

2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA.**

**DISEÑO DE UN QUEMADOR DE  
HIDROGENO PARA USO DOMESTICO  
(COCCION DE ALIMENTOS)**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
**INGENIERO QUIMICO**  
P R E S E N T A N:  
**MARTINEZ RUIZ JAIME**  
**RAMIREZ MARTINEZ BETZABETH**

Director de Tesis: ING. RAFAEL SANCHEZ DIRZO



275377

TESIS CON MEXICO, D.F., 1999  
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/010/99

ASUNTO: Asignación de Jurado

C. BETZABETH RAMIREZ MARTINEZ  
JAIME MARTINEZ RUIZ  
*Presente*

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado para el Examen Profesional, le comunico que la Jefatura a mi cargo ha propuesto la siguiente designación:

*Presidente: I.Q. Rafael Sánchez Dirzo*  
*Vocal: I.Q. Angel Gómez González*  
*Secretario: I.Q. Esteban Minor Pérez*  
*Suplente: I.Q. Gloria Peralta Otañez*  
*Suplente: I.Q. Cuauhtémoc Lagos Chávez*

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
México, D.F., 16 de Febrero de 1999

EL JEFE DE LA CARRERA

I.Q. ARTURO E. MÉNDEZ GUTIÉRREZ

lrm

## A MIS PADRES Y HERMANOS DEDICO LOS SIGUIENTES AGRADECIMIENTOS

Como una forma de eterno *agradecimiento* a mis padres, quiero brindarles este momento de felicidad y dicha que siento, y decirles de todo corazón gracias por su apoyo y consejos, he llegado a realizar una de mis tan ansiadas metas, la cual constituye la herencia más valiosa que pueda obtener en esta vida como ser humano.

A mis hermanos Lety, Perla, Paty, Salvador y Mauricio a quienes hago partícipes y comparto junto con ellos también este pequeño logro alcanzado por su hermano que tanto los quiere y aprecia

Con cariño

Jaime Martínez Ruíz.

## DEDICADA A:

BETZABETH:

A mi compañera inseparable del alma Betzabeth que desde que la conocí, siempre mantuvo ese apoyo incondicional en las buenas y en las malas, juntos logramos conocer la verdad de la vida como seres humanos hoy realizados.

Una vez más mil gracias también por ese enorme cariño y respeto que guardas hacia mi como compañera eres formidable, por eso dedico este trabajo de equipo mutuo, y este logro tan afamado que alcanzamos ambos porque también sabes que para los dos esto significa una gloria tan anhelada y esperada, una libertad justa que ya merecemos, y sobre todo el poder que podremos obtener si nos lo proponemos juntos en un futuro

Con cariño

Jaime.

---

## DEDICADA A FAMILIARES Y AMIGOS:

A la Señora Josefina viuda de Palacios por su gran apoyo familiar que siempre ha tenido con nosotros, mil gracias.

A todos mis amigos, familiares, y personas que siempre mantuvieron en mí esa esperanza de superación personal, mil gracias a todos

Y finalmente a la vida, porque sin ella no tendría la oportunidad de ser feliz con mi familia, mis amigos, sin olvidar también que estas experiencias son el complemento más maravilloso para ser un poco más humano.

Con una gran admiración y respeto.

Jaime Martínez Ruíz

## DEDICADA A

PAPÁ Y MAMÁ:

Por el apoyo y cariño que me han brindado desde que nací. Por todos los desvelos y momentos de angustia que han compartido conmigo a través de mi vida como estudiante y sobretodo durante mi carrera, gracias por preocuparse desde siempre para darme lo más valioso que pueda tener en la vida. *El conocimiento.*

A MIS HERMANAS BERE Y VIQUI:

Por su comprensión y cariño durante mis malos ratos, además de su apoyo y ayuda en las noches de desvelo, les dedico este trabajo como prueba de que el camino tortuoso, cansado y aveces doloroso en la carrera si tiene un final, ¡Animo!. ☺

Con cariño.

Betza.

## AGRADECIMIENTO A

JAIME

Por el tiempo que hemos convivido juntos, ha sido tiempo de enseñanza mutua que ha hecho de esta etapa la más importante y la más feliz de mi vida porque durante las experiencias que hemos compartido de la mano me enseñaste con preocupación y paciencia a ser valiente para enfrentar al mundo, con amor a conocerme a *mi misma* y con *cañño* me enseñaste que la vida existe más allá de mi horizonte.

Gracias por tu apoyo y comprensión en todo momento ya que sin ellos no hubiese sido posible llegar juntos hasta donde estamos

Con todo mi amor.

Betza.



---

## AGRADECIMIENTOS

### A MIS TÍOS:

José, Judith, Lafo, Churu, Sergio y Daniel, porque de una u otra manera siempre han estado al tanto de mi bienestar y progreso, alentándome a seguir adelante.

Gracias

Betza.

### A MIS AMIGOS Y AMIGAS:

Lupita, Lety, Bertha, Ivonne, Ana Luisa, Thelma, Alejandro, Melchor, Ricardo, Pedro, Valentín, Juan Carlos, Pitar, Adrian, Salvador, Joel y Chema

Con cariño.

Betza

## AGRADECIMIENTO

A ANDRES AQUINO Y MARTHA BECERRIL.

Por su amistad, aprecio y apoyo no sólo durante *la realización de mi servicio social*, sino hasta hoy; gracias por su ayuda durante el trabajo, y también en los momentos en los que necesité un consejo para seguir adelante

Con gran aprecio

Betza.

A NUESTRO DIRECTOR DE TESIS

ING. RAFAEL SÁNCHEZ DIRZO

Por su valiosa colaboración y dirección de este trabajo, y a su gran apoyo comprensión y amistad brindada durante este tiempo. Gracias por su preocupación y aliento para que continuemos *con nuestra superación profesional*.

Jaime Martínez y Betzabeth Ramírez.

## ÍNDICE

OFICIO DE ASIGNACIÓN DE JURADO	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE	9
RESUMEN	11
OBJETIVOS	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1 EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE	14
1 1 Hidrógeno como combustible.	15
1 2 El hidrógeno para uso doméstico.	18
CAPÍTULO 2 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO	21
2 1 Propiedades del hidrógeno combustible.	22
2 2 Comportamiento químico del hidrógeno.	23
CAPÍTULO 3 DISEÑO TERMODINÁMICO	28
3 1 Bases de diseño	29
3 1.1 Determinación de la potencia del quemador	29
3 1.2 Determinación del caudal másico de hidrógeno.	30
3.2 Relación de combustión hidrógeno-aire.	31
3 2 1 Aire estequiométrico	31
3 2 2 Exceso de aire.	32
3.2 3 Relación aire-combustible	33
3 2.4 Intervalo de combustibilidad	34
3.2 5 Entalpía de reacción y aire suministrado x	34

CAPÍTULO 4	
DISEÑO AERODINÁMICO	39
4 1 Velocidad de combustión del hidrógeno.	40
4 2 Prototipo de Quemador Premezcla Hidrógeno-Aire.	44
4 2 1 Sistema de mezclado.	45
4.2 2 Pérdidas de energía por fricción.	46
4 2.3 Caídas de presión	49
4 2 4 Presión a la entrada de la válvula	49
4.2.5 Diseño y dimensionamiento del quemador	50
4.2.6 Dimensionamiento de la válvula.	52
4 3 Prototipo de Quemador por Difusión Atmosférica.	55
4.3.1 Pérdidas de energía por fricción.	55
4.3.2 Caídas de presión.	58
4 3.3 Presión a la entrada de la válvula.	59
4.3.4 Diseño y dimensionamiento del quemador.	60
4 3 5 Dimensionamiento de la válvula.	61
CAPÍTULO 5	
ASPECTOS DE SEGURIDAD	64
5.1 Aspectos de seguridad.	65
5 2 Propiedades del hidrógeno que lo hacen más peligroso de manejar que el gas natural.	65
5.3 Formas en las que el hidrógeno es menos peligroso que el gas natural.	66
5 4 Medidas de seguridad necesarias para el manejo del hidrógeno.	67
5 5 Aditivos para el hidrógeno.	70
5.6 Usos industriales y seguridad.	70
CONCLUSIONES	74
APÉNDICE A Entalpías para el aire, oxígeno y vapor de agua.	77
APÉNDICE B Análisis termodinámico del quemador de hidrógeno.	101
APÉNDICE C Imágenes de quemadores domésticos.	106
APÉNDICE D Datos para el análisis termodinámico.	119
APÉNDICE E Factores de conversión.	123
GLOSARIO	125
REFERENCIAS	129

---

## RESUMEN

Respondiendo a las necesidades ecológicas del planeta se exponen las ventajas y características del hidrógeno como alternativa energética para el nuevo siglo, sustituyendo el gas L.P. por éste combustible desarrollando para esto una base de cálculo que permite determinar la temperatura y el rango de mezclas combustibles  $H_2$  - Aire seguras de manipular para su combustión atmosférica.

A través de un análisis estadístico que refleja las necesidades energéticas de un hogar convencional para cinco personas, se determina la potencia energética que cubre las necesidades de cocción de alimentos y potabilización de agua a partir de este dato y un análisis termodinámico se plantea el diseño aerodinámico de un quemador con sección de premezclado  $H_2$  - Aire y otro prototipo de difusión atmosférica de  $H_2$ , ambos con mínima turbulencia procurando un régimen de flujo laminar.

También se plantean propuestas de seguridad para el manejo de ambos quemadores y los planos de los mismos esperando sean de utilidad para su manufactura y aplicación en un futuro no lejano.

## OBJETIVOS

- *Recopilar información bibliográfica referente al uso del hidrógeno como fuente alternativa de energía térmica.*
- *Buscar los datos específicos de ingeniería que permitan el estudio de los fenómenos de la combustión del hidrógeno así como las características térmicas y luminiscentes de la flama, para el diseño de los quemadores caseros.*
- *Aplicar los criterios generales de seguridad para el empleo del hidrógeno así como diferentes datos de ingeniería para establecer las bases de diseño en la válvula de flujo y los materiales a utilizar en el diseño de los quemadores de hidrógeno a nivel prototipo.*
- *Estructurar una base de cálculo para el diseño de dos quemadores de hidrógeno prototipo a) Con pmezcla aire-hidrógeno, y b) Por difusión atmosférica.*

---

## INTRODUCCIÓN

Todas las sociedades humanas desde las primitivas hasta las más industrializadas han utilizado la leña, el carbón, la materia orgánica, el petróleo y el gas natural para satisfacer sus necesidades de energía térmica para su sobrevivencia; los productos de esta combustión son arrojados a la atmósfera causando graves daños ambientales desde la lluvia ácida hasta el efecto de invernadero, además de la crisis económico-petrolera en todo el mundo que ocasiona el uso de los hidrocarburos para la producción de energía, todo esto ha llevado a la humanidad al desarrollo de un nuevo combustible para el siglo venidero cuyo uso no altere el equilibrio ambiental.

El hidrógeno a pesar de no ser una fuente primaria de energía posee indudables ventajas como ser un combustible muy potente, de reservas ilimitadas y de alta pureza en su obtención además de no ser contaminante ya que su combustión sólo origina vapor de agua, es por eso que en todo el mundo se está iniciando el desarrollo de tecnologías encaminadas a sustituir los hidrocarburos como fuente primaria de energía para generar todos los servicios que demandan las sociedades modernas.

Por todas estas razones el hidrógeno ha sido considerado hace ya varios años como "el combustible del futuro", de esta manera la ciencia y la tecnología están encaminadas a la investigación para el desarrollo de nuevas herramientas que nos permitan llegar a utilizarlo tan cotidianamente como se hace hoy en día con el gas L.P., el gas natural y otros hidrocarburos. Tanto en los hogares como en las industrias, el empleo práctico y seguro del hidrógeno para el nuevo siglo requiere del desarrollo de nuevos accesorios y equipos que permitan utilizar este combustible.

De esta manera la producción de energía térmica utilizando hidrógeno como combustible en un hogar convencional para cinco personas requiere del diseño de un quemador aplicable a las necesidades de cocción y potabilización de agua y, al mismo tiempo se adapte a los espacios destinados para este fin, de tal manera que pueda en un futuro no lejano utilizarse en una estufa clásica pero con todos los implementos necesarios para su uso diario de una manera segura y práctica.

# **CAPÍTULO 1**



## **EL HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE**



## 1.1 HIDRÓGENO COMO COMBUSTIBLE.

El hidrógeno es un elemento que se halla en la atmósfera de la Tierra en un 0 00005% como  $H_2$ .

