H_2O_1}}{\rho_{H_2O}} = 0,326 \text{ L}$$

La longitud de la cámara resulta:

$$L_c = V_c \cdot \frac{4}{\pi \cdot D_c^2} = 3,26 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4}{\pi \cdot 0,070^2} = 0,085 \text{ m}$$

Concluyendo, 41.67 g de sodio reaccionando con 50 g de agua en una cámara cilíndrica de 70 mm de diámetro y 85 mm de longitud, producirán 100 bar de presión, con un impulso específico de 1292 m/s con una relación de áreas en tobera de 18.

9.2.6 Cálculo de actuaciones del motor cohete

Se determinan el gasto (G), el empuje (E), el impulso total (I_t) y el diámetro de la sección de salida (D_e), considerando un diámetro de garganta de tobera y con la configuración seleccionada para una relación másica agua/sodio de 1,2 y una relación de áreas salida / garganta de 18.

Los datos iniciales son:

Presión de cámara	$P_c = 100 \text{ bar} = 10^7 \text{ Pa}$
Diámetro de garganta	$D_g = 9 \text{ mm}$
Relación de áreas	$\varepsilon = 18$
Coefficiente de empuje	$C_F = 1,7694$
Velocidad característica	$c^* = 736,1 \text{ m/s}$
Tiempo de duración de la reacción	$t_r = 10 \text{ s}$

Se obtienen los siguientes resultados:

Área de garganta de tobera	$A_g = \pi \cdot \frac{D_g^2}{4} = 63,6 \text{ mm}^2$
Área de salida	$A_s = \varepsilon \cdot A_g = 1145,1 \text{ mm}^2$
Diámetro de salida	$D_s = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} = 38,2 \text{ mm}$
Gasto másico	$G = \frac{P_c \cdot A_g}{c^*} = 0,864 \text{ kg/s}$
Empuje	$E = P_c \cdot A_g \cdot C_F = 1125,6 \text{ N}$
Impulso total	$I_t = E \cdot t_r = 11256,4 \text{ N} \cdot \text{s}$

De los resultados se deduce que la masa necesaria de los reactivos va a ser 8,64 kg. El gasto de sodio debe ser 0,391 kg/s y el de agua 0,473 kg/s, por consiguiente, la masa de sodio acumulada es de 3,91 kg y la de agua 4,73 kg.

9.2.7 Dimensiones de la envolvente de la cámara de reacción

En el párrafo 4.4.3 se determinó el volumen libre de la cámara para una mezcla de ingredientes de 50 g de agua y 41,67 g de sodio, que son las cantidades que por segundo se expulsan por la tobera. La cantidad disponible de reactivos es: 473 g de agua y 391 de sodio que también guardan la proporción 1,2. Dependiendo de la velocidad de reacción entre el sodio y el agua, el volumen de la cámara será el calculado con el volumen libre obtenido, o no. Esta será una de las cosas a investigar con el motor de alimentación continua.

Una vez establecida esta incertidumbre, el volumen de la cámara de reacción se va a considerar a partir del volumen libre obtenido (0,326 L), y también la longitud de cámara (85 mm).

Por otra parte, el alojamiento del sodio y del agua requerirá dos recipientes cilíndricos de diámetro interior 70 mm, cuyas longitudes serán necesariamente:

$$L_{Na} = \frac{4 \cdot m_{Na}}{\pi \cdot \rho_{Na} \cdot D_c^2} = 0,105 \text{ m}$$

$$L_{H_2O} = \frac{4 \cdot m_{H_2O}}{\pi \cdot \rho_{H_2O} \cdot D_c^2} = 0,123 \text{ m}$$

La longitud total de la cámara y los dos recipientes de los reactivos queda

$$L_p = L_c + L_{Na} + L_{H_2O} = 0,313 \text{ m}$$

Y el diámetro interior, 70 mm.

9.2.8 Análisis de los resultados

Para tener una idea de la capacidad del cohete diseñado de forma preliminar, se realiza una comparación con un cohete en servicio como es el CAT70 fabricado por la empresa MAXAM-EXPAL, con la siguiente formulación: NG 34,9%, NC 50%, DF 10.5%, 2DNF 2%.

La curva empuje – tiempo, obtenida en banco estático horizontal es la siguiente:

Figura 31: Curva Empuje Tiempo cohete CAT70.

De la figura se deduce que el empuje está en la banda entre los 3000 a 4000 N, con un valor medio sobre 3800 N. El impulso total es de 4896 Ns.

La longitud de la cámara de combustión es de 846 mm y el peso del propulsante 3,4 kg. Estos datos se comparan en la tabla con los del diseño del motor cohete propulsado por sodio – agua.

Tabla 11: Capacidades Propulsivas del cohete CAT70 y el estudiado de sodio - agua.

	CAT70	Cohete sodio - agua
Peso propulsante	3,4 kg	8,64 kg
Empuje	3800 N	1126 N
Impulso total	4896 N·s	11256 N·s
Longitud de cámara	846 mm	313 mm*
Empuje específico	1440 N.s/kg	1302 N.s/kg

*Sin tobera

Aparentemente el cohete CAT70 es más ventajoso porque con menos peso de propulsante consigue mayor empuje. Sin embargo, si el objetivo es tener más alcance, el más ventajoso es el cohete sodio – agua porque su impulso total es 2,3 veces mayor que el del CAT70, lo que implica que su alcance va a ser mayor, aún a costa de tener más masa.

Con la tecnología del propulsante sólido, el CAT70 no puede incrementar su impulso total, debido a que el diámetro de su cuerpo (70 mm) se lo impide. Para llegar a la capacidad del cohete sodio – agua, debería aumentar su diámetro en algo más del doble. Esto es algo inviable desde un punto de vista de diseño, porque ya estaría fuera de su rango y no cumpliría con sus requisitos operativos.

En consecuencia, el cohete de sodio – agua aun siendo más lento en el vuelo que el CAT70 tiene más del doble de su alcance, conservando el diámetro de cuerpo de 70 mm.

10 CONCLUSIONES

La primera parte de la tesis ha presentado una comparativa entre la fuente de energía química por excelencia que es la combustión y la derivada de la reacción sodio – agua, a día de hoy, inexplicablemente no investigada, cuando hay una actividad frenética por buscar fuentes de energía alternativas a los combustibles fósiles, teniendo el dato de que las reservas conocidas de petróleo se agotarán en torno a 4 décadas.

Si bien los niveles energéticos alcanzados por la combustión de determinados elementos (ver tabla 2), no son alcanzables por la energía desprendida en la reacción sodio – agua (8,174 MJ/kg de Na [24]), esta reacción presenta la capacidad, a diferencia de la combustión, de poder realizarse sin que sea necesaria la evacuación de sus productos, es decir, sin emisiones al entorno circundante fuera del reactor, lo que permite un aprovechamiento más eficiente del calor generado.

Otra ventaja de enorme interés es que los productos de reacción formados por NaOH y H₂, son inestables: el NaOH, se combina con suma rapidez con el CO₂ existente en las inmediaciones y forma carbonato sódico, que es una sustancia alcalina estable en condiciones normales y que no presenta peligro significativo para el medioambiente, por otro lado, el H₂ se combina con rapidez con el oxígeno presente en el origen de la reacción, produciendo agua, y aportando un incremento de energía a la propia reacción.

Se han señalado algunas posibles aplicaciones de esta reacción como generador de calor en los ciclos Rankine, Steerling y Brayton. Indudablemente, la posibilidad de generación de calor sin emisiones al entorno circundante, es una gran ventaja respecto a los medios convencionales (calderas y cámaras de combustión).

También se ha indicado las interesantes posibilidades del almacenamiento energético eléctrico que se puede conseguir en la producción de sodio, al estar su síntesis basada en la hidrólisis de la sal común y de la sosa caustica.

Por otra parte, en esta tesis doctoral se ha analizado de forma teórica y experimental la posibilidad de utilizar la reacción sodio-agua como forma de propulsión de cohetes. Esta propuesta es novedosa en la tecnología de los propulsores sólidos de cohetes en cuanto no existen estudios relevantes relacionados en este campo. Del estado de arte se concluye que los posibles propulsores sólidos (SFR) utilizados hasta la fecha, se basan en formulaciones de compuestos combustibles y comburentes, mezclados en una misma masa que constituyen lo que se llama el grano propulsante.

Durante los periodos de almacenamiento la masa de estos ingredientes, que incluyen a la vez oxidante y reductor, ocasiona reacciones lentas entre ellos mismos que van deteriorando las propiedades iniciales termoquímicas y balísticas a lo largo del tiempo. Estas reacciones tienen carácter exotérmico y la temperatura que se genera, actúa como un catalizador que acelera el proceso.

Por ello se introducen en la formulación sustancias estabilizadores que dificultan el proceso a costa de ser ellos mismos consumidos. Sin embargo, sus cantidades son más bien escasas, porque si no, la balística de la mezcla se vería deteriorada. El resultado final es que el proceso de envejecimiento aflora desde los 10 años de la manufacturación del propulsante, de una forma u otra.

Teniendo en cuenta que la vida en parque o polvorín de un cohete o misil no es inferior a 20 años, el proceso de envejecimiento constituye un problema logístico de primera magnitud. Durante la vida operativa de este tipo de municiones, es necesario establecer pruebas de vigilancia en las que se analiza el estado de los propulsores mediante inspecciones, clasificadas como destructivas y no destructivas. Ambos tipos de pruebas son necesarios conforme aumenta el tiempo de almacenamiento. Las destructivas exigen realizar análisis químicos, termoquímicos, balísticos y pruebas de disparos en banco estático, lo cual implica la destrucción de un determinado número de ejemplares.

Un futuro empleo de propulsión cohete basado en la reacción sodio y agua elimina de raíz este gran problema, por ser el sodio un elemento perfectamente estable siempre que esté convenientemente aislado del entorno circundante, es decir, preservado de cualquier contacto con el agua, en cualquiera de sus fases. Esto no es difícil de conseguir.

Por otro lado, el agua no requiere unas condiciones de pureza determinadas para que produzca la reacción, por lo que tampoco constituye un problema logístico. Por ello esta solución se perfila como ideal para resolver el problema logístico que tienen los actuales propulsores del tipo SFR.