El primer científico en identificar este gas invisible, incoloro, inodoro e insípido como elemento fue el inglés Henry Cavendish en 1766; descubrió que los vapores que se desprendían al hacer reaccionar un ácido con un metal eran mucho más ligeros que el aire. Poco después el químico francés Antonio Lavoisier le dio el nombre de *hidrogene* (generador de agua). Su primera aplicación práctica fue en 1783 cuando Jaques Alexandre Cesar Charles llenó de hidrógeno un globo de 5 metros de diámetro que partió desde el campo Marte Parisino internándose 25 Km, en la campiña

**En 1870 cuando el petróleo apenas se conocía y la electricidad sólo fluía en los laboratorios, Julio Verne explicaba su particular visión del futuro energético de la humanidad "Llegará el día en que el agua nos sirva de combustible. El hidrógeno y el oxígeno, sus dos componentes, serán fuente inagotable de luz y calor, y desplegarán una fuerza muchísimo mayor de la que posee el carbón. Las bodegas de los buques y tenders de las locomotoras llevarán en vez de carbón, estos dos gases condensados, que arderán en las calderas produciendo un calor enorme. Y en nuestras casas también nos calentaremos con agua cuando se agoten las minas de carbón. El agua es el carbón del futuro".**

Desde aquel entonces las investigaciones que se han desarrollado para el empleo del hidrógeno han hecho considerar a científicos e ingenieros que un sistema de energía de hidrógeno puede formar el enlace entre los nuevos recursos energéticos y el usuario. Si consideramos los costos ecológicos éste es el combustible más limpio y será el más económico de producir en un futuro. En los sistemas de energía de hidrógeno se concibe que dicho gas deberá ser producido a partir de recursos energéticos no fósiles, y deberá aplicarse en donde los combustibles fósiles son usados hoy en día, incluyendo los requerimientos humanos establecidos.

En dicho sistema, el hidrógeno además de ser una fuente de energía primaria, es una fuente intermediaria de energía, una forma secundaria de energía, o una energía transportable, dependiendo del uso que se le dé.

El hidrógeno además de poseer las cualidades más deseables como combustible tiene diversos usos, por ejemplo para producir amoníaco, combinándolo con nitrógeno,

también como materia prima en la fabricación de sustancias orgánicas para el sector alimentario, como agente reductor en la metalurgia y la petroquímica, como aislante térmico en generadores y como combustible para los sopletes oxihídricos, entre muchos otros usos.

Dependiendo del empleo que se le dé al hidrógeno se distingue como Hidrógeno Cautivo, Hidrógeno Comercial, e Hidrógeno Combustible. El primero es el hidrógeno que se utiliza en los sistemas de proceso para la producción de fertilizantes, en las refinerías de petróleo, etc. El segundo es el hidrógeno usado para múltiples propósitos, se produce en un lugar y se transporta a otro; y por último el Hidrógeno Combustible que se define como el hidrógeno empleado para automotores, turbinas de avión y cohetes; así como combustible con propósitos de calentamiento y producción de electricidad.

Una ventaja del hidrógeno como fuente de energía térmica, comparado con la electricidad, es que se puede almacenar para su uso posterior, mientras que la electricidad hay que utilizarla conforme se genera, en este sentido la utilización de hidrógeno como vector energético de fuentes primarias alternativas es una opción que ha ido cobrando fuerza en las dos últimas décadas. Así lo demuestra el rápido crecimiento registrado para la inversión en las tareas de investigación y desarrollo en ese campo en países como Canadá, E U A., Japón y Alemania

Las razones de este interés tienen fundamento no sólo en la compatibilidad ecológica del sistema con el medio ambiente ya que la combustión de hidrógeno con oxígeno sólo produce vapor de agua; sino también en la abundancia y disponibilidad de la materia prima que es el agua, la cual existe en toda la biosfera de la Tierra, existencia que hace un total aproximado de 1500 millones de  $\text{Km}^3$  utilizando la electrólisis con electricidad generada a partir de fuentes renovables no fósiles como paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y centrales hidráulicas entre otros. Otra de las razones y la principal de ellas son las propiedades que posee el hidrógeno como combustible por su alto contenido energético que proporciona 120 909 MJ/Kg, frente a los 48 MJ/Kg del gas natural, 44.5 MJ/Kg de la gasolina ó 55.5 MJ/Kg del metano (Ver Tabla 2.1), como puede observarse el hidrógeno es casi tres veces más energético que los hidrocarburos, pero requiere de volúmenes de almacenamiento considerablemente mayores ya que su densidad es menor; si el hidrógeno se confina en forma gaseosa, el contenedor tendría que soportar presiones de hasta 200 atmósferas. Aunque el hidrógeno líquido ocupa menos espacio que el gaseoso, primero requiere ser enfriado hasta los  $-253^{\circ}\text{C}$  y luego guardarse en un depósito bien aislado con doble pared tipo termoforrado con 70 capas de aluminio y fibra de vidrio para minimizar el paso de calor. Esta desventaja se reduce en la práctica ya que la eficiencia de conversión

energética para el caso del hidrógeno respecto de los hidrocarburos es mayor en un factor promedio cercano a 1.25, sin embargo, también puede almacenarse en el subsuelo

Otra forma de almacenamiento se lleva a cabo por reacción química reversible con diversas sustancias formando hidruros metálicos, por ejemplo el hidruro de magnesio ó como hidruro de un metal de las tierras raras y níquel, por ejemplo  $\text{LaNi}_5$ . La absorción del hidrógeno por el metal es exotérmica, por el contrario, para liberar el hidrógeno es necesario proporcionar calor.

Por otra parte, la velocidad de la flama y el amplio rango de composiciones de mezcla aceptables determinan que sea un combustible muy apropiado para obtener trabajo ó energía útil operable, con base en la combustión. Finalmente, la alta temperatura y la baja luminosidad de su flama lo hacen más seguro en muchas aplicaciones en las que se usa el gas natural o la nafta, sumando la conductividad térmica y la capacidad calorífica del hidrógeno que permiten diseños con mejor eficiencia e índices de contaminación prácticamente nulos; este grupo de dispositivos incluye desde quemadores para cocinas hasta propulsores de vehículos espaciales, pasando por generadores de vapor y motores de vehículos terrestres ó aéreos

Si a todo esto se suma el hecho de que el hidrógeno no es tóxico si se inhala, y que en altas concentraciones sólo produce asfixia, el hidrógeno reúne las condiciones óptimas para sustituir a los combustibles fósiles, y además en un tiempo, razonable

Así entonces hay que señalar que la introducción de un vector energético de las características del hidrógeno debería tener consecuencias positivas sobre la estabilidad política mundial: al tratarse de un esquema aplicable a cualquier tipo de fuente, todas las naciones estarían en condiciones de autoabastecerse de, al menos, una parte importante de su necesidad energética, dado que las fuentes renovables están distribuidas de un modo mucho más homogéneo que las reservas de hidrocarburos; por lo tanto, se reduciría considerablemente la posibilidad de que se produzcan situaciones de tensión del tipo de las vividas alrededor de las cuencas petrolíferas del Golfo Pérsico.

## 1.2 EL HIDRÓGENO PARA USO DOMÉSTICO

Desde el siglo XIX el hidrógeno-rico llamado entonces como "town-gas" *manufacturado del carbón* fue usado como combustible en los hogares para proporcionar calor.

Tiempo después en los Estados Unidos *sustituyen el "town-gas" por gas natural* que sería distribuido por medio de largas tuberías, es entonces cuando en los años de 1940 a los 50's en muchas regiones del mundo el gas natural se expende y está disponible para las necesidades de las poblaciones. El "town-gas" comúnmente estaba compuesto la mitad de hidrógeno y la mitad de monóxido de carbono (con trazas de metano y otros gases combustibles)

Experimentos realizados por investigadores en sistemas de energía muestran que el hidrógeno puede ser convertido a energía térmica 24% más eficientemente que los combustibles fósiles, por esta razón sus aplicaciones industriales, comerciales y residenciales desde el punto de vista estricto de las calificaciones tecnológicas, el hidrógeno es un excelente combustible para casi cualquier tipo de calentamiento ya que se puede usar en el hogar para cocinar y para calefacción e incluso para iluminación esto consiste en la *conduluminiscencia*, un proceso en frío, en el cual se esparce fósforo en el interior de un tubo similar al de una lámpara fluorescente ordinaria; al entrar en contacto con el fósforo, pequeñas cantidades de hidrógeno se combinan con oxígeno del aire y excitan al fósforo, produciendo luz por luminiscencia. Para el calentamiento y el enfriamiento este combustible se convierte en energía térmica, de tal manera que para satisfacer estos requerimientos el hidrógeno es enviado de las plantas de producción o puertos por medio de tuberías subterráneas a las industrias, edificios y casas.

A pesar de las numerosas ventajas del hidrógeno como combustible para calentamiento directo, en particular en el hogar, su aplicación debe contemplarse en términos del concepto de energía total de una instalación alimentada exclusivamente con hidrógeno (casa "all-hidrogen"). Cuando el uso directo del hidrógeno para calentamiento es grande, la economía es más favorable. La conversión de quemadores y otros aspectos de *diseño de sistemas e instalaciones* aunque es costosa y tiene algunos inconvenientes, no es insuperable económicamente. Con el tiempo modificaciones semejantes se hicieron en Estados Unidos, cuando las comunidades cambiaron del *gas fabricado (aproximadamente*

50% de hidrógeno) al gas natural. Tales cambios son más recientes en las comunidades Europeas.

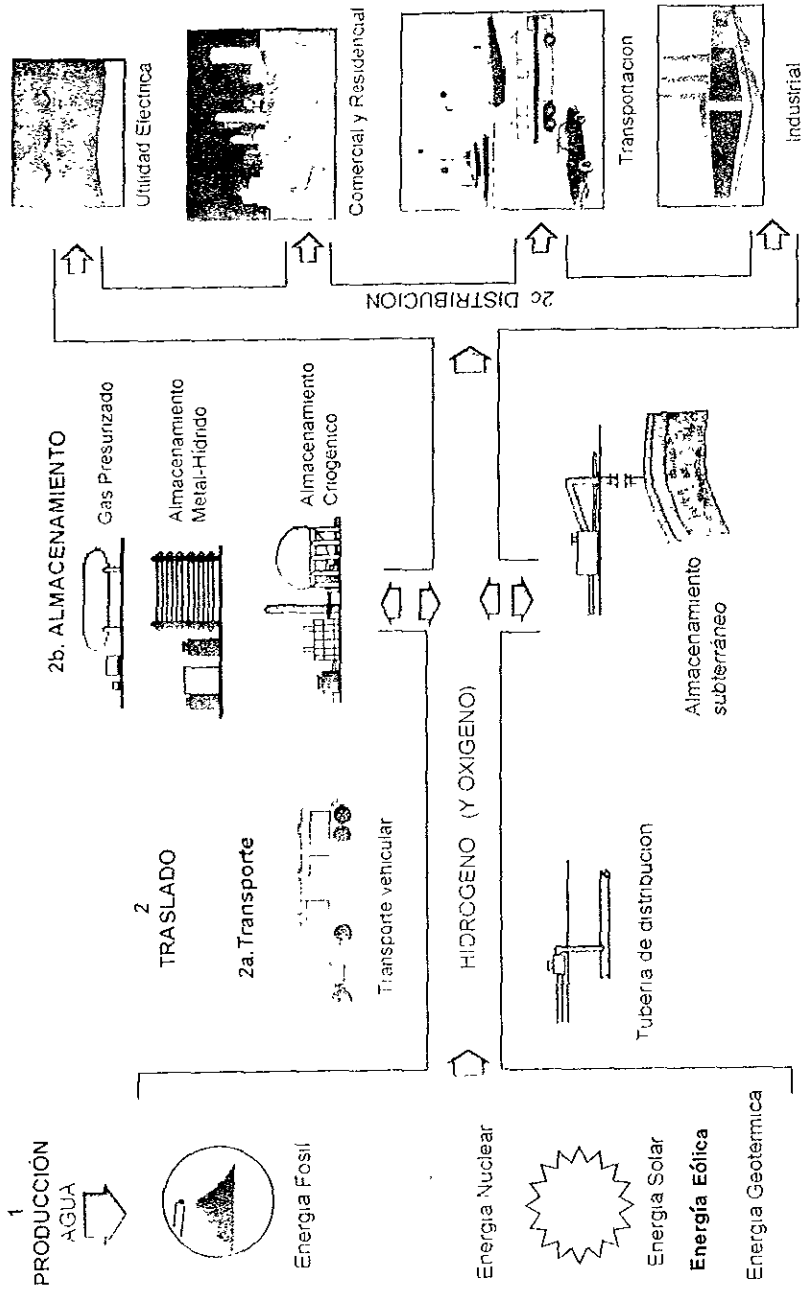
A nivel doméstico este combustible también es capaz de satisfacer los requerimientos de energía eléctrica para algunas actividades domésticas básicas tales como alumbrado, planchado, radio, televisión, bombas para agua, aire acondicionado, refrigeradores, calentadores de agua, lavadoras, lavatrastes, secadoras, hornos de diferentes tipos para cocinar, licuadoras, etc. Entonces el hidrógeno es nuevamente el combustible más apto para la producción de energía; éste puede convertirse en electricidad por medio de celdas de combustión con alta eficiencia utilizando dos electrodos separados por un electrolito básico (NaOH o KOH).