Desde el punto de vista de las capacidades balísticas que confiere un motor cohete basado en esta reacción, en comparación con los SFR actuales, cabe destacar que, si bien se obtienen unos impulsos específicos menores, ello no representaría un problema en las capacidades operativas de un hipotético cohete o misil con esta solución propulsora. Por medio del sistema de inyección expuesto, el motor adquiere un tiempo de funcionamiento mucho más prolongado que el de un SFR convencional de un diámetro equiparable, como se ha expuesto en el párrafo 7.2.8.

Un tiempo de funcionamiento mayor implica un alcance mayor, siendo esta característica una de las cualidades primordiales a conseguir de todo sistema de propulsión.

Otra ventaja reseñable es el coste económico. Un kg de propulsante convencional tiene unos precios variables, dependientes del número de kg que se soliciten, el nivel de amortización de la planta fabricante, el coste de los ingredientes básicos, el beneficio industrial, etc. El margen suele estar entre 200 y 600€ por kg. En el caso de la reacción sodio – agua, no es necesaria una planta química para la manufacturación del propulsante, las especies químicas son sodio y agua, en cuyos costes sólo es representativo el del sodio, que adquiriéndolo para un número de varios miles de kilogramos, es posible

encontrarlo actualmente por un precio entre 2 y 3€; es decir hay un escenario que reduce en 2 órdenes de magnitud el coste del propulsante.

También la reacción en sí excluye para su iniciación el uso de elementos iniciadores, que son indispensables en los SFR convencionales. El iniciador es el elemento que aporta la energía de activación necesaria para que tenga lugar y de forma estable el proceso de combustión. El iniciador se excita mediante una señal eléctrica, cuyo origen viene motivado por una causa fuera del propio motor. La integración de este elemento dentro del motor cohete, presenta una serie de problemas en cuanto espacio, ubicación y cableado que es necesario resolver para que el proceso de combustión tenga lugar en el momento solicitado y de una manera segura, fiable y eficaz.

Todos estos requerimientos tecnológicos se evitan con la tecnología del motor cohete basado en la reacción sodio – agua, por el mero hecho de que esta reacción no requiere energía de activación cuando ambos reactivos entran en contacto.

Las principales ventajas del uso de sodio-agua con respecto a los existentes son:

- Mejora del alcance y tiempo de empuje en un factor de varias unidades respecto a los SFR convencionales del mismo tamaño.
- Muy bajos costes de los reactivos respecto de los convencionales SFR, debido a que son elementos (Na) y compuestos químicos (H_2O) muy abundantes.
- Eliminación del elemento iniciador, necesario en los propulsores convencionales.
- Eliminación de las pruebas de verificación que actualmente se llevan a cabo para los SFR, al no estar sometido los dos reactivos a procesos de envejecimiento con el tiempo.

11 APORTACIONES DE LA TESIS AL ESTADO DEL LA TÉCNICA

La principal aportación de esta tesis al estado de la técnica ha sido el análisis teórico y experimental de las capacidades que manifiesta la reacción sodio – agua para el ámbito de la propulsión cohete. Además, se señalan las siguientes aportaciones al estado de la técnica:

- Puesta en valor de la reacción sodio – agua como un nuevo vector energético a tener en cuenta para su explotación en diversos ámbitos, frente a los ocupados actualmente por el proceso de combustión.
- Realización de experimentos para conseguir la viabilidad de la reacción sodio-agua en la propulsión cohetes, manifestado en prototipos probados.
- Establecimiento de una metodología de cálculo para la determinación de mezclas de reactivos de la reacción aplicada a la obtención de empuje para propulsión cohete.
- Planteamiento de las bases de diseño para un motor cohete SWR con alimentación continua de sodio y agua.
- Comprobación de las ventajas propulsivas con respecto a motores cohetes convencionales.

12 TRABAJOS FUTUROS NECESARIOS DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación iniciada continúa con el desarrollo de un motor cohete de laboratorio, para ensayos en banco estático, capaz de realizar una inyección de agua y sodio, ambos en fase líquida, según se indica en la figura 14 y tal y como se ha desarrollado en el párrafo 7.2.2. La reacción debe durar un mínimo de 10 segundos, generando una presión estable que garantice el funcionamiento combinado de todos los cilindros hidráulicos para conseguir la reacción en forma ininterrumpida.

Esta línea continuará en una fase posterior con el desarrollo de un motor de vuelo, con el que se harán varios lanzamientos de prototipos en un campo de tiro del Ministerio de Defensa.

Alcanzada esta última fase con éxito, la línea de investigación puede darse por concluida y preparada para el desarrollo industrial del producto que deberá liderar una empresa relacionada con la propulsión cohete.

Además de lo expuesto, se abren otras posibles líneas de investigación como podrían ser en la automoción de vehículos, la propulsión marina y submarina y el desarrollo de calderas que en lugar de tener a la combustión como foco calorífico, tengan a la reacción sodio – agua, posibilitando la introducción de esta nueva tecnología en ciclos de Rankine y Bryton.

Por último, teniendo en cuenta que para cualquier aplicación la manipulación más conveniente del sodio es cuando su estado es líquido, y esto requiere un aporte energético que eleve su temperatura por encima de 98°C para mantenerlo en ese estado, podría ser interesante considerar como reactivo con el agua la aleación sodio – potasio (KNa), que es líquida desde los -13°C hasta 785°C [35]. Esta aleación es más energética en su reacción con el agua que la del sodio, y además se consigue mediante el frotamiento de los dos metales. Siendo el potasio el siguiente elemento más abundante de la corteza terrestre, todo apunta a que el empleo KNa puede tener muchas más ventajas que la reacción solo con sodio. Por todo ello es más que conveniente iniciar los estudios de investigación necesarios para caracterizar las potencialidades energéticas de esta aleación con el agua.

13 ANEXO 1. RESULTADOS DE EXPERIMENTOS A VOLUMEN CONSTANTE

Fecha	Nº Ensayo	Masa Na (gm)	Masa H2O (gm)	Volumen Recipiente (L)	Presión Pico 1 (bar)	Tiempo caída Presión a mínimo (ms)	Presión Valle 1 (bar)	Incremento tiempo Valle 1 - Pico 2 (ms)	Presión Pico 2 (bar)	Tiempo caída Presión al 30% (ms)	Constante Tiempo τ	Valor 5- τ (ms)	Presión Residual (5- τ) (bar)	Temperatura máxima (°C)
06/04/2016	2016 04 06 1 todo 001	10	90	3.485	1.55	192.1	0.5072	10	3.28	193.8	161.0	804.8	0.5814	-
	2016 04 06 1 todo 002	10	90	3.485	1.615	70	0.6582	20.9	3.133	135.8	112.8	564.0	0.791	-
	2016 04 06 1 todo 003	10	90	3.485	1.621	92.9	0.8482	30	5.408	142	117.9	589.7	1.323	-
07/04/2016	2016 04 07 todo 001	10	90	3.485	2.083	222.1	1.178	94.2	4.755	95.9	79.7	398.3	1.011	-
	2016 04 07 todo 002	10	90	3.485	1.491	410	1.795	454	7.396	192	159.5	797.4	1.305	-
	2016 04 07 todo 003	10	90	3.485	1.829	152.1	1.073	18.8	3.473	446.2	370.6	1853.0	1.076	-
11/04/2016	2016 04 11 todo 001	10	190	3.485	1.706	1920	1.141	250	2.905	17650	14659.8	73299.0	0.6143	-
	2016 04 11 todo 002	10	190	3.485	1.957	2390	0.9652	120	4.547	2290	1902.0	9510.2	1.009	-
	2016 04 11 todo 003	10	190	3.485	2.026	1560	1.393	630	4.285	7410	6154.6	30773.1	1.179	-
13/04/2016	2016 04 13 todo 001	10	190	3.485	2.234	2160	1.533	90	5.796	2190	1819.0	9094.9	1.459	-
	2016 04 13 todo 002	10	190	3.485	2.125	2750	0.7608	170	5.374	2850	2367.2	11835.8	1.134	-
	2016 04 13 todo 003	10	190	3.485										
15/04/2016	2016 04 15 todo 001	20	180	3.485	5.694	590	4.231	110	5.673	-	-	-	-	55.72
	2016 04 15 todo 002	20	180	3.485	2.387	2400	1.19	170	10.24	2690	2234.3	11171.3	2.347	50.27
	2016 04 15 todo 003	20	180	3.485	2.02	310	1.469	680	7.69	42310	35142.0	175709.9	2.27	54.26
18/04/2016	2016 04 18 todo 001	20	180	3.485	2.516	2500	1.521	120	11.82	2810	2333.9	11669.7	2.653	54.79
	2016 04 18 todo 002	30	170	3.485	-	-	-	-	17.05	4150	3446.9	17234.6	3.985	78.08
	2016 04 18 todo 003	30	170	3.485	-	-	-	-	13.77	10490	8712.8	43564.1	3.907	61.41
19/04/2016	2016 04 19 todo 001	30	170	3.485	3.214	1880	2.625	100	17.1	5340	4435.3	22176.6	4.33	89.56
	2016 04 19 todo 002	40	160	3.485	4.257	1270	2.45	120	17.67	4630	3845.6	19228.0	5.581	113.51
	2016 04 19 todo 003	40	160	3.485	5.237	670	3.443	120	16.69	6350	5274.2	26371.0	5.667	99.33
27/04/2016	2016 07 18 todo 001	50	150	3.901	0.9682	1690	0.6436	140	16.11	9990	8297.5	41487.6	7.431	-
	2016 04 27 todo 002	20	380	3.485	-	-	-	-	6.446	5280	4385.5	21927.4	3.508	45.55
	2016 04 28 todo 001	20	380	3.485	3.584	340	2.783	320	8.571	4910	4078.2	20390.8	2.222	26.5
28/04/2016	2016 04 28 todo 002	20	380	3.485	4.942	760	1.524	90	7.716	3630	3015.0	15075.1	2.375	32.81
	2016 04 28 todo 003	20	380	3.485	-	-	-	-	4.978	3490	2898.7	14493.7	2.603	17.84
	2016 04 28 todo 004	20	380	3.485	5.339	800	1.483	130	7.133	7220	5996.8	29984.1	2.487	18.33
03/05/2016	2016 05 03 todo 001	30	370	3.485	-	-	-	-	11.65	4970	4128.0	20640.0	5.152	45.89
	2016 05 03 todo 002	30	370	3.485	-	-	-	-	12.48	2700	2242.6	11212.9	5.054	68.43
	2016 05 03 todo 003	30	370	3.485	1.85	100	1.786	600	11.81	4710	3912.0	19560.2	4.989	54.58
04/05/2016	2016 05 04 todo 001	40	360	3.485	4.777	70	4.101	540	14.28	4760	3953.6	19767.9	5.882	67.15
	2016 05 04 todo 002	40	360	3.485	-	-	-	-	18.43	3540	2940.3	14701.3	7.402	63.72
	2016 05 04 todo 003	40	360	3.485	6.018	370	2.768	120	12.55	4680	3887.1	19435.7	6.243	-

05/05/2016	2016 05 05 todo 001	50	350	3.485	6.822	400	3.743	100	29.05	3040	2525.0	12624.9	8.669	83.25
	2016 05 05 todo 002	50	350	3.485	5.105	30	5.026	190	30.48	2950	2450.2	12251.1	9.138	75.43
	2016 05 05 todo 003	50	350	3.485	6.078	280	4.483	280	30.22	3310	2749.2	13746.2	9.118	76.67
12/05/2016	2016 05 12 todo 001	20	480	3.485	3.058	110	2.931	230	3.481	5020	4169.5	20847.6	2.444	31.86
16/05/2016	2016 05 12 todo 002	20	480	3.485	-	-	-	-	8.92	400	332.2	1661.2	2.939	-
	2016 05 16 todo 001	20	480	3.485	-	-	-	-	4.826	6120	5083.2	25415.9	1.42	39.24
	2016 05 16 todo 002	30	470	3.485	4.042	690	1.751	90	11.07	2400	1993.4	9967.0	4.461	37.83
18/05/2016	2016 05 16 todo 001	30	470	3.361	-	-	-	-	14.95	2280	1893.7	9468.7	5.089	37.24
19/05/2016	2016 05 16 todo 002	40	460	3.361	1.646	300	0.555	1910	18.12	6270	5207.8	26038.8	6.803	37.02
	2016 05 19 todo 001	40	460	3.361	3.161	200	2.327	90	20.55	3020	2508.4	12541.8	6.957	55.47
	2016 05 19 todo 002	40	460	3.361	2.698	530	0.9336	120	17.74	1540	1279.1	6395.5	9.198	56.88
20/05/2016	2016 05 19 todo 003	50	450	3.361	3.578	1060	1.944	140	29.34	1920	1594.7	7973.6	9.109	56.38
	2016 05 20 todo 001	50	450	3.361	3.609	360	2.486	150	28.44	2490	2068.2	10340.8	9.226	59.56
	2016 05 20 todo 002	50	450	3.361	1.224	406	0.5175	100	25.32	1836	1525.0	7624.8	8.418	69.2
23/05/2016	2016 05 20 todo 003	60	440	3.361	3.825	1420	2.464	100	34.57	4210	3496.8	17483.8	11.57	58.21
	2016 05 23 todo 001	60	440	3.361	4.452	1190	2.216	90	38.98	6740	5598.1	27990.7	10.14	60.47
	2016 05 31 todo 001	60	440	3.828	2.346	1710	2.064	110	31.73	1230	1021.6	5108.1	11.7	61.1
31/05/2016	2016 05 31 todo 002	60	440	3.828	4.416	350	3.159	100	39.24	1730	1436.9	7184.5	11.73	54.18
08/06/2016	2016 05 31 todo 003	60	440	3.828	2.708	80	2.572	100	33.73	1070	888.7	4443.6	11.72	51.01
	2016 06 08 todo 001	70	430	3.828	16.4	470	12.52	100	37.73	3100	2574.8	12874.0	12.72	93.3
	2016 06 08 todo 002	70	430	3.828	4.112	760	2.623	100	38.43	4910	4078.2	20390.8	13.34	72.12
22/06/2016	2016 06 08 todo 003	70	430	3.828	-	-	-	-	48.47	4280	3554.9	17774.5	16.14	79.21
	2016 06 22 todo 001	80	420	3.828	6.269	130	4.793	50	62.61	6660	5531.7	27658.4	15.3	81.91
	2016 07 01 todo 001	80	420	3.828	3.721	2240	3.101	810	47.32	7020	5830.7	29153.5	14.72	80.21
05/07/2016	2016 07 01 todo 003	90	410	3.828	6.942	280	5.797	90	69.2	13060	10847.4	54237.1	16.91	98.36
20/07/2016	2016 07 20 todo	50	150	3.828	2.79	560	1.69	5120	18.64	20420	16960.5	84802.6	6.924	-
21/07/2016	2016 07 21 todo 001	60	340	3.828	4.302	670	2.94	210	36.83	5510	4576.5	22882.6	11.2	-
21/07/2016	2016 07 21 todo 002	60	340	3.828	4.803	1810	2.055	1810	31.4	5400	4485.2	22425.8	10.66	63.8
22/07/2016	2016 07 22 todo 001	60	340	3.828	5.621	2390	1.952	410	36.77	6050	5025.0	25125.2	11.4	93.96
22/07/2016	2016 07 22 todo 002	20	280	3.828	2.935	3760	0.7644	6400	5.597	4950	4111.4	20556.9	2.837	27.57
22/07/2016	2016 07 22 todo 003	20	280	3.828	3.027	330	1.265	670	10.45	8830	7334.1	36670.3	2.801	27.28
26/07/2016	2016 07 26 todo 001	20	280	3.828	2.673	4600	0.7424	9950	4.444	7410	6154.6	30773.1	1.846	21.49
26/07/2016	2016 07 26 todo 002	40	260	3.828	3.963	2463	1.341	130	26.8	6280	5216.1	26080.3	5.549	52.29

27/07/2016	2016 07 27 todo 001	40	260	3.828	3.543	1370	1.833	280	17.66	14240	11827.5	59137.5	6.306	60.87
27/07/2016	2016 07 27 todo 002	60	240	3.828	4.043	3090	3.322	110	37.21	5790	4809.1	24045.4	11.41	86.29
27/07/2016	2016 07 27 todo 003	60	240	3.828	3.963	1070	2.612	620	34.55	7910	6569.9	32849.6	11.09	74.69
28/07/2016	2016 07 28 todo 001	60	240	3.828	4.139	1350	2.797	290	32.59	6720	5581.5	27907.6	9.65	90.29
28/07/2016	2016 07 28 todo 002	80	220	3.828	3.21	540	2.917	1720	43.79	8070	6702.8	33514.0	13.97	109.93
28/07/2016	2016 07 28 todo 003	80	220	3.828	5.106	1680	3.582	660	39.04	13780	11445.4	57227.2	12.89	95
29/07/2016	2016 07 29 todo 001	80	220	3.828	4.912	1050	4.201	4450	25.92	11700	9717.8	48589.1	11.28	195.02
01/08/2016	2016 08 01 todo 001	40	260	3.828	1.946	230	1.064	1670	16.68	6300	5232.7	26163.4	5.498	53.52
01/08/2016	2016 08 01 todo 002	80	420	3.828	6.681	470	5.559	469	51.24	5977	4964.4	24822.0	16.1	75.88
01/08/2016	2016 08 01 todo 003	80	220	3.828	5.396	1120	4.256	870	39.35	5530	4593.1	22965.6	15.69	88.19
11/08/2016	2016 08 11 todo 001	80	220	3.828	6.081	1980	4.943	1940	36.95	14776	12272.7	61363.5	12.62	108.73
11/08/2016	2016 08 11 todo 002	80	220	3.828	6.066	500	5.267	100	23.94	11970	9942.1	49710.4	11.13	63.34
11/08/2016	2016 08 11 todo 003	80	220	3.828	2.101	240	1.718	5400	43.46	17384	14438.9	72194.3	13.33	108.79
12/08/2016	2016 08 12 todo 001	80	320	3.828	19.28	790	17.65	580	28.5	12370	10274.3	51371.6	12.03	-
12/08/2016	2016 08 12 todo 002	80	320	3.828	4.871	117	4.643	1130	38.5	5690	4726.0	23630.1	15.08	-
12/08/2016	2016 08 12 todo 003	80	320	3.828	6.306	850	5.107	1130	56.69	10587	8793.4	43966.9	15.94	-
06/09/2016	2016 09 06 todo 001	70	430	3.828	7.524	950	6.208	310	43.55	7300	6063.3	30316.3	13.28	58.94
06/09/2016	2016 09 06 todo 002	70	430	3.828	-	-	-	-	34.92	17170	14261.1	71305.6	13.29	56.35
06/09/2016	2016 09 06 todo 003	70	430	3.828	4.896	93	4.583	1167	45.49	9630	7998.5	39992.6	14.71	58.19
08/09/2016	2016 09 09 todo 002	60	340	3.828	5.38	6.527	3.046	1303	40.03	280	232.6	1162.8	10.73	78.15
08/09/2016	2016 09 09 todo 003	60	340	3.828	-	-	-	-	50.02	12920	10731.1	53655.7	12.29	68.76
09/09/2016	2016 09 08 todo 001	70	430	3.828	6.781	1280	3.46	230	49.41	18550	15407.3	77036.6	10.82	45.17
09/09/2016	2016 09 08 todo 003	70	430	3.828	3.055	140	2.856	14170	47.59	21870	18164.9	90824.3	10.22	64.54
14/09/2016	2016 09 14 todo 001	70	330	3.828	2.648	46	2.518	1170	49.63	5090	4227.7	21138.4	13.88	74.13
14/09/2016	2016 09 14 todo 002	70	330	3.828	6.777	1153	3.031	530	45.35	11497	9549.2	47746.1	11.97	-
14/09/2016	2016 09 14 todo 003	70	330	3.828	4.854	1150	3.34	370	48.42	22310	18530.3	92651.6	11.43	73.65
19/09/2016	2016 09 19 todo 002	30	270	3.828	4.507	1496	0.8225	607	13.26	18460	15332.6	76662.9	4.085	-
19/09/2016	2016 09 19 todo 003	30	270	3.828	3.444	1840	2.387	580	14.62	10010	8314.1	41570.7	4.367	69.55
20/09/2016	2016 09 20 todo 001	50	250	3.828	4.191	2004	1.604	186	33.13	6177	5130.5	25652.6	8.74	69.55
20/09/2016	2016 09 20 todo 002	50	250	3.828	4.157	840	3.133	400	22.05	12790	10623.2	53115.8	6.451	58.18
21/09/2016	2016 09 21 todo 001	70	230	3.828	4.18	60	4.111	780	31.87	21710	18032.0	90159.8	10.4	33.95
21/09/2016	2016 09 21 todo 002	70	230	3.828	3.133	1177	2.438	586	39.65	21377	17755.4	88776.9	9.278	76.84
21/09/2016	2016 09 21 todo 003	70	230	3.828	6.471	480	3.423	110	40.5	30093	24994.8	124973.8	9.099	14.07
04/10/2016	2016 10 04 todo 001	70	230	3.828	9.122	100	8.946	560	47.21	10820	8986.9	44934.6	11.72	32.31
04/10/2016	2016 10 04 todo 002	70	230	3.828	6.202	260	3.722	114	48.84	12743	10584.1	52920.6	12.11	54.22