Por otro lado una de las necesidades básicas de energía de los asentamientos humanos es para cocinar ya sea en estufas u hornos. Uno de los métodos para usar el hidrógeno en la cocción de alimentos es reemplazar el gas natural por hidrógeno en estufas convencionales para cocina, utilizando quemadores atmosféricos de tal manera que el aire necesario para la combustión se tome del medio ambiente a esta presión premezclándolo con el hidrógeno para finalmente pasar a través de una serie de orificios, que conforman el quemador, en donde una fuente de ignición hace que la combustión en forma de flama comience.

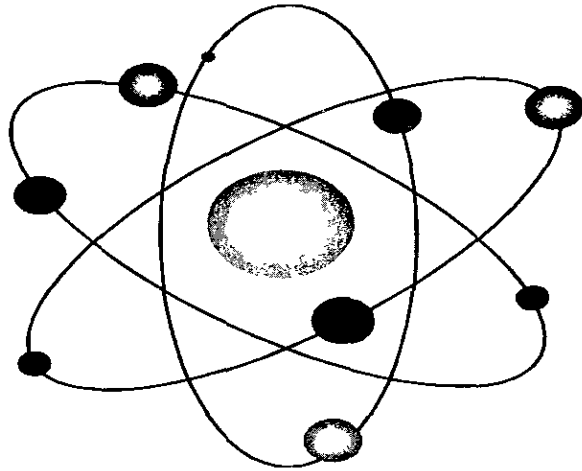
Es importante mencionar que las condiciones de mezclado y la velocidad de la flama se establecen durante el diseño del quemador que es básicamente la finalidad del presente trabajo.

Un esquema de producción, transporte, almacenamiento y usos del hidrógeno se muestra en la Fig. 1.1

Fig. 1.1 SISTEMA ENERGETICO DEL HIDROGENO



# ***CAPÍTULO 2***



## ***PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO***

## 2.1 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO COMBUSTIBLE

Las ventajas y desventajas así como la seguridad en el uso de todo combustible se derivan de sus propiedades termodinámicas, físicas, químicas y toxicológicas. En el caso de las propiedades físicas básicas del hidrógeno puede mencionarse que su molécula es la más ligera, la más pequeña y está entre las moléculas más simples, y además es estable. El hidrógeno tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier otro combustible y en caso de accidente, debido a su baja densidad relativa de 0.07 con respecto al aire, este gas es más ligero, elevándose y expandiéndose más rápidamente, dispersándose con facilidad, lo que no sucede con otros combustibles. También permite la combustión a altas relaciones de compresión y altas eficiencias en *combustión interna*. Cuando se combina con oxígeno en celdas de combustible electroquímicas, el hidrógeno puede producir electricidad directamente rebasando los límites de eficiencia del Ciclo de Carnot obtenidos actualmente en plantas generadoras de potencia (Ref. 20) Como todo combustible el hidrógeno también posee sus desventajas como por ejemplo su temperatura de licuefacción es extremadamente baja ( $20^{\circ}\text{K}$ ), por tanto la obtención del hidrógeno líquido requiere de un proceso altamente consumidor de energía, sin embargo aunque este gas tiene un valor de calentamiento neto de sólo  $275 \text{ BTU/ft}^3$ , comparado con los  $913 \text{ BTU/ft}^3$  del metano, la menor densidad y viscosidad del hidrógeno hacen posible enviar por ducto aproximadamente la misma cantidad de energía térmica que la del metano. Los contenedores para su almacenaje son grandes y requieren material especial para su recubrimiento ya que deben mantenerse a una temperatura de  $-253^{\circ}\text{C}$  (Ref. 15 y 4) que es el punto de ebullición del hidrógeno a presión atmosférica. El hidrógeno no es tóxico y no es contaminante, por esta razón su energía térmica se puede utilizar más eficientemente para calentamiento doméstico que el gas natural, debido a que se puede quemar en calentadores no ventilados siendo el agua el único producto de combustión primaria, con el único inconveniente de que es difícil de detectar sin sensores adecuados ya que es (1) incoloro, (2) inodoro y su flama es más caliente en el aire que la del gas natural, además de que (3) es casi invisible por lo que se requerirá modificar algunas características del diseño de aparatos de calentamiento como los quemadores para estufas

Por todas estas razones el empleo del hidrógeno en un quemador para cocción de alimentos requiere tomar en cuenta estas tres últimas consideraciones mencionadas,



además de los límites de flamabilidad y detonabilidad, los cuales deben establecerse en un rango de mezcla combustible-aire dentro del cual el hidrógeno no explote, el límite de combustión inferior del  $H_2$  en aire es de 4%, así que debe existir ventilación adecuada en caso de fuga. En cuanto a la energía mínima de ignición, para el hidrógeno es menor que para el metano o la gasolina, por ejemplo chispas de electricidad estática, superficies calientes, cenillos, etc., las cuales son suficientes para encender una mezcla hidrógeno-aire de entre 4 y 17%vol. de hidrógeno en aire Y por último otro factor de importancia es la alta velocidad de difusión en el aire ya que se difunde mucho más rápido que otros combustibles.

## 2.2 COMPORTAMIENTO QUÍMICO DEL HIDRÓGENO

La combustión de una mezcla de hidrógeno con oxígeno en cantidades estequiométricas, produce agua; de la misma manera al quemar una mezcla de aire con hidrógeno, produce agua y pequeñas trazas de óxidos de nitrógeno debido a que el calor de la reacción hace que el nitrógeno del aire se combine también con el oxígeno.

El hidrógeno reacciona con todos los halógenos formando ácidos, también reacciona con azufre, selenio y telurio. La reacción es violenta y exotérmica con flúor, suave y endotérmica con yodo. El hidrógeno reacciona directamente a temperaturas elevadas con la mayoría de los metales alcalinos y alcalinotérreos para formar hidruros, que se descomponen con el agua. Muchos óxidos, haluros y sulfuros metálicos reaccionan con hidrógeno a temperaturas elevadas para formar los metales libres y por tanto, actúa como agente reductor

En presencia de un catalizador de platino, paladio o níquel, el hidrógeno reacciona con diversos compuestos orgánicos para saturar enlaces dobles o triples y convertir aldehidos, cetonas y ésteres en alcoholes. Se le considera hidrogenación a la adición de hidrógeno a otras sustancias. Los aceites vegetales y de pescado se endurecen o solidifican mediante hidrogenación catalítica. La hidrogenación parcial clarifica algunos aceites y los hace inodoros. Los ácidos grasos, como el oleico, se convierten en ácido esteárico por hidrogenación. Los aceites de coco, cacahuete y semilla de algodón pueden adquirir el aspecto, sabor y olor de la manteca o del sebo. Las reacciones de hidrogenación representan una parte importante del empleo industrial del hidrógeno como una materia química reactiva.

El hidrógeno con masa 1 (protio) y el deuterio, son isótopos estables, mientras que el tritio, es radiactivo, y su vida media es de 12.26 años. Aunque el abundante isótopo del hidrógeno protio es el átomo más simple conocido, forma dos moléculas diatómicas distintas, a saber *ortohidrógeno*, en la cual los dos núcleos atómicos giran en la misma dirección (mismo spin), y *parahidrógeno*, en la que los núcleos giran en direcciones opuestas (spin opuesto). La composición de equilibrio del hidrógeno gaseoso es 75% orto a temperatura ambiente, pero en estado líquido cambia a 99.8% para. La transición de ortohidrógeno a parahidrógeno es exotérmica (168 cal/g), de modo que el calor liberado es suficiente para revaporizar el hidrógeno líquido (con calor de vaporización de 107 cal/g). El reconocimiento de la existencia de la transición orto-para y el desarrollo de un catalizador que equilibra la fase líquida durante la licuefacción posibilita la producción, empleo y almacenamiento de hidrógeno líquido a gran escala.

**TABLA 2.1**  
**EL HIDROGENO FRENTE A LOS COMBUSTIBLES TRADICIONALES**

PROPIEDAD*	HIDROGENO	GAS NATURAL	METANO	GASOLINA
FÓRMULA	H <sub>2</sub>	-CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>
PUNTO DE EBULLICIÓN [°K]	20 20.39 a 1atm (4,15) (15)	117 (1,4)	112 (9)	311/447 (1,4)
PUNTO DE FUSIÓN [°K]	13.96 (15)			
CALOR DE FUSIÓN [MJ/Kg]	0.058 a 14°K (15)			
CALOR DE VAPORIZACION. [MJ/Kg]	0.446 a 20.4 °K (15)			
PODER CALORÍFICO	A 141.86 MJ/Kg B 119.93 MJ/Kg (11)			
A = alto	A 142.1 MJ/Kg (10)			
B = bajo	B 120.1 MJ/Kg (10)			
G = gas	A 10.046 MJ/m <sup>3</sup> B 11.883 MJ/m <sup>3</sup> (11)	B 48 MJ/Kg (1,4)	A 55.5 MJ/Kg (10)	34.5E-6 MJ/m <sup>3</sup> (6)
L = líquido	G 10.4 MJ/Kg (4)	B 37.3 MJ/m <sup>3</sup> (4)	B 49.9 MJ/Kg (10)	B 44.5 MJ/Kg (4)
	L 8620 MJ/m <sup>3</sup> (4)			
	125 MJ/Kg (1)			
	119.27 MJ/Kg (12)			
	-0.241818 MJ/mol (21,22)			
	120.83 MJ/Kg (15)			
	8541.6 MJ/m <sup>3</sup> (15)			
	121 MJ/Kg (15)			
TOXICIDAD	No tóxico Asfixia (9)		No tóxico Asfixia (9)	Tóxico en conc. > 500ppm (9)
TEMPERATURA DE LICUEFACCIÓN [°K]	20 (20)			
TEMPERATURA DE IGNICIÓN [°K]	858 793 - 949 844 847 - 864 (1,4,6,15) (14) (12) (13)	813 922 - 983 (1,4) (14)	813 (1,6)	530 501 - 744 (1,4) (6)

(#) Número de referencia de cada propiedad

\* Las desfricciones de las propiedades se encuentran en el Glosario

EL HIDRÓGENO FRENTE A LOS COMBUSTIBLES TRADICIONALES

**TABLA 2.1 (continuación)**

PROPIEDAD	HIDRÓGENO	GAS NATURAL	METANO	GASOLINA
TEMPERATURA CRÍTICA [°K]	33.3	(15)		
LÍMITES DE FLAMABILIDAD [% vol. en O <sub>2</sub> ]	4 - 94 4 - 96	(8,13,15) (11)	5.1 - 61	(8)
DENSIDAD DEL GAS [Kg/m <sup>3</sup> ]	NTP 0.083 70 0.084 0.09 0.089 a 0°C y 1atm. (15)	(11) (3,15) (4,6) (10) (15)	0.71 0.65 0.424	(10) (6) (5) (6) (1,4) (6)
DENSIDAD DEL LÍQUIDO [Kg/m <sup>3</sup> ]	0.071 a 20.4 °K	(1,4,15)		
COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EN AIRE NTP [m <sup>2</sup> /s]	0.061E-3 0.063E-3	(6,10) (11)	16E-6	(6) (6) (6)
VELOCIDAD DE DIFUSIÓN [m/s]	2.0	(9)	0.51	(9) (9)
VISCOSIDAD A 1 ATM. [Ns/m <sup>2</sup> ]	8.42E-6 a 0°C 8.9E-6 a 25°C	(14) (15)		
VELOCIDAD DE FLAMA EN O <sub>2</sub> [m/s]	3.45 2.70 NTP 3.47	(1,4) (11) (13)	4.5	(8) (8)
VELOCIDAD DE FLAMA EN AIRE [m/s]	3.1 2.6 3.25 1.6 - 2.83 57	(8) (12) (2) (10) (10)	0.75 0.4 0.34 - 0.45 90	(2) (10) (10) (10)
AIRE TEÓRICO PARA MÁXIMA VELOCIDAD DE FLAMA [%]	1 / 2.38 4 - 75 29.5 0.5 de O <sub>2</sub> 0.00356	(2,10) (1) (12) (13) (15)	1 / 9.52 5 - 15 1 / 9.53	(2) (1) (10)
RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA				
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA POR °C. <sup>-1</sup>				

(#) Número de referencia de cada propiedad.

\* Las definiciones de las propiedades se encuentran en el Glosario.