04/10/2016	20161004	todo 003	70	230	3.828	3.068	550	2.932	1130	45.19	11030	9161.3	45806.7	11.82	39.47
05/10/2016	20161005	todo 001	60	240	3.828	20.8	2640	18.4	1480	21.76	11050	9177.9	45889.7	8.288	103.49
05/10/2016	20161005	todo 002	60	240	3.828	6.49	320	4.555	430	28.61	11420	9485.3	47426.3	8.809	70.1
05/10/2016	20161005	todo 003	60	240	3.828	5.707	590	4.157	590	36.84	24510	20357.6	101788.0	8.536	66.57
28/10/2016	20161028	todo 001	50	350	3.136	6.404	1170	3.261	140	29.01	6900	5731.0	28655.1	10.4	54.85
07/11/2016	20161107	todo 001	60	450	2.717	1.468	510	0.5319	2710	35.89	10260	8521.8	42608.9	14.68	75.23
14/11/2016	20161114	todo 001	50	250	2.717	3.661	123	2.946	174	32.72	8113	6738.5	33692.6	12.21	62.83
14/11/2016	20161114	todo 002	50	150	2.717	-	-	-	-	40.75	5800	4817.4	24086.9	9.324	62.7

14 ANEXO 2. CÁLCULOS CEA

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF

 NASA-GLENN CHEMICAL EQUILIBRIUM PROGRAM CEA2, MAY 21, 2004
 BY BONNIE MCBRIDE AND SANFORD GORDON
 REFS: NASA RP-1311, PART I, 1994 AND NASA RP-1311, PART II, 1996

```

problem  o/f=1.5,1.4,1.3,1.2,1.1,1.0,9,
         rocket equilibrium tcest,k=3800
p,bar=100,
sup,ae/at=8,16,18,
react
oxid-H2O(L) wt=269 t,k=300
fuel-Na(L) wt=31 t,k=373
insert
NaOH(L)
output
siunits
plot p t rho h u g s m mw cp gam son pip mach seat cf ivac isp
end

OPTIONS: TP=F HP=F SP=F TV=F UV=F SV=F DETN=F SHOCK=F REFL=F INCD=F
RKT=T FROZ=F EQL=T IONS=F SIUNIT=T DEBUGF=F SHKDBG=F DETDBG=F TRNSPT=F

TRACE= 0.00E+00 S/R= 0.000000E+00 H/R= 0.000000E+00 U/R= 0.000000E+00

PC,BAR = 100.000000

PC/P =

SUBSONIC AREA RATIOS =

SUPERSONIC AREA RATIOS = 8.0000 16.0000 18.0000

NFZ= 1 Mdot/Ac= 0.000000E+00 Ac/At= 0.000000E+00

      REACTANT      WT.FRAC  (ENERGY/R),K  TEMP,K  DENSITY
      EXPLODED FORMULA
O: H2O(L) 1.000000 -0.343605E+05 300.00 0.0000
      H 2.00000 O 1.00000
F: Na(L) 1.000000 0.580208E+03 373.00 0.0000
      NA 1.00000

SPECIES BEING CONSIDERED IN THIS SYSTEM
(CONDENSED PHASE MAY HAVE NAME LISTED SEVERAL TIMES)
LAST thermo.inp UPDATE: 9/09/04

g 6/97 *H g 4/02 H2 tpis78 *H2
g 8/89 H2O g 6/99 H2O2 g 8/97 *Na
tpis82 NaH tpis82 NaO g12/96 NaOH
tpis82 Na2 tpis82 Na2O tpis82 Na2O2
g 8/01 Na2O2H2 g 5/97 *O g 4/02 *OH
tpis89 *O2 g 8/01 O3 g11/99 H2O(cr)
g 8/01 H2O(L) g 8/01 H2O(L) coda89 Na(cr)
coda89 Na(L) tpis82 NaH(cr) tpis82 NaH(cr)
tpis82 NaH(L) g 5/99 NaOH(a) g 5/99 NaOH(a)
g 5/99 NaOH(b) g 5/99 NaOH(c) g 5/99 NaOH(L)
g 5/99 NaOH(L) g10/99 NaO2(cr) g10/99 NaO2(L)
tpis82 Na2O(c) tpis82 Na2O(c) tpis82 Na2O(b)
tpis82 Na2O(a) tpis82 Na2O(L) tpis82 Na2O2(b)
tpis82 Na2O2(b) tpis82 Na2O2(a) tpis82 Na2O2(L)
NaOH(L) INSERTED
  
```

O/F = 1.500000

Página 1

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF

ENTHALPY (KG-MOL) (K) /KG	EFFECTIVE FUEL h(2)/R	EFFECTIVE OXIDANT h(1)/R	MIXTURE h0/R	
	0.25237674E+02	-0.19072973E+04	-0.11342833E+04	
KG-FORM.WT./KG	bi(2)	bi(1)	b0i	
*H	0.00000000E+00	0.11101687E+00	0.66610122E-01	
*O	0.00000000E+00	0.55508435E-01	0.33305061E-01	
*Na	0.43497608E-01	0.00000000E+00	0.17399043E-01	
POINT ITN	T	H	O	NA
1 14	1018.860	-6.993	-35.315	-21.366
Pinf/Pt = 1.706674				
2 3	973.006	-7.203	-36.631	-21.831
2 0	973.022	-7.203	-36.631	-21.831
Pinf/Pt = 1.706907				
2 1	973.010	-7.203	-36.631	-21.831
3 3	719.784	-8.597	-46.989	-26.242
3 2	732.005	-8.518	-46.322	-25.926
3 1	732.052	-8.518	-46.319	-25.925
4 2	678.831	-8.873	-49.402	-27.415
4 2	679.577	-8.867	-49.355	-27.392
5 2	671.884	-8.921	-49.841	-27.633
5 2	671.159	-8.926	-49.887	-27.656

THEORETICAL ROCKET PERFORMANCE ASSUMING EQUILIBRIUM

COMPOSITION DURING EXPANSION FROM INFINITE AREA COMBUSTOR

Pin = 1450.4 PSIA
CASE =

	REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000
FUEL	Na(L)	1.0000000	4824.148	373.000

O/F= 1.50000 %FUEL= 40.000000 R, EQ. RATIO= 1.261207 PHI, EQ. RATIO= 0.000000

	CHAMBER	THROAT	EXIT	EXIT	EXIT
Pinf/P	1.0000	1.7069	45.245	105.95	122.17
P, BAR	100.00	58.585	2.2102	0.94382	0.81855
T, K	1018.86	973.01	732.05	679.58	671.16
RHO, KG/CU M	4.7975 1	2.9431 1	1.4758 0	6.7886-1	5.9614-1
H, KJ/KG	-9431.01	-9539.93	-10107.9	-10230.7	-10250.4
U, KJ/KG	-9639.45	-9739.00	-10257.7	-10369.7	-10387.7
G, KJ/KG	-17058.7	-16824.3	-15588.4	-15318.3	-15275.0
S, KJ/(KG) (K)	7.4864	7.4864	7.4864	7.4864	7.4864
M, (1/n)	40.641	40.641	40.641	40.641	40.641
MM, MOL WT	23.807	23.807	23.807	23.807	23.807
(dLV/dLP)t	-1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000
(dLV/dLT)p	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Cp, KJ/(KG) (K)	2.3803	2.3722	2.3431	2.3377	2.3369
GAMMAS	1.0940	1.0944	1.0957	1.0959	1.0959
SON VEL, M/SEC	477.5	466.7	405.1	390.3	387.9
MACH NUMBER	0.000	1.000	2.872	3.240	3.300

PERFORMANCE PARAMETERS

Ae/At	1.0000	8.0000	16.000	18.000
CSTAR, M/SEC	728.0	728.0	728.0	728.0
CF	0.6411	1.5983	1.7372	1.7585
Ivac, M/SEC	893.2	1292.2	1374.6	1387.4

Página 2

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF

Isp, M/SEC 466.7 1163.5 1264.7 1280.1

MOLE FRACTIONS

*H2	0.20711	0.20711	0.20711	0.20711	0.20711
H2O	0.37867	0.37867	0.37867	0.37867	0.37867
NaOH(L)	0.41422	0.41422	0.41422	0.41422	0.41422

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MOLE FRACTIONS
WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	H2O	H2O2	*Na	NaH
NaO	NaOH	Na2	Na2O	Na2O2
Na2O2H2	*O	*OH	*O2	O3
H2O(cr)	H2O(L)	Na(cr)	Na(L)	NaH(cr)
NaH(L)	NaOH(a)	NaOH(b)	NaOH(c)	NaO2(cr)
NaO2(L)	Na2O(c)	Na2O(b)	Na2O(a)	Na2O(L)
Na2O2(b)	Na2O2(a)	Na2O2(L)		

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

O/F = 1.400000

ENTHALPY	EFFECTIVE FUEL	EFFECTIVE OXIDANT	MIXTURE
(KG-MOL) (K) /KG	h(2)/R	h(1)/R	h0/R
	0.25237674E+02	-0.19072973E+04	-0.11020744E+04
KG-FORM.WT./KG	bi(2)	bi(1)	b0i
*H	0.00000000E+00	0.11101687E+00	0.64759841E-01
*O	0.00000000E+00	0.55508435E-01	0.32379920E-01
*Na	0.43497608E-01	0.00000000E+00	0.18124003E-01

POINT ITN	T	H	O	NA
1 4	1087.204	-7.028	-33.715	-20.309
Pinf/Pt = 1.702939				
2 2	1041.312	-7.239	-34.864	-20.666
Pinf/Pt = 1.703211				
2 1	1041.299	-7.239	-34.865	-20.666
3 3	783.162	-8.636	-43.908	-24.161
3 1	784.145	-8.637	-43.862	-24.135
3 2	797.299	-8.554	-43.258	-23.872
3 1	797.352	-8.554	-43.256	-23.871
4 2	742.902	-8.908	-45.896	-25.046
4 2	743.664	-8.902	-45.856	-25.028
5 2	735.771	-8.956	-46.271	-25.219
5 2	735.030	-8.961	-46.310	-25.237

THEORETICAL ROCKET PERFORMANCE ASSUMING EQUILIBRIUM

COMPOSITION DURING EXPANSION FROM INFINITE AREA COMBUSTOR

Pin = 1450.4 PSIA
CASE =

REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
----------	---------------------------	---------------------	-----------

		Cohete Sodio Agua Paramétrica OF		
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000
FUEL	Na(L)	1.0000000	4824.148	373.000

O/F= 1.40000 %FUEL= 41.666667 R,EQ.RATIO= 1.279865 PHI,EQ.RATIO= 0.000000

	CHAMBER	THROAT	EXIT	EXIT	EXIT
Pinf/P	1.0000	1.7032	44.541	103.92	119.75
P, BAR	100.00	58.713	2.2451	0.96227	0.83507
T, K	1087.20	1041.30	797.35	743.66	735.03
RHO, KG/CU M	4.7442 1	2.9082 1	1.4523 0	6.6741-1	5.8599-1
H, KJ/KG	-9163.21	-9273.07	-9851.53	-9978.04	-9998.36
U, KJ/KG	-9373.99	-9474.95	-10006.1	-10122.2	-10140.9
G, KJ/KG	-17309.8	-17075.7	-15826.2	-15550.5	-15506.1
S, KJ/(KG) (K)	7.4932	7.4932	7.4932	7.4932	7.4932
M, (1/n)	42.885	42.885	42.885	42.885	42.885
MW, MDL WT	24.130	24.130	24.130	24.130	24.130
(dLV/dLP)t	-1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000	-1.00000
(dLV/dLT)p	1.0001	1.0001	1.0000	1.0000	1.0000
Cp, KJ/(KG) (K)	2.3984	2.3884	2.3588	2.3541	2.3534
GAMMAS	1.0880	1.0884	1.0896	1.0897	1.0898
SON VEL, M/SEC	478.9	468.7	410.4	396.4	394.1
MACH NUMBER	0.000	1.000	2.859	3.221	3.280

PERFORMANCE PARAMETERS

Ac/At	1.0000	8.0000	16.000	18.000
CSTAR, M/SEC	733.6	733.6	733.6	733.6
CF	0.6390	1.5995	1.7403	1.7618
Ivac, M/SEC	899.4	1305.1	1389.5	1402.7
Isp, M/SEC	468.7	1173.3	1276.6	1292.4

MOLE FRACTIONS

*H2	0.21867	0.21867	0.21867	0.21867	0.21867
H2O	0.34400	0.34400	0.34400	0.34400	0.34400
NaOH(L)	0.43733	0.43733	0.43733	0.43733	0.43733

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MOLE FRACTIONS WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	HO2	H2O2	*Na	NaH
NaO	NaOH	Na2	Na2O	Na2O2
Na2O2H2	*O	*OH	*O2	O3
H2O(cr)	H2O(L)	Na(cr)	Na(L)	NaH(cr)
NaH(L)	NaOH(a)	NaOH(b)	NaOH(c)	NaO2(cr)
NaO2(L)	Na2O(c)	Na2O(b)	Na2O(a)	Na2O(L)
Na2O2(b)	Na2O2(a)	Na2O2(L)		

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

O/F = 1.300000

	EFFECTIVE FUEL	EFFECTIVE OXIDANT	MIXTURE
ENTHALPY	h(2)/R	h(1)/R	h0/R
(KG-MOL) (K) /KG	0.25237674E+02	-0.19072973E+04	-0.10670647E+04
KG-FORM.WT. /KG	bi(2)	bi(1)	b0i
*H	0.00000000E+00	0.11101687E+00	0.62748666E-01
*O	0.00000000E+00	0.55508435E-01	0.31374333E-01

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF

*Na 0.43497608E-01 0.00000000E+00 0.18912003E-01

POINT	ITN	T	H	O	NA
1	4	1160.894	-7.062	-32.241	-19.310
Pinf/Pt = 1.699054					
2	2	1115.287	-7.274	-33.236	-19.569
Pinf/Pt = 1.699279					
2	1	1115.275	-7.274	-33.237	-19.569
3	3	855.442	-8.679	-40.992	-22.195
3	1	855.909	-8.680	-40.974	-22.185
3	2	869.989	-8.593	-40.433	-21.973
3	1	870.048	-8.592	-40.430	-21.973
4	2	814.663	-8.945	-42.668	-22.868
4	2	815.436	-8.940	-42.635	-22.854
5	2	807.382	-8.994	-42.986	-23.000
5	2	806.630	-8.999	-43.019	-23.013

THEORETICAL ROCKET PERFORMANCE ASSUMING EQUILIBRIUM

COMPOSITION DURING EXPANSION FROM INFINITE AREA COMBUSTOR

Pin = 1450.4 PSIA
CASE =

	REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000
FUEL	Na(L)	1.0000000	4824.148	373.000

O/F= 1.30000 %FUEL= 43.478261 R, EQ.RATIO= 1.301393 PHI, EQ.RATIO= 0.000000

	CHAMBER	THROAT	EXIT	EXIT	EXIT
Pinf/p	1.0000	1.6993	43.811	101.83	117.26
P, BAR	100.00	58.848	2.2825	0.98205	0.85279
T, K	1160.89	1115.28	870.05	815.44	806.63
RHO, KG/CU M	4.7267	2.8954	1.4396	0.6085	0.58013
H, KJ/KG	-8872.12	-8982.08	-9567.11	-9696.60	-9717.46
U, KJ/KG	-9083.68	-9185.33	-9725.67	-9845.21	-9864.46
G, KJ/KG	-17565.6	-17333.9	-16082.5	-15803.1	-15758.0
S, KJ/(KG) (K)	7.4886	7.4886	7.4886	7.4886	7.4886
M, (1/n)	45.623	45.623	45.624	45.624	45.624
MW, MOL WT	24.492	24.492	24.492	24.492	24.492
(dLV/dLP)t	-1.00001	-1.00001	-1.00000	-1.00000	-1.00000
(dLV/dLT)p	1.0002	1.0002	1.0000	1.0000	1.0000
Cp, KJ/(KG) (K)	2.4154	2.4062	2.3730	2.3692	2.3686
GAMMAS	1.0816	1.0820	1.0832	1.0833	1.0834
SON VEL, M/SEC	478.4	468.9	414.4	401.2	399.1
MACH NUMBER	0.000	1.000	2.845	3.200	3.258

PERFORMANCE PARAMETERS

Ae/At	1.0000	8.0000	16.000	18.000
CSTAR, M/SEC	736.5	736.5	736.5	736.5
CF	0.6367	1.6008	1.7435	1.7655
Ivac, M/SEC	902.4	1313.5	1399.8	1413.3
Isp, M/SEC	468.9	1179.0	1284.1	1300.3

MOLE FRACTIONS

*H2	0.23159	0.23159	0.23159	0.23159	0.23159
H2O	0.30522	0.30522	0.30522	0.30522	0.30522
NaOH(L)	0.46318	0.46318	0.46318	0.46318	0.46318

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MOLE FRACTIONS
WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	H2O	H2O2	*Na	NaH
NaO	NaOH	Na2	Na2O	Na2O2
Na2O2H2	*O	*OH	*O2	O3
H2O(cr)	H2O(L)	Na(cr)	Na(L)	NaH(cr)
NaH(L)	NaOH(a)	NaOH(b)	NaOH(c)	NaO2(cr)
NaO2(L)	Na2O(c)	Na2O(b)	Na2O(a)	Na2O(L)
Na2O2(b)	Na2O2(a)	Na2O2(L)		

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

O/F = 1.200000

ENTHALPY (KG-MOL)(K)/KG	EFFECTIVE FUEL h(2)/R	EFFECTIVE OXIDANT h(1)/R	MIXTURE h0/R	
	0.25237674E+02	-0.19072973E+04	-0.10288723E+04	
KG-FORM.WT./KG	bi(2)	bi(1)	b0i	
*H	0.00000000E+00	0.11101687E+00	0.60554656E-01	
*O	0.00000000E+00	0.55508435E-01	0.30277328E-01	
*Na	0.43497608E-01	0.00000000E+00	0.19771640E-01	
POINT ITN	T	H	O	NA
1 4	1240.734	-7.093	-30.896	-18.351
Pinf/Pt = 1.695001				
2 2	1195.797	-7.307	-31.748	-18.522
Pinf/Pt = 1.695177				
2 1	1195.788	-7.307	-31.748	-18.522
3 3	936.380	-8.724	-38.320	-20.369
3 1	936.477	-8.724	-38.316	-20.367
3 2	951.458	-8.632	-37.837	-20.206
3 1	951.526	-8.632	-37.835	-20.206
4 2	895.593	-8.985	-39.708	-20.853
4 2	896.371	-8.980	-39.681	-20.843
5 2	888.211	-9.033	-39.974	-20.949
5 2	887.454	-9.038	-40.001	-20.959

THEORETICAL ROCKET PERFORMANCE ASSUMING EQUILIBRIUM

COMPOSITION DURING EXPANSION FROM INFINITE AREA COMBUSTOR

Pin = 1450.4 PSIA

CASE =

	REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000
FUEL	Na(L)	1.0000000	4824.148	373.000

O/F= 1.20000 %FUEL= 45.454545 R, EQ. RATIO= 1.326509 PHI, EQ. RATIO= 0.000000

	CHAMBER	THROAT	EXIT	EXIT	EXIT
Pinf/P	1.0000	1.6952	43.048	99.659	114.69
P, BAR	100.00	58.991	2.3230	1.0034	0.87193

Página 6

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF					
T, K	1240.73	1195.79	951.53	896.37	887.45
RHO, KG/CU M	4.7535 1	2.9096 1	1.4399 0	6.6025-1	5.7949-1
H, KJ/KG	-8554.57	-8663.58	-9250.02	-9381.48	-9402.72
U, KJ/KG	-8764.94	-8866.33	-9411.34	-9533.45	-9553.18
G, KJ/KG	-17823.8	-17597.0	-16358.7	-16078.1	-16032.7
S, KJ/(KG)(K)	7.4708	7.4708	7.4708	7.4708	7.4708
M, (1/n)	49.038	49.038	49.040	49.040	49.040
MW, MOL WT	24.899	24.899	24.899	24.898	24.898
(dLV/dLP)t	-1.00004	-1.00004	-1.00001	-1.00001	-1.00000
(dLV/dLT)p	1.0007	1.0007	1.0002	1.0001	1.0001
Cp, KJ/(KG)(K)	2.4310	2.4231	2.3854	2.3825	2.3820
GAMMAS	1.0750	1.0753	1.0765	1.0766	1.0766
SON VEL, M/SEC	475.6	466.9	416.7	404.5	402.5
MACH NUMBER	0.000	1.000	2.830	3.179	3.236