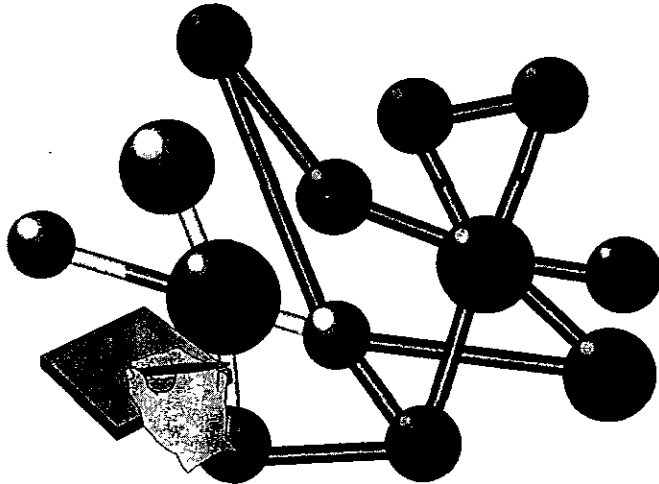
**TABLA 2.1 (continuación)**  
**EL HIDRÓGENO FRENTE A LOS COMBUSTIBLES TRADICIONALES**

PROPIEDAD	HIDRÓGENO	GAS NATURAL	METANO	GASOLINA
MINIMA ENERGIA DE IGNICIÓN COMB. / AIRE [mJ]	0.02 (1,2,9,6,11,15) 0.02 a 30% H <sub>2</sub> (14) 0.6 (14)	0.3 (14)	0.29 (1,6,9)	0.24 (6,9)
EMISIVIDAD DE FLAMA	0.1 (1,11)		1 (1)	
LUMINISCENCIA DE FLAMA	Baja (4) 18.3 - 59 (14) 20 - 65 (1) 18.3 - 59 (9,13) 18.3 - 65 (11) En O <sub>2</sub> : 15 - 90 (13)	Media (4)		Alta (4)
LÍMITES DE DETONABILIDAD [% vol. en aire]			6.3-13.5 (1,9)	
ENERGIA DE EXPLOSIÓN [gr. TNT / KJ <sup>1</sup> ]	0.17 (6)		0.19 (6)	0.25 (6)
RELACION PESO / VOLUMEN [Kg/m <sup>3</sup> ]	69.66 (15)			
CONDUCTIVIDAD TERMICA DEL GAS [MJ m/s m <sup>2</sup> °K]	6.71E-10 A 298°K (15)			
PRESIÓN CRÍTICA [atm. Abs]	12.8. (15)			
CALOR ESPECIFICO (Cp) A P = CTE. [MJ / Kg K]	Líquida a 17.2°K: 8.04E-3 (15) Sólido a 13.4°K. 2.6E-3 (15)			
CALOR ESPECIFICO (Cv) A V = CTE. [MJ / Kg K]	0.01025 de 273 a 373°K (15)			
CALOR ESPECIFICO RELACION Cp/Cv	5.83E-3 de 273 a 373°K (15)			
CALENTAMIENTO NETO POR FRICCIÓN [MJ/m <sup>3</sup> ]	10.197 (15)		33.85 (15)	
CALOR DE DISOCIACIÓN [MJ/K mol]	0.429 (15)			
CALOR DE VAPORIZACIÓN [MJ/Kg]	0.446 (15)			

(#) Número de referencia de cada propiedad.

\* Las definiciones de las propiedades se encuentran en el Glosario.

# **CAPÍTULO 3**



**DISEÑO  
TERMODINÁMICO**

### 3.1 BASES DE DISEÑO

Para realizar el análisis termodinámico del quemador de hidrógeno fue necesario realizar un estudio base con el fin de conocer las necesidades energéticas promedio de una familia de cinco miembros en lo que respecta al servicio de agua caliente, potabilización de agua y cocción de alimentos, en un plazo de 1 mes; considerando que este análisis contempla el empleo de una estufa de cuatro quemadores. Los resultados de esta investigación se presentan en el apéndice D

**TABLA 3.1**  
DATOS GENERALES

Capacidad del tanque de almacenamiento	300 Kg
Caudal másico total promedio	80 Kg/mes
Caudal másico para cocción y potabilización de agua	40 Kg/mes
Tiempo de uso promedio de la estufa al día	7.45 hrs.

$$m_{GLP} + m_{SAC} = 80 \text{ Kg/mes}$$

$m_{GLP}$  = Caudal másico mensual por quemador para cocción y potabilización.

$m_{SAC}$  = Caudal másico para Servicio de Agua Caliente.

Entonces: 
$$m_{SAC} = 80 - m_{GLP}$$

**TABLA 3.2**  
DATOS DEL GAS L.P.

	Propano	Butano
Proporción (%)	50	50
Poder calorífico (MJ/Kg)*	46.5	46
Poder calorífico de mezcla (MJ/Kg)*	46.25	

\* Ref 8

#### 3.1.1 DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA DEL QUEMADOR

El requerimiento calorífico para un quemador se calcula a partir de la ecuación 3.1

$$P_q = (m_{GLP}) (\Delta H_{GLP}) \quad (3.1)$$

Donde

$P_q$  = Potencia del quemador.

$m_{GLP}$  = Caudal másico mensual por quemador para cocción y potabilización.

$(\Delta H_{GLP})$  = Poder calorífico del Gas L. P.

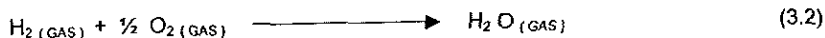
$$P_q = 462.5 \text{ MJ/ mes} = 574.82 \text{ W}$$

**TABLA 3.3**  
RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA

Calor requerido para cocción + potabilización + servicio de agua caliente.	3700 MJ/mes
Calor requerido para potabilización de agua y cocción de alimentos.	1850 MJ/mes
Flujo calorífico mensual por quemador (considerando 4 quemadores).	462.5 MJ/mes
Potencia por quemador ( $P_q$ )	574.82 J/s 574.82 W

### 3.1.2 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL MÁSSICO DE HIDRÓGENO

La reacción de combustión para el hidrógeno con oxígeno es la siguiente :



$$\Delta H_r = -241.818 \text{E-3 MJ/mol}$$

$$\Delta H_r = -120.909 \text{ MJ/Kg}$$

Con el requerimiento mensual por quemador, el calor de reacción del hidrógeno y la ecuación 3.3 se determina el gasto mássico para cada quemador.

$$m = \frac{P_q}{\Delta H} = \frac{574.82 \text{ J/s}}{120.909 \text{ E+6 J/Kg}} \quad (3.3)$$

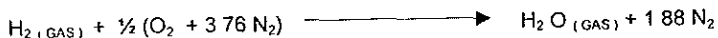
$$m = 4.75 \text{E-6 Kg/s} = 0.00475 \text{ g/s}$$

**TABLA 3.4**  
RESULTADOS DEL BALANCE DE MASA

	$\text{H}_2 (\text{GAS})$	$\text{O}_2 (\text{GAS})$	$\text{H}_2 \text{O} (\text{GAS})$
n (mol) estequiométricas	1	$\frac{1}{2}$	1
PM (g/mol):	2	32	18
n (moles/mes):	1912.5954	956.2977	1912.5954
Caudal Mássico (Kg/mes)	3.82519	30.60153	34.4267
Caudal Mássico (g/s)	0.00475	0.038	0.042



### 3.2 REACCIÓN DE COMBUSTIÓN HIDRÓGENO-AIRE



El oxígeno requerido para la combustión se obtiene del aire, el que prácticamente para cualquier cálculo relacionado con la combustión, se puede considerar como una mezcla de 21% oxígeno y 79% nitrógeno en volumen

Así la composición del aire seco puede interpretarse como cualquiera de las siguientes formas.

$$\text{Aire seco} = (1 \text{ mol de O}_2 + 3.76 \text{ moles de N}_2) = 4.76 \text{ moles de aire}$$

$$\text{Aire seco} = \text{O}_2 + 3.76 \text{ N}_2 = 4.76 \text{ moles}$$

$$\text{Aire seco} = 0.21 \text{ O}_2 + 0.79 \text{ N}_2$$

$$\text{Aire seco} = 2.38 \text{ moles de aire}$$

Para cálculos estequiométricos posteriores se considera que el peso molecular para el aire es de  $PM_{\text{aire}} = 28.97 \text{ Kg / Kgmol}$

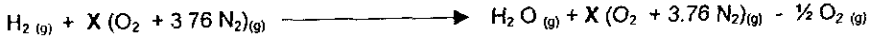
#### 3.2.1 AIRE ESTEQUIOMÉTRICO

El Aire Estequiométrico ó aire teórico es la cantidad mínima de aire seco que permite contar con oxígeno suficiente para una combustión completa. De esta manera para la combustión completa del hidrógeno con aire seco se necesitan 0.5 moles de  $\text{O}_2$  del aire para quemar completamente 1 mol de  $\text{H}_2$  esto es:

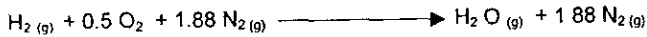
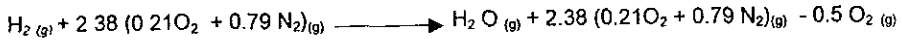
$$AE = \left( \frac{4.76 \text{ moles de aire}}{1 \text{ mol de O}_2} \right) (0.5 \text{ moles de O}_2) (PM_{\text{aire}}) = 68.9486 \text{ Kg de aire} \quad (3.4)$$

## 3.2.2 EXCESO DE AIRE

El Aire en Exceso es el aire que se suministra para la combustión adicional al teóricamente requerido por el combustible. Así entonces la cantidad que exceda al 100% de aire teórico (ec 3.5) se le considera el % de aire en exceso. En todo problema de combustión es necesario disponer de aire en exceso para asegurar una combustión completa. Se considerará la cantidad de aire seco suministrado como la variable X:



Comprobando el balance de la ecuación se sustituye las moles de aire estequiométricas:  
X=2.38.



Posteriormente como X es variable dependiente de las entalpías (ec. 3.18), tomará valores diferentes a la cantidad estequiométrica que incluirán el aire teórico y el aire en exceso, las cuales serán el aire suministrado para la combustión:

$$\text{X} = \text{Aire estequiométrico} + \text{Aire en Exceso} = \text{moles de aire suministrado} \quad (3.5)$$

$$\text{AS} = (\text{PM}_{\text{aire}}) (n_{\text{aire}}) = (28.97)(\text{X}) = 28.97 \text{ X} = \text{Kg de aire} \quad (3.6)$$

Ecuación general para calcular el aire en exceso.

$$\varepsilon = \frac{\text{AS} - \text{AE}}{\text{AE}} (100)$$

Donde:  $\varepsilon$  = Aire en exceso (%)  
AS = Kg de Aire Seco Suministrado ec. (3.6)  
AE = Aire Estequiométrico ec (3.4)

Ecuación de exceso para  $n$  moles de hidrógeno.

$$\varepsilon = \frac{28.97X - (2.38 \text{ moles de aire})(n_{\text{Hidrógeno}})(PM_{\text{Aire}})}{(2.38 \text{ moles de aire})(n_{\text{Hidrógeno}})(PM_{\text{Aire}})} (100)$$

Ecuación de exceso de aire suministrado por mol de hidrógeno:

$$\varepsilon = \frac{28.97X - 68.9486 \text{ Kg de aire estequiom.}}{68.9486 \text{ Kg de aire estequiom.}} (100) \quad (3.7)$$

El exceso  $\varepsilon$  está en función del aire seco suministrado  $X$  que es variable, por lo tanto los resultados de esta ecuación se reportan en la Tabla 3 5

### 3.2.3 RELACIÓN AIRE-COMBUSTIBLE

La Relación Aire-Combustible es el parámetro que determina la cantidad de aire teórico necesario para quemar completamente una cantidad de combustible, primeramente tomando como base una mol de combustible, la relación es la siguiente:

$$R_{A-C} = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{combustible}}} \quad (3.8)$$

Entonces para el sistema Aire-Hidrógeno estequiométrico la relación Aire-Combustible es:

$$R_{A-C} = \frac{n_{\text{aire}}}{n_{\text{H}_2}} = \frac{0.5 + 1.88}{1} = 2.38 \frac{\text{moles de Aire seco}}{\text{mol de H}_2} \quad (3.9)$$

Esto significa que son necesarias 2.38 moles de aire seco para quemar 1 mol de hidrógeno. Multiplicando por el peso molecular la Razón Aire-Combustible puede expresarse en términos de masa:

$$R_{A-C} = \frac{(n_{\text{aire}})(PM_{\text{aire}})}{(n_{\text{H}_2})(PM_{\text{H}_2})} = (2.38) \frac{(28.97)}{(2)} = 34.47 \frac{\text{Kg Aire}}{\text{Kg H}_2} \quad (3.10)$$

Al igual que la ec (3.6), se ignora cuál es la cantidad de aire que se requiere para controlar la temperatura de la flama del hidrógeno, por esta razón se sustituirá el valor de 2.38 moles de aire por la variable  $X$  en la ec (3.10) como sigue:

$$R_{A-C} = \frac{(n_{\text{ave}})(PM_{\text{ave}})}{(n_{\text{H}_2})(PM_{\text{H}_2})} = \frac{(X)(28.97)}{(1)(2)} = \frac{28.97X}{2} \quad (3.11)$$

Como los valores de  $R_{A-C}$  cambian en función de  $X$  también se presentan en la Tabla 3.5

### 3.2.4 INTERVALO DE COMBUSTIBILIDAD

El intervalo de combustibilidad en función del número de moles se puede representar como el número de moles totales de mezcla combustible de la siguiente manera.

$$Y_{\text{H}_2} = \frac{n_{\text{H}_2}}{n_{\text{H}_2} + n_{\text{A.S.}}}$$

Sustituyendo el número de moles según la ecuación de combustión:

$$Y_{\text{H}_2} = \frac{1}{1+X} \quad (3.12)$$

Como puede observarse en la ec. (3.12) la cantidad de aire suministrado nuevamente es una variable, esta cantidad se determinará en la sección 3.2.5 ya que esta cantidad depende de la temperatura de flama que se desee y de la entalpía de reacción a dicha temperatura.