PERFORMANCE PARAMETERS

Ae/At	1.0000	8.0000	16.000	18.000	
CSTAR, M/SEC	736.1	736.1	736.1	736.1	
CF	0.6343	1.6022	1.7471	1.7694	
Ivac, M/SEC	901.1	1316.2	1404.2	1417.9	
Isp, M/SEC	466.9	1179.4	1286.0	1302.4	

MOLE FRACTIONS

*H2	0.24614	0.24614	0.24614	0.24614	0.24614
H2O	0.26158	0.26158	0.26158	0.26158	0.26158
NaOH	0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
Na2O2H2	0.00001	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
NaOH(L)	0.49226	0.49226	0.49228	0.49228	0.49228

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MOLE FRACTIONS
WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	HO2	H2O2	*Na	NaH
NaO	Na2	Na2O	Na2O2	*O
*OH	*O2	O3	H2O(cr)	H2O(L)
Na(cr)	Na(L)	NaH(cr)	NaH(L)	NaOH(a)
NaOH(b)	NaOH(c)	NaO2(cr)	NaO2(L)	Na2O(c)
Na2O(b)	Na2O(a)	Na2O(L)	Na2O2(b)	Na2O2(a)
Na2O2(L)				

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

O/F = 1.100000

ENTHALPY (KG-MOL)(K)/KG	EFFECTIVE FUEL	EFFECTIVE OXIDANT	MIXTURE
	h(2)/R	h(1)/R	h0/R
	0.25237674E+02	-0.19072973E+04	-0.98704257E+03
KG-FORM.WT./KG	bi(2)	bi(1)	b0i
*H	0.00000000E+00	0.11101687E+00	0.58151694E-01
*O	0.00000000E+00	0.55508435E-01	0.29075847E-01
*Na	0.43497608E-01	0.00000000E+00	0.20713147E-01

POINT ITN	T	H	O	NA
1 4	1327.698	-7.120	-29.691	-17.409
Pinf/Pt = 1.690755				
2 2	1283.898	-7.336	-30.410	-17.500

Página 7

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF

Pinf/Pt = 1.690884				
2	1	1283.891	-7.336	-30.410
3	4	1027.606	-8.769	-35.895
3	2	1043.393	-8.671	-35.477
3	1	1043.467	-8.671	-35.475
4	2	987.569	-9.025	-37.017
4	0	987.573	-9.025	-37.017
4	2	988.343	-9.020	-36.994
5	2	980.147	-9.074	-37.235
5	2	979.397	-9.079	-37.257

THEORETICAL ROCKET PERFORMANCE ASSUMING EQUILIBRIUM

COMPOSITION DURING EXPANSION FROM INFINITE AREA COMBUSTOR

Pin = 1450.4 PSIA

CASE =

	REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000
FUEL	Na(L)	1.0000000	4824.148	373.000

O/F= 1.10000 %FUEL= 47.619048 R,EQ.RATIO= 1.356192 PHI,EQ.RATIO= 0.000000

	CHAMBER	THROAT	EXIT	EXIT	EXIT
Pinf/P	1.0000	1.6909	42.248	97.399	112.01
P, BAR	100.00	59.141	2.3670	1.0267	0.89278
T, K	1327.70	1283.89	1043.47	988.34	979.40
RHO, KG/CU M	4.8386	2.9592	1.4573	0.6740	5.8565
H, KJ/KG	-8206.78	-8313.53	-8894.55	-9026.59	-9048.00
U, KJ/KG	-8413.45	-8513.38	-9056.97	-9180.43	-9200.44
G, KJ/KG	-18081.2	-17862.1	-16655.0	-16377.1	-16332.0
S, KJ/(KG)(K)	7.4372	7.4372	7.4372	7.4372	7.4372
M, (1/n)	53.414	53.414	53.417	53.418	53.418
MW, MOL WT	25.360	25.360	25.360	25.360	25.360
(dLV/dLP)t	-1.00015	-1.00014	-1.00008	-1.00006	-1.00005
(dLV/dLT)p	1.0023	1.0023	1.0016	1.0012	1.0011
Cp, KJ/(KG)(K)	2.4457	2.4396	2.4030	2.3956	2.3952
GAMMA	1.0681	1.0683	1.0694	1.0696	1.0696
SON VEL, M/SEC	469.8	462.1	416.8	405.6	403.8
MACH NUMBER	0.000	1.000	2.814	3.157	3.212

PERFORMANCE PARAMETERS

Ae/At	1.0000	8.0000	16.000	18.000
CSTAR, M/SEC	731.3	731.3	731.3	731.3
CF	0.6318	1.6037	1.7509	1.7736
Ivac, M/SEC	894.6	1311.3	1400.6	1414.6
Isp, M/SEC	462.1	1172.8	1280.5	1297.1

MOLE FRACTIONS

*H2	0.26264	0.26264	0.26264	0.26264	0.26264
H2O	0.21209	0.21209	0.21208	0.21208	0.21208
*Na	0.00000	0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
NaOH	0.00003	0.00003	0.00001	0.00001	0.00001
Na2O2H2	0.00002	0.00002	0.00002	0.00001	0.00001
NaOH(L)	0.52521	0.52521	0.52524	0.52525	0.52525

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF
PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MOLE FRACTIONS
WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	HO2	H2O2	NaH	NaO
Na2	Na2O	Na2O2	*O	*OH
*O2	O3	H2O(cr)	H2O(L)	Na(cr)
Na(L)	NaH(cr)	NaH(L)	NaOH(a)	NaOH(b)
NaOH(c)	NaO2(cr)	NaO2(L)	Na2O(c)	Na2O(b)
Na2O(a)	Na2O(L)	Na2O2(b)	Na2O2(a)	Na2O2(L)

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

O/F = 1.000000

ENTHALPY (KG-MOL) (K)/KG	EFFECTIVE FUEL h(2)/R	EFFECTIVE OXIDANT h(1)/R	MIXTURE h0/R
	0.25237674E+02	-0.19072973E+04	-0.94102983E+03
KG-FORM.WT./KG	bi(2)	bi(1)	b0i
*H	0.00000000E+00	0.11101687E+00	0.55508435E-01
*O	0.00000000E+00	0.55508435E-01	0.27754218E-01
*Na	0.43497608E-01	0.00000000E+00	0.21748804E-01

POINT ITN	T	H	O	NA
1 4	1422.932	-7.142	-28.666	-16.434
Pinf/Pt = 1.686268				
2 2	1380.814	-7.360	-29.262	-16.454
Pinf/Pt = 1.686360				
2 1	1380.809	-7.360	-29.262	-16.454
3 4	1130.876	-8.813	-33.756	-16.993
3 2	1147.247	-8.708	-33.400	-16.929
3 1	1147.328	-8.708	-33.398	-16.929
4 3	1092.439	-9.065	-34.637	-17.165
4 2	1093.192	-9.060	-34.619	-17.161
5 2	1085.109	-9.114	-34.812	-17.201
5 2	1084.375	-9.119	-34.829	-17.205

THEORETICAL ROCKET PERFORMANCE ASSUMING EQUILIBRIUM

COMPOSITION DURING EXPANSION FROM INFINITE AREA COMBUSTOR

P_{in} = 1450.4 PSIA

CASE =

	REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000
FUEL	Na(L)	1.0000000	4824.148	373.000

O/F= 1.00000 %FUEL= 50.000000 R, EQ. RATIO= 1.391811 PHI, EQ. RATIO= 0.000000

	CHAMBER	THROAT	EXIT	EXIT	EXIT
Pinf/P	1.0000	1.6864	41.422	95.056	109.23
P, BAR	100.00	59.299	2.4142	1.0520	0.91549
T, K	1422.93	1380.81	1147.33	1093.19	1084.38
RHO, KG/CU M	5.0052	3.0584	1.4984	0.68532	6.0124
H, KJ/KG	-7824.20	-7927.06	-8493.77	-8624.42	-8645.67
U, KJ/KG	-8024.00	-8120.95	-8654.89	-8777.93	-8797.94
G, KJ/KG	-18331.3	-18123.1	-16965.8	-16696.7	-16652.8

Página 9

	Cohete Sodio Agua Paramétrica OF				
S, KJ/(KG)(K)	7.3841	7.3841	7.3841	7.3841	7.3841
M, (1/n)	59.216	59.213	59.209	59.211	59.212
MW, MOL WT	25.889	25.889	25.889	25.889	25.889
(dLV/dLP)t	-1.00049	-1.00054	-1.00066	-1.00061	-1.00060
(dLV/dLT)p	1.0072	1.0081	1.0119	1.0116	1.0115
Cp, KJ/(KG)(K)	2.4617	2.4593	2.4446	2.4389	2.4378
GAMMAS	1.0609	1.0610	1.0618	1.0619	1.0620
SON VEL, M/SEC	460.4	453.6	413.6	403.7	402.1
MACH NUMBER	0.000	1.000	2.798	3.133	3.188

PERFORMANCE PARAMETERS

Ae/At	1.0000	8.0000	16.000	18.000
CSTAR, M/SEC	720.9	720.9	720.9	720.9
CF	0.6292	1.6053	1.7549	1.7780
Ivac, M/SEC	881.0	1296.4	1386.4	1400.6
Isp, M/SEC	453.6	1157.2	1265.1	1281.8

MOLE FRACTIONS

*H2	0.28151	0.28151	0.28151	0.28151	0.28151
H2O	0.15550	0.15550	0.15553	0.15552	0.15552
*Na	0.00003	0.00003	0.00005	0.00005	0.00005
NaOH	0.00010	0.00010	0.00008	0.00006	0.00006
Na2O2H2	0.00005	0.00006	0.00009	0.00009	0.00009
NaOH(L)	0.56281	0.56279	0.56274	0.56276	0.56277