### 3.2.5 ENTALPÍA DE REACCIÓN Y AIRE SUMINISTRADO $X$

Existe un procedimiento para determinar las entalpías de reacción estándar, a partir de la mínima cantidad de datos. Basándose en el uso de una cantidad que se determina experimentalmente: *la entalpía de formación*, la cual para el agua es:

$$Q = \Delta H^\circ = H_{\text{Productos}} - H_{\text{Reactivos}} = \bar{h}^\circ_{\text{H}_2\text{O}} - \bar{h}^\circ_{\text{H}_2} - \bar{h}^\circ_{\text{O}_2} \quad (3.13)$$

$$\Delta H^\circ_{\text{H}_2\text{O}} = -241\,818 \text{ J/mol} = -241\,818 \text{ KJ/Kmol} \quad (3.14)$$

Puesto que la entalpía del oxígeno, y el hidrógeno diatómico gaseoso son elementos establecidos a 1 atm y 25 °C, se les asigna el valor de cero es decir:

$\bar{h}^{\circ}_{H_2}$  y  $\bar{h}^{\circ}_{O_2}$  en la ec. (3.13), de esta manera puede considerarse que la cantidad de calor transferida en la reacción es el calor asociado a la formación de 1 mol de  $H_2O$  gaseosa, se determina como la Entalpía Absoluta del agua y se expresa entonces como sigue:

$$\bar{h}^{\circ}_{H_2O} = (\bar{h}^{\circ}_f)_{H_2O} + \bar{h}^{\circ}_{H_2} + \bar{h}^{\circ}_{O_2} \quad (3.15)$$

Así por definición, la entalpía de formación estándar, de un compuesto es simplemente la energía de reacción durante la formación del compuesto a partir de sus elementos en condiciones estándar

$$\Delta H^{\circ}_{H_2O} = \sum_{\text{Productos}} n_i (\bar{h}^{\circ}_f)_i - \sum_{\text{Reactivos}} n_i (\bar{h}^{\circ}_f)_i$$

Esta ecuación se aplica a las reacciones en mezclas estequiométricas para sistemas abiertos en Estado Permanente con flujo también Permanente en ausencia de cambios de energía cinética, y de energía potencial, se puede describir también de la siguiente forma:

$$Q = \sum_P n_i (\bar{h}_{P2} - \bar{h}_{P0})_i - \sum_R n_i (\bar{h}_{R1} - \bar{h}_{R0})_i + \sum_P n_i (\bar{h}^{\circ}_f)_i - \sum_R n_i (\bar{h}^{\circ}_f)_i + \text{Trabajo}$$

$$\text{o bien } Q = \sum_P n_i \bar{h}_i - \sum_R n_i \bar{h}_i + \text{Trabajo}$$

En términos de la entalpía de formación, se puede ver que la entalpía total molar  $\bar{h}_i$  queda dada por:

$$\bar{h}_i = (\bar{h}^{\circ}_f)_i + (\bar{h}_{TP} - \bar{h}^{\circ}_{298, 1 \text{ atm}})_i \quad \text{o bien } \Delta \bar{H}_i = \Delta \bar{H}^{\circ}_f + (\bar{H}^T - \bar{H}^{\circ}) \quad (3.16)$$

Donde

$(\bar{h}_{TP} - \bar{h}^{\circ}_{298, 1 \text{ atm}}) \approx$  Diferencia en entalpía entre un estado dado cualquiera, y el estado de referencia a 298 °K y 1 atm de presión.

$\bar{H}_T =$  Entalpía de formación a  $P=1$  atm y  $T \neq 25$  °C

Aplicando la ec (3.16) para la reacción de combustión:



$$\begin{aligned}
 & [\bar{H}_{H_2}^0 + (\bar{H}_{H_2}^T - \bar{H}_{H_2}^0)] + [X \bar{H}_{A.S}^0 + X(\bar{H}_{A.S}^{25^\circ C} - \bar{H}_{A.S}^0)] = [\bar{H}_{H_2O}^0 + (\bar{H}_{H_2O}^T - \bar{H}_{H_2O}^0)] + [X \bar{H}_{A.S}^0 + \\
 & X(\bar{H}_{A.S}^T - \bar{H}_{A.S}^0)] + \{ - [0.5 \bar{H}_{O_2}^0 + (\bar{H}_{O_2}^T - \bar{H}_{O_2}^0)] \} \\
 & X \bar{H}_{A.S}^{25^\circ C} - X \bar{H}_{A.S}^T = [\bar{H}_{H_2O}^0 + (\bar{H}_{H_2O}^T - \bar{H}_{H_2O}^0)] - 0.5 (\bar{H}_{O_2}^T - \bar{H}_{O_2}^0)
 \end{aligned}$$

Despejando el número de moles de aire seco suministrado:

$$X = \frac{\bar{H}_{H_2O}^0 + (\bar{H}_{H_2O}^T - \bar{H}_{H_2O}^0) - 0.5 (\bar{H}_{O_2}^T - \bar{H}_{O_2}^0)}{\bar{H}_{A.S}^{25^\circ C} - \bar{H}_{A.S}^T} \quad (3.17)$$

Ahora la variable  $X$  depende de la entalpía a una temperatura final o temperatura de flama "T", y la entalpía de formación estándar, tomando como la entalpía de formación del agua como  $-241\,818 \text{ J/mol}$  que proviene de la ec (3.2) y (3.14), así sustituyendo valores y arreglando la ec (3.17) se llega a:

$$\begin{aligned}
 \bar{H}_{H_2O}^0 &= -241\,818 \text{ J/mol}^* = -241\,818 \text{ KJ / Kmol} \\
 \bar{H}_{H_2O}^0 &= 9903.94 \text{ J/mol}^{**} = 9903.94 \text{ KJ / Kmol} \\
 \bar{H}_{O_2}^0 &= 8683.25 \text{ J/mol}^{**} = 8683.25 \text{ KJ / Kmol} \\
 \bar{H}_{A.S}^{25^\circ C} &= (298.42 \text{ KJ / Kg}^{**}) (PM_{A.S}) = 8645\,23 \text{ KJ / Kmol}
 \end{aligned}$$

$$X = \frac{-241818 + \bar{H}_{H_2O}^T - 0.5 \bar{H}_{O_2}^T}{8645\,23 - \bar{H}_{A.S}^T} \quad (3.18)$$

Utilizando la ec (3.18) y los valores de entalpías del Apéndice B correspondientes a la temperatura de flama deseada se obtiene la cantidad de Aire Seco que debe suministrarse. Como puede observarse en la sección 3.2.2 el Aire Total (AT) depende del Exceso de Aire ( $\epsilon$ ), éste a su vez depende del Aire Seco Suministrado (AS), y los tres dependen del número de moles de aire  $X$  necesarias para la combustión y la reducción de temperatura de la flama de hidrógeno, de la misma manera en la sección 3.2.3 la Relación

\* Thomas E Daubert (Ref 4)

\*\* Keenan Chao (Ref 2)

Aire-Combustible y el Intervalo de combustibilidad dependen de  $X$ . Ahora el valor que resulte de la ec. (3.18) podrá sustituirse en las ecuaciones (3.6), (3.7), (3.11) y (3.12) dando como resultado los valores de Aire Seco Suministrado, Exceso de Aire, Relación Aire-Combustible y el Intervalo de Combustibilidad respectivamente; los cuales también se incluyen en el Apéndice B.

Para propósitos de cálculo en el diseño de este quemador, y respetando los límites de detonabilidad, el intervalo de combustibilidad "Y" debe permanecer entre los valores de 4 y 14% es decir 0.04 y 0.14 como puede observarse en la tabla del Apéndice B los valores de Y correspondientes a este intervalo están comprendidos entre el rango de temperaturas que van desde 347.85 °C hasta más allá de 1104.85 °C, sin embargo la temperatura de flama de operación del quemador de una estufa convencional está por encima de los 800°C aproximadamente, así que los valores útiles de entalpías están comprendidos entre 900°C y 1100°C (Ver Tabla 3.5).

## ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL QUEMADOR DE HIDRÓGENO

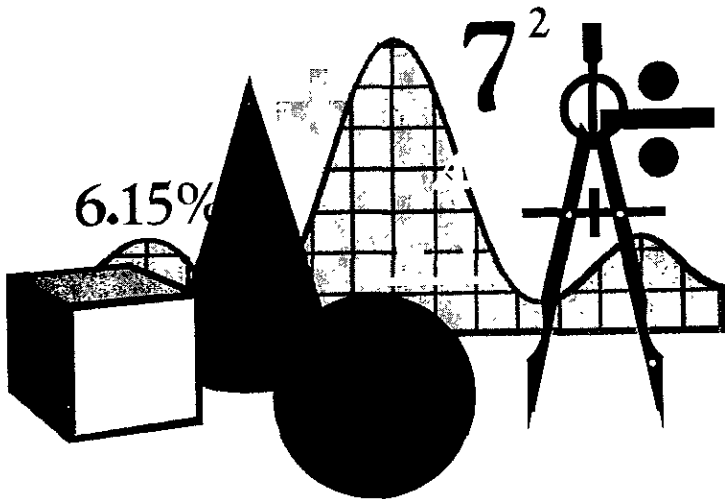
T (°K)	T (°C)	H <sub>molar</sub> aire	H <sub>molar</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>molar</sub> H <sub>2</sub> O	X	Y	ε	R <sub>A,c</sub>
1174	900.85	1247.26	37517.7	43276.1	7.91	0.1123	231.8	114.5
1180	906.85	1254.28	37731.2	43537.0	7.84	0.1131	229.1	113.6
1190	916.85	1266.00	38087.3	43972.9	7.74	0.1144	224.8	112.1
1200	926.85	1282.43	38586.2	44585.1	7.60	0.1163	218.8	110.0
1210	936.85	1294.18	38943.5	45023.8	7.50	0.1177	214.7	108.6
1220	946.85	1305.94	39300.6	45463.8	7.40	0.1190	210.6	107.2
1230	956.85	1317.72	39658.3	45905.0	7.31	0.1204	206.7	105.8
1240	966.85	1329.52	40016.3	46347.2	7.21	0.1217	202.8	104.5
1250	976.85	1341.33	40374.5	46190.9	7.14	0.1228	199.8	103.5
1260	986.85	1353.15	40733.0	47235.5	7.03	0.1245	195.3	101.9
1270	996.85	1364.98	41091.9	47681.3	6.95	0.1258	191.6	100.6
1280	1006.85	1372.09	41307.5	47949.5	6.90	0.1266	189.5	99.9
1290	1016.85	1383.95	41666.9	48397.3	6.81	0.1280	186.0	98.7
1300	1026.85	1395.81	42026.6	48846.1	6.73	0.1294	182.5	97.5
1310	1036.85	1407.70	42386.6	49296.0	6.65	0.1307	179.1	96.3
1320	1046.85	1419.59	42746.9	49747.3	6.57	0.1321	175.8	95.2
1330	1056.85	1431.50	43107.5	50199.5	6.49	0.1334	172.6	94.1
1340	1066.85	1443.42	43468.3	50652.8	6.42	0.1348	169.4	93.0
1350	1076.85	1455.35	43829.5	51107.5	6.34	0.1362	166.3	91.9
1360	1086.85	1467.29	44191.0	51563.1	6.27	0.1375	163.2	90.8
1370	1096.85	1479.25	44552.7	52019.8	6.20	0.1389	160.2	89.8
1371	1097.85	1480.44	44588.8	52065.5	6.19	0.1390	159.9	89.7
1372	1098.85	1481.64	44625.0	52111.2	6.19	0.1392	159.6	89.6
1373	1099.85	1482.84	44661.2	52157.0	6.18	0.1393	159.3	89.5
1374	1100.85	1484.03	44697.4	52202.8	6.17	0.1394	159.0	89.4

\* Los valores de en la Tabla 3.5 se calcularon con Hoja de Cálculo Excel Versión 5.0, en donde las ecuaciones utilizadas para calcular los valores de X, Y, ε, y R<sub>A,c</sub> son (3.18), (3.12), (3.7) y (3.11) respectivamente

Cabe destacar que ésta Hoja de Cálculo está disponible en disco y los valores desplegados como "DATOS DE ENTRADA DEL QUEMADOR DE GAS L. P.". (Ver Apéndice B) pueden cambiarse de acuerdo a las necesidades del usuario adaptándose automáticamente todos los valores de la tabla para desplegar de inmediato X, Y, ε, y R<sub>A,c</sub> para un rango de temperaturas de 26.85 °C hasta 1126.85 °C y elegir la temperatura deseada para la flama del quemador de hidrógeno que sustituirá al quemador de gas L. P.



# CAPÍTULO 4



## DISEÑO AERODINÁMICO

## 4.1 VELOCIDAD DE COMBUSTIÓN DEL HIDRÓGENO

Es bien sabido que el hidrógeno puede desempeñar *todas las funciones de los gases combustibles tradicionales*, sin embargo, las características de combustión del hidrógeno dictan estrictos procedimientos de seguridad que son adaptados *implícitamente durante las operaciones de producción, transportación, almacenamiento, distribución y utilización del combustible*

Como combustible, el hidrógeno posee significativas ventajas comparadas con las medidas de seguridad que deben tenerse con él. Por encima de la tradicional combustión catalítica del hidrógeno ninguno de los contaminantes asociados con los combustibles fósiles se forman, tales como el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, partículas y oxidantes fotoquímicos.

Los productos de combustión del hidrógeno se limitan a agua y en general pequeñas concentraciones de óxidos de nitrógeno. En comparación con el gas natural y otros combustibles (Ver Fig. 4.1) el hidrógeno posee una mayor velocidad de combustión, aunque con mayor tendencia de retroceso de flama (flash back), baja densidad relativa, amplios límites de flamabilidad, y baja energía de ignición, como se menciona en la Tabla 2.1. Sin embargo el principal parámetro de combustión es la medida de la velocidad de propagación de la flama frente a una flama laminar premezclada reportada por la velocidad de combustión.

La definición teórica de la combustión se refiere al modelo de la flama unidimensional y es la velocidad de la flama frente a la normal para ella misma y relativa a los reactantes antes de la combustión. La velocidad de combustión está contemplada como una característica fundamental de una mezcla combustible gas-oxidante, y esta es dependiente sólo por encima de la temperatura y presión inicial. Así, la adquisición de una velocidad de combustión *confiable para mezclas de hidrógeno-oxidante* es requisito indispensable para la introducción de un gas combustible que suplirá a los convencionales.

Se han creado *diversos métodos de medición* de velocidades de combustión como el método de ángulo de cono, el método de rastreo de partícula, o el método de bomba, todos ellos basados en resultados *experimentales promediados* encaminados a obtener una medida de la velocidad del gas antes de la combustión por medida directa.

Según el trabajo realizado por D. H. France (Science Applications, Inc. Canoga Park, C.A., U.S.A.) Ref. 1; Para generar mediciones de velocidad de combustión confiables para

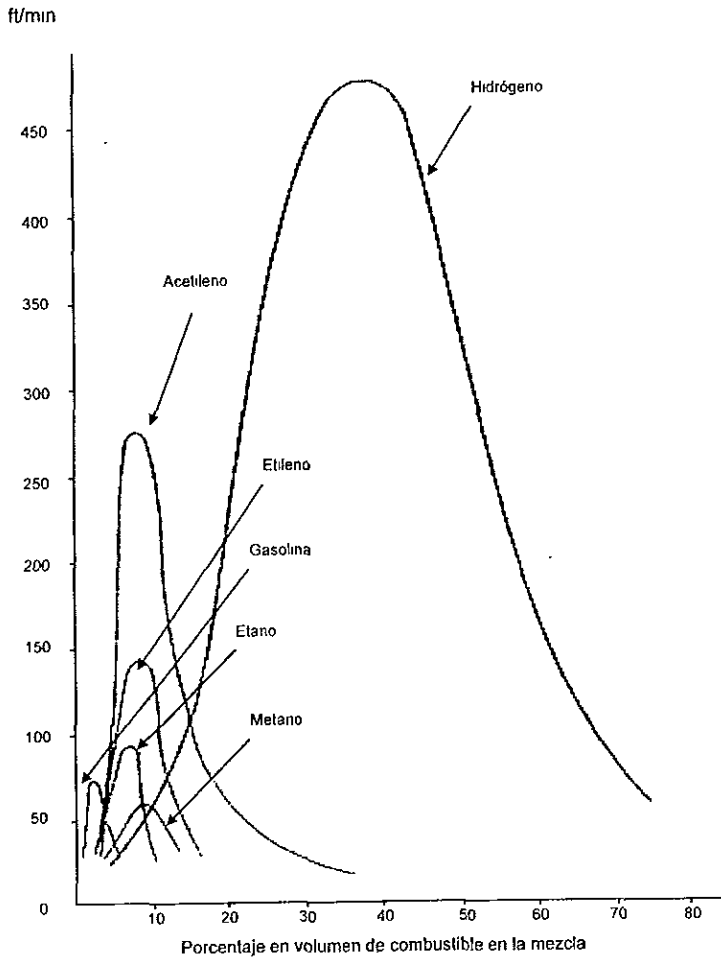


FIG. 4.1 RAPIDEZ DE FLAMA DE DIVERSOS COMBUSTIBLES

flamas de hidrógeno-aire, desarrolló una boquilla de quemador / ángulo cónico incorporado a un "Anemómetro Láser-Doppler", que provee una alternativa para métodos de rastreo de partícula para mejorar el monitoreo directo de las velocidades del gas antes de la combustión

Para facilitar la comparación directa con otros trabajos los valores de velocidad de combustión de otros autores, D. H. France los corrigió para 1 atmósfera de presión y una temperatura del gas a 293 °K antes de la combustión. Estos resultados se presentan en la Fig. 4 2. La numeración de las curvas corresponde a los trabajos de diferentes autores como sigue:

(1) D. H. France

(4) Dixon y Lewis

(2) Scholte-Vaags

(5 y 6) Gunter y Janisch

(3) Edmondson

De acuerdo con France los resultados de estos investigadores difieren en parte, porque el uso de las velocidades del gas antes de la combustión no toman en cuenta los efectos de la flama sobre la distribución del flujo del gas, de esta manera las medidas de velocidad de combustión proveídas por France con el desarrollo de una boquilla para quemador / luminoso y la técnica del "Ángulo Cónico" / "Anemómetro Láser-Doppler", ha reducido la confusión asociada con otros datos publicados.

Por esta razón se ha hecho uso de los datos reportados por D. H. France en la Fig. 4 2 para determinar la velocidad de combustión de las mezclas hidrógeno-aire para los dos prototipos de quemadores

De acuerdo a lo establecido en la sección 3.3.5 en la Tabla 3.5 para propósito de cálculo en el diseño del quemador el intervalo de combustibilidad útil está entre 11.23 % y 13.94 % correspondientes a temperaturas de flama de 900 hasta 1100 °C; partiendo de este porcentaje y haciendo uso de la Fig 4 2 trabajo realizado por D. H. France (curva llamada "This Work") se determina la velocidad de combustión a una composición de 11.23 % de hidrógeno para una abertura inicial de la válvula reguladora de flujo en la cual habrá una ignición inmediata al contacto con una fuente de energía mínima para la ignición (un cerillo encendido, una chispa, etc), y un porcentaje de 13.94 % de hidrógeno para una abertura total de la válvula a la cual se alcanza una temperatura de flama de 1100°C. Los resultados para la velocidad de combustión para estas composiciones se resumen en la Tabla 4.1.

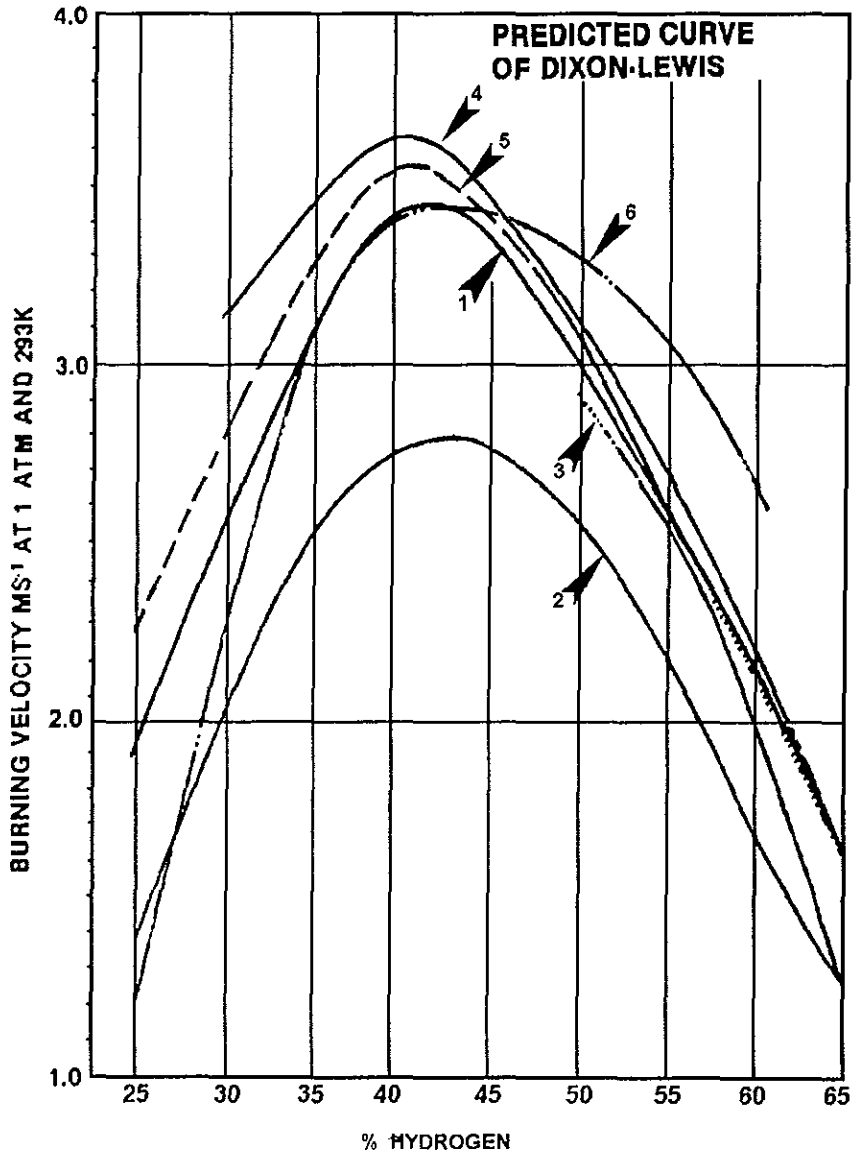


FIG. 4.2 VELOCIDADES DE COMBUSTIÓN DE MEZCLAS HIDRÓGENO-AIRE

## 4.2.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN

Se ha establecido que la presión de la mezcla a la salida del quemador es de 1 atm, partiendo de este dato y utilizando las dimensiones de cada sección del quemador, se calcula la caída de presión desde la salida del quemador hacia la válvula de flujo, considerando las pérdidas de energía primarias debidas a la fricción del tubo y las pérdidas de energía menores que son pequeñas en comparación a las anteriores, las cuales corresponden a las otras secciones del quemador en las cuales existen cambios que perturban la trayectoria del flujo, la energía que se pierde bajo estas condiciones se calcula bajo procedimientos experimentales y predicciones teóricas complejas, por ésta razón los procedimientos desarrollados en éste capítulo para analizar las pérdidas menores se tomaron de la Referencia 4, ya que el trabajo que realizó Mott está basado en procedimientos y análisis de muchas fuentes.