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MOLE FRACTIONS WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	H2	H2O2	NaH	NaO
Na2	Na2O	Na2O2	*O	*OH
*O2	O3	H2O(cr)	H2O(L)	Na(cr)
Na(L)	NaH(cr)	NaH(L)	NaOH(a)	NaOH(b)
NaOH(c)	NaO2(cr)	NaO2(L)	Na2O(c)	Na2O(b)
Na2O(a)	Na2O(L)	Na2O2(b)	Na2O2(a)	Na2O2(L)

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

$$O/F = 0.900000$$

	EFFECTIVE FUEL	EFFECTIVE OXIDANT	MIXTURE
ENTHALPY (KG-MOL) (K)/KG	h(2)/R 0.25237674E+02	h(1)/R -0.19072973E+04	h0/R -0.89017365E+03
KG-FORM.WT./KG	bi(2)	bi(1)	b0i
*H	0.00000000E+00	0.11101687E+00	0.52586938E-01
*O	0.00000000E+00	0.55508435E-01	0.26293469E-01
*Na	0.43497608E-01	0.00000000E+00	0.22893478E-01

POINT ITN	T	H	O	NA
1 5	1527.554	-7.155	-27.951	-15.294
Pinf/Pt = 1.681390				
2 3	1487.612	-7.377	-28.436	-15.254
Pinf/Pt = 1.681442				
2 1	1487.610	-7.377	-28.436	-15.254
3 4	1245.160	-8.851	-32.080	-15.293
3 2	1262.160	-8.739	-31.777	-15.270
3 1	1262.248	-8.738	-31.775	-15.270

Cohete Sodio Agua Paramétrica OF					
4	3	1208.328	-9.099	-32.766	-15.356
4	2	1209.059	-9.094	-32.752	-15.355
5	2	1201.086	-9.148	-32.906	-15.371
5	2	1200.373	-9.153	-32.920	-15.372

THEORETICAL ROCKET PERFORMANCE ASSUMING EQUILIBRIUM
COMPOSITION DURING EXPANSION FROM INFINITE AREA COMBUSTOR

Pin = 1450.4 PSIA
CASE =

	REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000
FUEL	Na(L)	1.0000000	4824.148	373.000
O/F= 0.90000 %FUEL= 52.631579 R, EQ. RATIO= 1.435345 PHI, EQ. RATIO= 0.000000				

	CHAMBER	THROAT	EXIT	EXIT	EXIT
Pinf/P	1.0000	1.6814	40.551	92.617	106.34
P, BAR	100.00	59.473	2.4660	1.0797	0.94035
T, K	1527.55	1487.61	1262.25	1209.06	1200.37
RHO, KG/CU M	5.2947 1	3.2323 1	1.5746 0	7.1912-1	6.3074-1
H, KJ/KG	-7401.36	-7498.23	-8039.22	-8165.88	-8186.56
U, KJ/KG	-7590.23	-7682.23	-8195.83	-8316.02	-8335.64
G, KJ/KG	-18560.2	-18365.2	-17260.0	-16998.1	-16955.3
S, KJ/(KG) (K)	7.3050	7.3050	7.3050	7.3050	7.3050
M, (1/n)	67.247	67.223	67.012	66.953	66.945
MW, MOL WT	26.498	26.498	26.497	26.496	26.496
(dLV/dLP)t	-1.00191	-1.00237	-1.00658	-1.00778	-1.00797
(dLV/dLT)p	1.0252	1.0320	1.1052	1.1303	1.1345
Cp, KJ/(KG) (K)	2.4900	2.4990	2.6336	2.6908	2.7008
GAMMAS	1.0529	1.0530	1.0537	1.0539	1.0540
SON VEL, M/SEC	445.9	440.2	406.2	397.8	396.4
MACH NUMBER	0.000	1.000	2.780	3.108	3.161

PERFORMANCE PARAMETERS

Ae/At	1.0000	8.0000	16.000	18.000
CSTAR, M/SEC	702.9	702.9	702.9	702.9
CF	0.6263	1.6070	1.7593	1.7829
Ivac, M/SEC	858.2	1268.1	1358.0	1372.1
Isp, M/SEC	440.2	1129.5	1236.5	1253.2

MOLE FRACTIONS

*H2	0.30323	0.30320	0.30291	0.30281	0.30280
H2O	0.09026	0.09031	0.09087	0.09105	0.09108
*Na	0.00016	0.00021	0.00078	0.00096	0.00099
NaOH	0.00027	0.00031	0.00046	0.00046	0.00046
Na2O2H2	0.00011	0.00014	0.00038	0.00045	0.00046
NaOH(L)	0.60596	0.60582	0.60459	0.60426	0.60421

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MOLE FRACTIONS
WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	HO2	H2O2	NaH	NaO
Na2	Na2O	Na2O2	*O	*OH
*O2	O3	H2O(cr)	H2O(L)	Na(cr)

Página 11

		Cohete	Sodio	Agua	Paramétrica	OF	
Na(L)	NaH(cr)		NaH(L)		NaOH(a)		NaOH(b)
NaOH(c)	NaO2(cr)		NaO2(L)		Na2O(c)		Na2O(b)
Na2O(a)	Na2O(L)		Na2O2(b)		Na2O2(a)		Na2O2(L)

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

15 ANEXO 3. CÁLCULO CEA PARA COMPARACIÓN DEL EXPERIMENTO

HP-sodio-agua-70_330.txt

NASA-GLENN CHEMICAL EQUILIBRIUM PROGRAM CEA2, MAY 21, 2004
BY BONNIE MCBRIDE AND SANFORD GORDON
REFS: NASA RP-1311, PART I, 1994 AND NASA RP-1311, PART II, 1996

```
problem
  hp p,bar=45,46,47, h/r=-1581 t,k=500
react
  fuel=Na(cr) wt=0.175 t,k=300
  oxid=H2O(L) wt=0.825 t,k=300
insert
  H2O(L) NaOH(b) NaOH(L)
output massf
plot son
end

OPTIONS: TP=F HP=T SP=F TV=F UV=F SV=F DETN=F SHOCK=F REFL=F INCD=F
RKT=F FROZ=F EQL=F IONS=F SIUNIT=T DEBUGF=F SHKDBG=F DETDBG=F TRNSPT=F
```

T,K = 500.0000

TRACE= 0.00E+00 S/R= 0.000000E+00 H/R=-1.581000E+03 U/R= 0.000000E+00

P,BAR = 45.000000 46.000000 47.000000

REACTANT	WT.FRAC	(ENERGY/R),K	TEMP,K	DENSITY
EXPLODED FORMULA				
F: Na(cr)	1.000000	0.628764E+01	300.00	0.0000
NA 1.00000				
O: H2O(L)	1.000000	-0.343605E+05	300.00	0.0000
H 2.00000 0 1.00000				

SPECIES BEING CONSIDERED IN THIS SYSTEM
(CONDENSED PHASE MAY HAVE NAME LISTED SEVERAL TIMES)
LAST thermo.inp UPDATE: 9/09/04

g 6/97 *H	g 4/02 H02	tpis78 *H2
g 8/89 H2O	g 6/99 H2O2	g 8/97 *Na
tpis82 NaH	tpis82 NaO	g12/96 NaOH
tpis82 Na2	tpis82 Na2O	tpis82 Na2O2
g 8/01 Na2O2H2	g 5/97 *O	g 4/02 *OH
tpis89 *O2	g 8/01 O3	g11/99 H2O(cr)
g 8/01 H2O(L)	g 8/01 H2O(L)	coda89 Na(cr)
coda89 Na(L)	tpis82 NaH(cr)	tpis82 NaH(cr)
tpis82 NaH(L)	g 5/99 NaOH(a)	g 5/99 NaOH(a)
g 5/99 NaOH(b)	g 5/99 NaOH(c)	g 5/99 NaOH(L)
g 5/99 NaOH(L)	g10/99 NaO2(cr)	g10/99 NaO2(L)
tpis82 Na2O(c)	tpis82 Na2O(c)	tpis82 Na2O(b)
tpis82 Na2O(a)	tpis82 Na2O(L)	tpis82 Na2O2(b)
tpis82 Na2O2(b)	tpis82 Na2O2(a)	tpis82 Na2O2(L)
H2O(L)	INSERTED	
NaOH(b)	INSERTED	
NaOH(L)	INSERTED	

O/F = 4.714286

ENTHALPY (KG-MOL)(K)/KG	EFFECTIVE FUEL h(2)/R	EFFECTIVE OXIDANT h(1)/R	MIXTURE h0/R
	0.27349710E+00	-0.19072973E+04	-0.15810000E+04
KG-FORM.WT./KG	bi(2)	bi(1)	b0i
*Na	0.43497608E-01	0.00000000E+00	0.76120814E-02

Página 1

```

HP-sodio-agua-70_330.txt
*H 0.00000000E+00 0.11101687E+00 0.91588918E-01
*O 0.00000000E+00 0.55508435E-01 0.45794459E-01
PHASE CHANGE, REPLACE NaOH(b) WITH NaOH(a)
PHASE CHANGE, REPLACE NaOH(L) WITH NaOH(a)

POINT ITN T NA H O
SINGULAR MATRIX, ITERATION 1 VARIABLE 6(EQLBRM)
SINGULAR MATRIX, ITERATION 2 VARIABLE 6(EQLBRM)
SINGULAR MATRIX, ITERATION 3 VARIABLE 6(EQLBRM)
REMOVE NaOH(a)
1 28 513.555 -38.608 -6.684 -63.124
2 3 514.580 -38.527 -6.669 -63.028
ADD NaOH(b)

50 ITERATIONS DID NOT SATISFY CONVERGENCE
REQUIREMENTS FOR THE POINT 2 (EQLBRM)

CALCULATIONS STOPPED AFTER POINT 1(EQLBRM)
PHASE CHANGE, REPLACE NaOH(b) WITH NaOH(a)
SINGULAR MATRIX, ITERATION 1 VARIABLE 6(EQLBRM)
SINGULAR MATRIX, ITERATION 2 VARIABLE 6(EQLBRM)
SINGULAR MATRIX, ITERATION 3 VARIABLE 6(EQLBRM)
REMOVE NaOH(a)
2 5 515.577 -38.448 -6.655 -62.935

```

THERMODYNAMIC EQUILIBRIUM COMBUSTION PROPERTIES AT ASSIGNED
PRESSURES

CASE =

	REACTANT	WT FRACTION (SEE NOTE)	ENERGY KJ/KG-MOL	TEMP K
FUEL	Na(cr)	1.0000000	52.279	300.000
OXIDANT	H2O(L)	1.0000000	-285690.685	300.000