**TABLA 4.2**  
DATOS PARA LA MEMORIA DE CÁLCULO

AIRE	HIDRÓGENO
$\rho = 1.18 \text{ Kg/m}^3$	$\rho = 0.84 \text{ Kg/m}^3$
$PM = 28.97 \text{ Kg/Kgmol}$	$\gamma = 0.82404 \text{ N/m}^3$
$\mu = 1.56E-5 \text{ Kg/ms}$	$K = C_p/C_v = 1.4 \text{ a } 1 \text{ atm. y } 25^\circ\text{C}$
$\gamma = 11.575 \text{ N/m}^3$	$Q = 4.7E-6 \text{ Kg/s}$
$Q = 0.42 \text{ Kg/s}$	
$g = 9.81 \text{ N/Kg}$	
$v = 0.5728 \text{ m/s}$	

Como se mencionó antes, el régimen de flujo es laminar y se comprueba con su Número de Reynolds.

$$N_{Re} = D v \rho / \mu \quad (4.1)$$

Donde.  $D = 0.01579 \text{ m}$

$$N_{Re} = 684.13$$

### TUBO

Para el tubo el factor de fricción es

$$f = 64 / N_{Re} \quad f = 0.0935 \quad (4.2)$$

Las pérdidas de energía por fricción en tuberías rectas en flujo laminar se determinan con la ecuación de Hagen-Poiseuille (ec. 4.3) la cual sólo es válida para flujos laminares ( $N_{Re} < 2000$ ) y considera las propiedades del flujo ( $\mu$ ,  $\gamma$ ), las características correspondientes a la longitud y diámetro del conducto, así como la dinámica del flujo (velocidad promedio), esta ecuación es independiente de la condición de la superficie del conducto para las pérdidas por fricción viscosa dentro del fluido determinan la magnitud de la pérdida de energía

$$h_L = \frac{32 \mu L v}{\gamma D^2} \quad (4.3)$$

Donde:  $L = 0.15 \text{ m}$

$D = 0.01579 \text{ m}$

$$h_L = 0.0148622 \text{ m}$$

### EXPANSIÓN SÚBITA

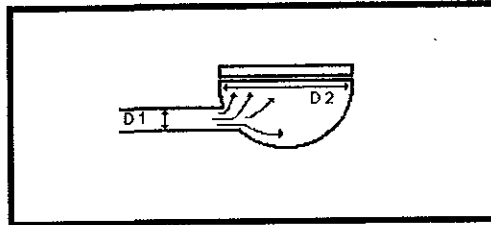


FIG. 4.4 EXPANSIÓN SÚBITA

La expansión súbita se lleva a cabo cuando el gas pasa del tubo a la sección esférica del quemador en donde la diferencia de diámetros produce una perturbación pequeña pero que genera pérdida de energía, la cual se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$h_L = K \left( \frac{v_1^2}{2g} \right) \quad (4.4)$$

Donde:  $K = 0.86628$

$v_1 = 0.5728 \text{ m/s}$

$$K = \left[ 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 \right]^2 = 0.8662831 \quad (4.5)$$

Donde:  $D_1 = 0.01579 \text{ m}$   
 $D_2 = 0.06 \text{ m}$

$v_1$  es la velocidad del conducto menor que está antes de la expansión,  $g$  es la constante de gravedad y  $K$  es el coeficiente de resistencia que depende de la proporción de los diámetros.

Sustituyendo valores en la ec. 4.4 la pérdida de energía para la expansión es:

$$h_L = 0.01448661299 \text{ m}$$

### COMPRESIÓN SÚBITA

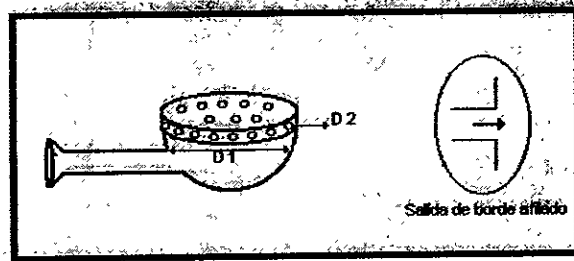


FIG. 4.5 COMPRESIÓN SÚBITA

Las pérdidas de energía debidas a una compresión súbita se originan cuando el flujo del gas pasa de la cámara de mezclado hacia la atmósfera a través de los 20 orificios de salida como lo muestra la Fig. 4.5. La pérdida de energía se calcula a partir de la ec. 4.6

$$h_L = K \left( \frac{v_2^2}{2g} \right) \quad (4.6)$$

Donde  $v_2$  es la velocidad de salida del fluido a partir de la contracción, y  $K$  es el coeficiente de resistencia que depende de la geometría de salida del orificio, en este caso la configuración de los orificios es de borde afilado para el cual existe un valor sugerido de  $K=0.5$  (Ref. 4 y 6) que multiplicado por el número de orificios resulta una  $K_{Tot} = 10$  de esta manera la pérdida total para la salida del gas es de:

$$h_L = 0.1672 \text{ m}$$



### 4.2.3 CAÍDAS DE PRESIÓN

La finalidad de esta sección es de determinar la presión de alimentación a la válvula de flujo de gas, calculando la caída de presión a través del quemador de tal forma que la presión del gas a la salida del quemador sea de 1 atm.

Introduciendo las pérdidas de energía en la ecuación general de energía (ec 4.7) se determina la presión a la entrada del quemador

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_a - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (4.7)$$

Eliminando términos para un gas, y resolviendo para  $P_1$  se llega a la ec. 4.8 donde  $h_L$  es la suma total de las pérdidas de energía correspondientes a las ecuaciones 4.3, 4.4, y 4.6.

$$P_1 = P_2 + h_L \gamma \quad (4.8)$$

$$h_{L \text{ Total}} = \sum_{i=1}^n h_{L_i} \quad (4.9)$$

$$h_{L \text{ Tot}} = 0.196484 \text{ m}$$

Introduciendo esta pérdida total de energía en la ec. 4.8 se determina la presión inicial del quemador en  $\text{N/m}^2$  donde el valor de  $\gamma$  es el peso específico del aire.

$$P_1 = 1.013\text{E}5 + (0.196484)(11.575) = 101302.2743 \text{ N/m}^2$$

### 4.2.4 PRESIÓN A LA ENTRADA DE LA VÁLVULA

La presión  $P_1$  calculada arriba corresponde a la presión a la salida de la válvula sin embargo para calcular la caída de presión debida al paso del fluido a través de ésta se utiliza la siguiente ecuación para flujo de gases a través de una válvula de aguja, donde la viscosidad y la densidad corresponden a las propiedades físicas del hidrógeno.

$$h_L = K \frac{v^2}{2g} \quad (4.10)$$

$$K = f(L/D) = 0.9746$$

Donde

$(L/D) = 13$  para una válvula de aguja según CRANE de flujo de fluidos.

$$F = 64 / \text{Re} = 7.497 \text{ E-}2$$

$$\text{Re} = (D v \rho) / \mu = (0.01579 \text{ m})(0.5728 \text{ m/s})(0.84 \text{ Kg/m}^3) / 8.9 \text{ E-}6 \text{ Ns/m}^2 = 853.6$$

El diámetro para el número de Reynolds es de 0.5 in, y corresponde al diámetro interno del cabezal que alimenta a las válvulas de flujo de gas de la estufa.

Regresando a la ec. 4.10 la pérdida de energía a través de una válvula de aguja de acero inoxidable es:

$$h_L = (0.9746) \left( (0.5728)^2 / (2)(9.81 \text{ N/kg}) \right) = 1.6297 \text{ E-2 m}$$

Retomando la ec. 4.8 para determinar la presión del gas a la entrada de la válvula, se asume que  $P_2$  es el valor de la presión calculada en la ecuación 4.8 correspondiente a la presión a la salida de la válvula, así entonces, resolviendo para  $P_1$ , y sustituyendo datos de la Tabla 4.2 para el hidrógeno:

$$P_1 = P_2 + h_L \gamma = 101302.2877 \text{ N/m}^2 = 1.000022583 \text{ atm.}$$

Donde.

$$P_2 = 101302.2743 \text{ N/m}^2 = 1.0000222245 \text{ atm}$$

$$h_L = 1.6297 \text{ E-2 m ec. (4.10)}$$

$$\gamma_{H_2} = 0.82404 \text{ N/m}^3$$

En la siguiente Tabla se resumen las caídas de presión del sistema

**TABLA 4.3**  
CAÍDAS DE PRESIÓN

$\Delta P_{\text{Válvula}}$	$\Delta P_v = 0.226 \text{ E-6 atm}$
$\Delta P_{\text{Quemador}}$	$\Delta P_q = 0.000022458 \text{ atm.}$
$\Delta P_{\text{Total del sistema}}$	$\Delta P_T = 0.000022684 \text{ atm}$

#### 4.2.5 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL QUEMADOR

Las dimensiones básicas del cuerpo del quemador como son la longitud del tubo, y el dimensionamiento de la cabeza del quemador están fundamentadas en las dimensiones de los quemadores de las estufas convencionales.

Es importante mencionar que la forma semiesférica de la cabeza del quemador tiene la finalidad de disminuir al máximo las turbulencias del flujo del gas en el interior del quemador.

El número de orificios se estableció de manera arbitraria ya que aunque en la literatura existe una relación entre la distancia de orificio a orificio para determinar la longitud

de la flama, ésta tendría que determinarse bajo experimentación ya que no existen datos de este tipo en la literatura para el hidrógeno, por esta razón debe someterse a experimentación y determinar el efecto de la distancia entre los orificios de este quemador.

La placa reguladora de aire consta de tornillos para ajustar la cantidad de aire que entra al quemador con la finalidad de regular la longitud de flama y la temperatura de la misma.

La cabeza del quemador consta de una junta de grafito intercambiable para proporcionar luminiscencia a la flama que a simple vista sin esta junta sería poco visible al ojo humano. El material es accesible de conseguir y se planea que en un futuro cuando la junta deje de proporcionar luminosidad perceptible a la vista debido al desgaste por combustión de la misma, puede conseguirse un repuesto que se pretenda pueda estar a la venta en cualquier tlapalería y que sea práctico para instalarse de tal forma que la misma ama de casa pueda cambiarlo

Por último en la parte inferior de la esfera se instalan dos bordes que sirven como soporte al cuerpo del quemador sobre el piso de la estufa.

### SECCIÓN DE MEZCLADO

TUBO	
Medida nominal del tubo	0.5 in = 12.7 mm
Diámetro externo	0.840 in = 21.3 mm
Diámetro Interno	0.622 in = 15.7 mm
Espesor de pared	0.109 in = 2.7 mm
Área interna transversal	0.304 in <sup>2</sup> = 7.7215E+3 mm <sup>2</sup>
Material	Acero inoxidable austénico
Identificación	Cédula 40
Longitud	150 mm
CONO DEL VÉNTURI	
Material	Acero inoxidable austénico
Diámetro interno mayor	41.0 mm
Diámetro interno menor	21.3 mm
Espesor de pared	2.7 mm
PLACA REGULADORA	
Material	Acero inoxidable austénico
Diámetro del círculo interno	13 mm
Área de flujo para el aire	705.09 mm <sup>2</sup>

## SECCIÓN DE COMBUSTIÓN

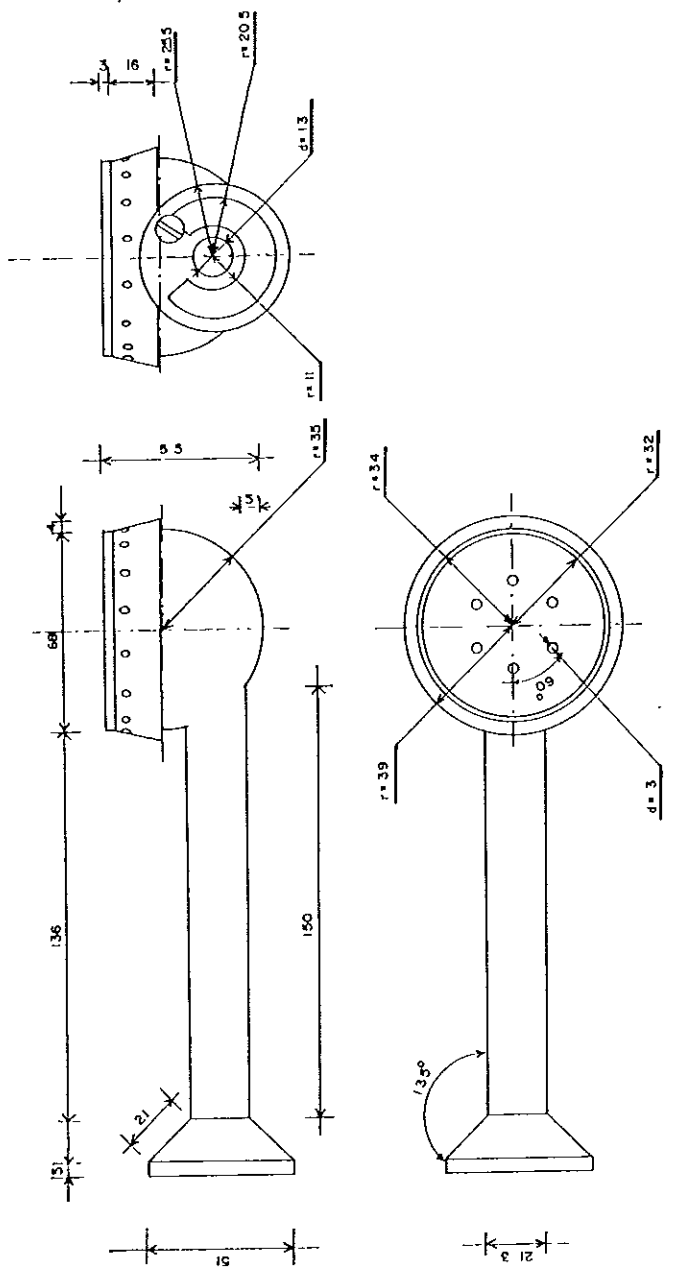
CABEZA DEL QUEMADOR	
Material	Acero inoxidable austénico
Diámetro interno	60 mm
Espesor de pared	3.8 mm
Tapa	Roscada con orificios
Diámetro externo mayor	78 mm
Altura de la tapa	19 mm
Orificios	20
Diámetro de orificio	3 mm
Junta de luminiscencia	carbón (grafito)
Diámetro interno de la junta	64 mm
Espesor de la junta	2 mm