O/F= 4.71429 %FUEL= 17.500000 R, EQ. RATIO= 1.083111 PHI, EQ. RATIO= 0.000000

THERMODYNAMIC PROPERTIES

P, BAR	45.000	47.000
T, K	513.56	515.58
RHO, KG/CU M	9.9542 1	1.0572 2
H, KJ/KG	-13145.2	-4645.07
U, KJ/KG	-13190.4	-4689.53
G, KJ/KG	-16212.3	-7722.22
S, KJ/(KG)(K)	5.9721	5.9683
M, (1/n)	94.454	96.420
MW, MOL WT	20.161	20.161
(dLV/dLP)t	-2.78168	-1.00000
(dLV/dLT)p	15.4363	0.0000
Cp, KJ/(KG)(K)	13.9729	0.0000
GAMMA _s	0.7809	1.0000
SON VEL, M/SEC	187.9	210.9

MASS FRACTIONS

*H2	0.00767	0.00767
-----	---------	---------

Página 2

HP-sodio-agua-70_330.txt

H2O	0.12216	0.11827
H2O(L)	0.56570	0.56959
NaOH(a)	0.30446	0.30446

* THERMODYNAMIC PROPERTIES FITTED TO 20000.K

PRODUCTS WHICH WERE CONSIDERED BUT WHOSE MASS FRACTIONS
WERE LESS THAN 5.000000E-06 FOR ALL ASSIGNED CONDITIONS

*H	H2O2	H2O2	*Na	NaH
NaO	NaOH	Na2	Na2O	Na2O2
Na2O2H2	*O	*OH	*O2	O3
H2O(cr)	Na(cr)	Na(L)	NaH(cr)	NaH(L)
NaOH(b)	NaOH(c)	NaOH(L)	NaO2(cr)	NaO2(L)
Na2O(c)	Na2O(b)	Na2O(a)	Na2O(L)	Na2O2(b)
Na2O2(a)	Na2O2(L)			

NOTE. WEIGHT FRACTION OF FUEL IN TOTAL FUELS AND OF OXIDANT IN TOTAL OXIDANTS

16 ANEXO 4. HOJA TÉCNICA DE LA ALEACIÓN SODIO - POTASIO

Technical Data Sheet

DECEMBER, 2004

Sodium- Potassium Alloy (NaK)

OTHER NAMES

Potassium-Sodium alloy;
NaK

CAS REG. NUMBER

[11135-81-2] for NaK
[7440-23-5] for Na
[7440-09-7] for K

FORMULA

Eutectic mixture is 78 wt% K
and 22 wt% Na

FORMULA WEIGHT

39.10 g/mol for K
22.99 g/mol for Na

RELATED REAGENTS

Potassium
Sodium
Lithium

TYPICAL PROPERTIES

PHYSICAL DATA

The listed properties are for eutectic NaK (78 wt% K, 22 wt% Na)

Density: 0.866 g/mL at 21 °C
0.855 g/mL at 100 °C
Melting Point: -12.6 °C/9.3 °F
Boiling Point: 785 °C/1,446 °F
Vapor Pressure: 1 mm Hg at 355 °C
Electrical Conductivity: 40.7 microhm-cm
Thermal Conductivity: 0.232 W/cm at 100 °C

SOLUBILITY

Potassium and sodium are miscible in all portions. The alloy, in concentrations of 40-90 wt% K, is liquid at room temperature. Potassium-sodium alloy is not soluble in hydrocarbons or ethers.

STABILITY

NaK reacts explosively with water to form hydrogen, potassium hydroxide and sodium hydroxide. NaK reacts with air to form potassium superoxide, which can react explosively with organic materials. KO₂ is a yellow solid.

APPEARANCE

Silvery metallic liquid

PACKAGING

- Cylinder containing 0.5 Kg NaK
- Cylinder containing 14 Kg NaK
- Cylinder containing 90 Kg NaK
- Cylinder containing 340Kg NaK

SHIPPING INFORMATION

UN1422, PG4.3
Water-reactive

PRODUCT FEATURES

- High purity
- Liquid metal
- Non-corrosive to metals
- Custom packaging available
- Bulk quantities

PRODUCT BENEFITS

- Greater reactivity than solid alkali metals
- Higher surface area of reactive metal
- Easily applied to solid supports
- For catalyzed reactions and isomerizations
- Excellent catalyst for side-chain alkylation of aromatics
- Reducing agent for inorganic and organic compounds

CONTACT INFORMATION:

For Information Call:
1-866-4BORANE (U.S. Only)
or +1-724-538-1300
FAX: +1-724-538-1260
www.basf.com/inorganics

BASF Corporation
Inorganics
1424 Mars-Evans City Road
Evans City, PA 16033

Chemicals

BASF
The Chemical Company

17 REFERENCIAS

- [1]. Stephen R. Turns, *An Introduction to Combustion. Concepts and Applications*, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 2th Edition, Chapter 1.
- [2]. F. EL-Mahallawy and El-Din Habik, *Fundamentals and Technology of Combustion*, Elsevier Science Ltd., 2002
- [3]. BP Statistical Review of World Energy, June 2015
- [4]. BP Statistical Review of World Energy, June 2016
- [5]. BP Statistical Review of World Energy, June 2017
- [6]. 007-Sodium Metal". *Mcssl.com*. Retrieved 2010-11-27
- [7]. Naminosuke Kubota, *Propellants and Explosives Thermochemical Aspects of Combustion, Chapter 2, Thermochemistry of Combustion*, WILEY, 2th Edition.
- [8]. Naminosuke Kubota, *Propellants and Explosives Thermochemical Aspects of Combustion, Chapter 3, Combustion Wave Propagation*, WILEY, 2th Edition.
- [9]. Biomass Energy Data Book. U.S. Department of Energy. 2011.
- [10]. Gordon B. Haxel et al, Rare Earth Elements—Critical Resources for High Technology, U.S. Geological Survey, Fact Sheet 087.02.
- [11]. Alfred Klemm, Gabriele Hartmann, Ludwig Lange, *Sodium and Sodium Alloys*, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2005, Wiley-VCH, Weinheim.
- [12]. Eggeman, Tim; Updated By Staff (2007), *Sodium and Sodium Alloys*, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons.
- [13]. Pauling, Linus, *General Chemistry*, 1970 ed., Dover Publications
- [14]. Sodium as a Fast Reactor Coolant presented by Thomas H. Fanning. Nuclear Engineering Division. U.S. Department of Energy. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Topical Seminar Series on Sodium Fast Reactors. May 3, 2007
- [15]. Chan-Gyu Park, et al. *Review of the finite element models for a structural integrity evaluation of the sodium-cooled fast reactor high temperature piping*, Journal of Mechanical Science and Technology, Sep. 2012, Vol 26, Issue 9, pp 2807-2813.
- [16]. Shin Kichi, et al. *Theoretical Study of Sodium-Water Surface Reaction Mechanism*, Journal of Power and Energy Systems, Vol 6, No 2, 2012.
- [17]. Takashi Takata, *Numerical Approach to the Safety Evaluation of Sodium-Water Reaction*, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 40, No. 10, p. 708-718 (October 2003).
- [18]. Michael Epstein, et al. *Analytical Model for Peak Temperature within a Sodium-Water Reaction Jet*, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 43, No. 1, p. 43-54 (2006).
- [19]. David A. Greene, *Steam Generator Vessel Pressures Resulting from a Sodium-Water Reaction – A Computer Analysis with the Swear Code*, Nuclear Technology, Vol. 14, June 1972.
- [20]. Naomichi Kanegae, et al. *The Effects of Nozzle – to – Target Distance on Wastage in Small – Leak Sodium Water Reactions*, Nuclear Tehcnology, Vol. 40, Oct. 1978.
- [21]. Eugene E. Ketchen y W. E. Wallace, *Thermal Properties of the Alkali Metals. I. The Heats of Reaction of Sodium and Potassium with Water at 25°*, Contribution No. 804 from Department of Chemistry, University of Pittsburg.
- [22]. A. G. Newlands and W.D. Halstead, *The Reaction Between Water Droplets and Molten Sodium*, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol 21, pp. 897-903, Nov. 1977.

- [23]. R. D. Newmann, et al. *On Sodium / Water Reactions*, Technical Note.
- [24]. Sofia Carnevali, et al. *Unsteady aspects of sodium-water-air reaction*, Chemical Engineering Research and Design, 91 (2013) 633-639.
- [25]. Martin Kilpatrick, Louis L. Barker Jr., C. Dana McKinney Jr., *Studies of Fast Reactions which Evolve Gases. The reaction of Sodium – Potassium Alloy with Water in the Presence and Absence of Oxygen*, Journal of Physical Chemistry, 1953, 57 (4), pp 385-390.
- [26]. George P. Sutton, *Rocket Propulsion Elements, An Introduction to the Engineering of Rockets*, Sixth Edition, Wiley Interscience Publication, 1992 John Wiley & Sons, Inc.
- [27]. Sanford Gordon, Bonnie J. McBride, *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications*, NASA, 1994.
- [28]. Juan Manuel Tizón, *Seminario de Sistemas de Propulsión basado en Propulsantes Sólidos*, Escuela de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, UPM, Diciembre 2012.
- [29]. THECNICAL MANUAL, *Army Ammunition Data Sheets for Rockets, Rockets System, Rockets Fuzes, Rockets Motor*, Headquarters Department of the Army, December 1981.
- [30]. RTO-TR-043, *Evaluation of Methods for Solid Propellant Burning Rate Measurements*, Applied Vehicle Technology Panel (AVT) Task group 016 from Oct. 1997 to August 2001.
- [31]. U.S. Patent 4276145.
- [32]. Eugene L. Fleeman, *Tactical Missile Design*, AIAA Education Series, 2001.
- [33]. The Boston Consulting Group, *Estudio sobre la evolución de la tecnología y prospectiva de costes por tecnologías de energías renovables a 2020-2030 Tecnologías de Almacenamiento*, Marzo 2010, IDAE.
- [34]. Ángel G. Fernández, *Estudios Físico – Químicos y de Corrosión a Elevada Temperatura para el Diseño de Nuevos Fluidos Almacenadores de Energía en Centrales Solares de Concentración*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas, Dpto. de Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Madrid 2013.
- [35]. https://www.basf.com/inorganics/pdfs/tech_datasheet/NaK.pdf