## 4.2.6 DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA

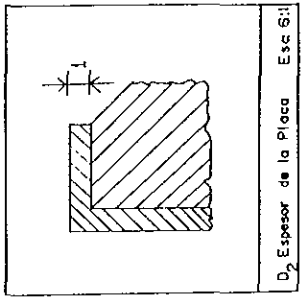
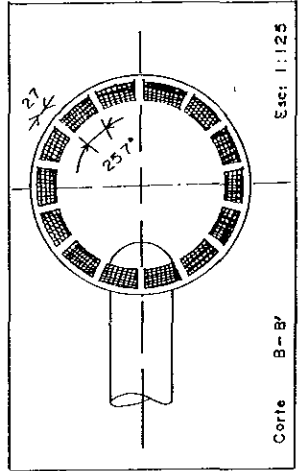
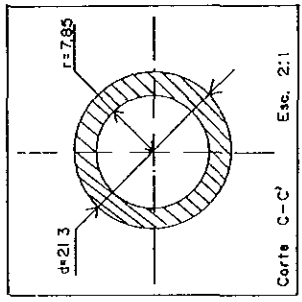
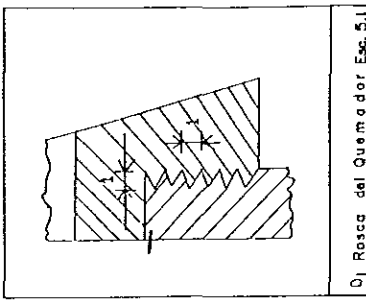
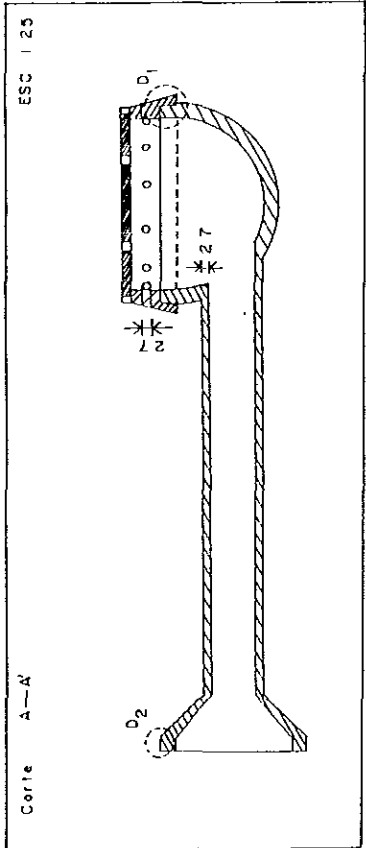
Los datos para el dimensionamiento de la válvula de flujo se resumen en la siguiente tabla

**TABLA 4.4**  
HOJA DE DATOS PARA LA VÁLVULA

Tipo de Válvula	Aguja
Tipo de flujo	Gas Hidrógeno
$P_{Alimentación}$	101302.2877 N/m <sup>2</sup> = 1.000022583 atm.
$P_{Salida}$	101302.2743 N/m <sup>2</sup> = 1.000022451 atm.
$\Delta P$	0.0134 N/m <sup>2</sup> = 0.132 E-6 atm.
Velocidad de flujo	0.5728 m/s
Caudal máximo de flujo	4.7E-6 Kg/s
Material	Acero inoxidable



	<b>FES. ZARAGOZA UNAM.</b>	
	Esc. 1:1 25 Cotas en mm	
VISTAS GENERALES DEL QUEMADOR CON Premezclado		
I.Q. Jaime Martínez Ruiz		TESIS
I.Q. Belzabeth Rom3rez Mart3nez		Febrero de 1999
A4 1/2		



F.E.S. ZARAGOZA		U.N.A.M	
CORTES Y DETALLES DEL QUEMADOR CON PREMEZCLADO		Esc. indicadas	Cotas en mm
I.Q. Jaime Martínez Ruiz	T.E.S.I.S	A 4 2/2	
I.Q. Betzabeth Ramírez Martínez	Febrero de 1999		

### 4.3 PROTOTIPO DE QUEMADOR POR DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA

Este prototipo carece de aire primario o de premezcla, sólo posee el llamado "aire secundario" que se obtiene simplemente del aire ambiente alrededor de la flama, en este caso la mezcla se realiza por difusión del combustible en el aire ambiente, a la salida del quemador. En este prototipo el gas inyectado es la cantidad equivalente a la composición correcta de combustible-aire para la reacción de combustión.

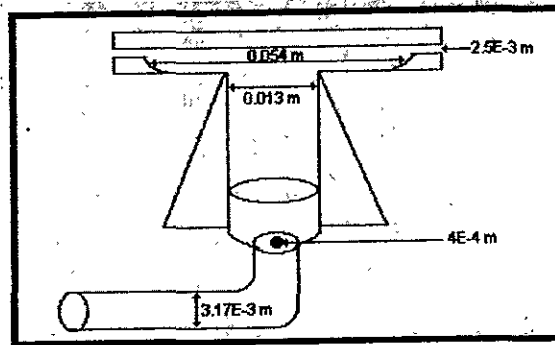


FIG. 4.6 CORTE TRANSVERSAL DEL QUEMADOR

#### 4.3.1 PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN

Al igual que el prototipo de premezcla la caída de presión del flujo de gas se calcula a partir de la premisa de que a la salida del quemador el gas llegue a una presión de 1 atm. De igual forma se toman en cuenta las pérdidas de energía primarias en el tubo al igual que las pérdidas de energía menores debidas a los cambios de diámetro de las secciones del quemador.

**TABLA 4.5**  
DATOS PARA LA MEMORIA DE CÁLCULO  
HIDRÓGENO

$\rho = 0.84 \text{ Kg/m}^3$
$\gamma = 0.82404 \text{ N/m}^3$
$K = C_p/C_v = 1.4$ a 1 atm. y 25°C
$Q = 4.7E-6 \text{ Kg/s}$
$g = 9.81 \text{ N/Kg}$
$v = 0.5728 \text{ m/s}$
$\mu = 8.9E-6 \text{ Ns/m}^2$

El régimen de flujo sigue siendo laminar al igual que para el prototipo de premezcla De la ec. 4.1 el  $N_{re} = 42\ 168$ .

Para la sección del tubo el factor de fricción se determina por la ec. 4.2 el cual es  $f=1.5177$ .

Para el flujo laminar la ecuación de Hagen-Poiseuille (ec 4.3) determina las pérdidas de energía primaria :  $h_L = 0.4881\ m$

El codo de tubo es la sección siguiente a la longitud de tramo recto antes del quemador la cual posee una estructura que se explica en la Fig. 4.7

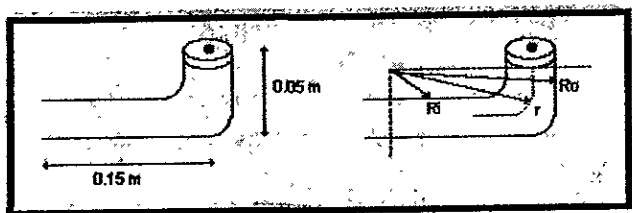


FIG. 4.7 DIMENSIONES DEL CODO DE TUBO

**TABLA 4.6**  
DIMENSIONES DEL CODO DE TUBO

Diámetro nominal	1/8 in = 3.17 mm
Diámetro interno (D <sub>i</sub> )	0.307 in = 7.80 mm
Diámetro externo (D <sub>e</sub> )	0.405 in = 10.28 mm
Espesor de pared (ε)	0.049 in = 1.24 mm
Radio (R <sub>i</sub> )	35 mm

El codo del tubo representa una pérdida de energía menor que de acuerdo con la bibliografía de Robert L. Mott "*Mecánica de Fluidos Aplicada*" (Ref. 4) se aplica la siguiente secuencia de cálculo:

$$r = R_i + D_e / 2 \quad (4.12)$$

$$r = 35\ mm + (10\ 287\ mm / 2) = 40.14\ mm$$

$$r / D_i = 40.14\ mm / 7.8\ mm = 5.1461 \quad (4.13)$$

De la gráfica (Fig. 10.23 del libro de Robert L. Mott pag. 286).

$$Le / D = 15.5 \quad (4.14)$$

$$h_L = f_t (Le / D) (v^2 / 2g) \quad (4.15)$$

$$h_L = 0.3913953494\ m$$



### PRIMERA COMPRESIÓN SÚBITA

La primera compresión súbita se origina cuando el gas pasa por el orificio que inyecta el gas al quemador el cual se ubica en la parte superior del codo del tubo, como se muestra en la Fig. 4.7. La pérdida de energía se calcula a partir de la ec. 4.6 utilizando un coeficiente de resistencia sugerido de  $K=0.5$  para la salida de borde afilado, y los datos de la Tabla 4.5

$$h_L = 8.361361876E-3 \text{ m} \quad (4.16)$$

### PRIMERA EXPANSIÓN SÚBITA

La primera expansión súbita que sufre el flujo de gas es aquella que se origina del orificio de salida arriba del codo de tubo hacia lo que es el cuerpo del quemador como se señala en la Fig 4.8

El coeficiente de resistencia depende de la relación de diámetros (ec. 4.5) la cual es de  $K=0.99811$  y de la ec. 4.4 la pérdida de energía es

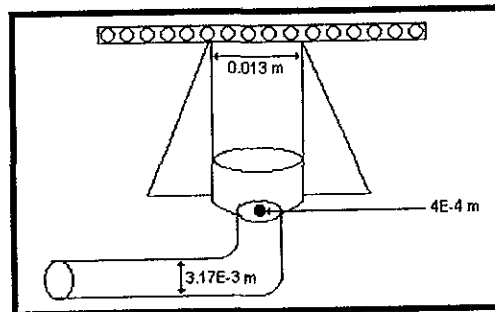
$$h_L = 1.669107441E-2 \text{ m} \quad (4.17)$$


FIG. 4.8 EXPANSIÓN SÚBITA

### SEGUNDA EXPANSIÓN SÚBITA

La segunda expansión súbita se origina al pasar de un diámetro de 0.013 m a un diámetro mayor de 0.054 m como se muestra en la Fig. 4.9.

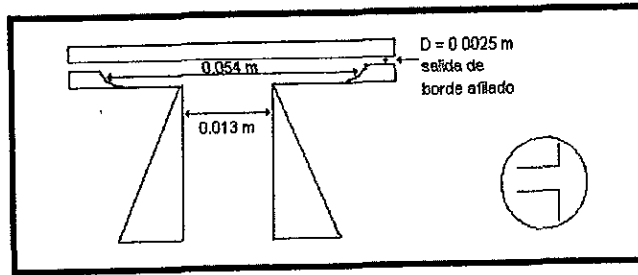


FIG. 4.9 EXPANSIÓN SÚBITA

Dicha expansión depende de los diámetros (ec. 4.5) determinando así una  $K=0.88744$  m. Introduciendo este coeficiente en la ec. 4.4 se origina una pérdida de energía de

$$h_L = 1.048405E-2 \text{ m} \quad (4.18)$$

### SEGUNDA COMPRESIÓN SÚBITA

La segunda compresión súbita se origina cuando el gas pasa a través de los 40 orificios de salida del quemador como se ilustra en la Fig. 4.9. Utilizando la ec. 4.6 así como el coeficiente de resistencia sugerido para una salida de borde afilado  $K = 0.5$  para cada uno de los orificios

$$K_{\text{Tot}} = (0.5)(40) = 20$$

$$h_L = 0.33445 \text{ m} \quad (4.19)$$

### 4.3.2 CAÍDAS DE PRESIÓN

Con los resultados de las  $h_L$  de las diferentes secciones del quemador se determina el total de pérdidas de energía con la ec. 4.9, del cual resulta una  $h_L$  total de

$$h_{L \text{ Total}} = 0.86243 \text{ m.}$$

Ahora con este valor de  $h_{L \text{ Total}}$  se procede a calcular la pérdida de presión desde la inyección del gas en el tubo hasta la salida del quemador, la cual se ha establecido que debe ser de 1 atm. Haciendo uso de la Ecuación General de Energía y despejando la variable  $P_1$  resulta la

ec 4.8 en la cual se sustituye el valor de  $h_{L \text{ Total}}$  y el peso específico del hidrógeno, esto resulta  $P_1 = 101301.0332 \text{ N/m}^2 = 1.000010199 \text{ atm}$

Esta presión corresponde a la presión de flujo del gas a la salida de la válvula y el  $\Delta P$  del quemador es de

$$\Delta P_{\text{Sistema}} = 1.0332 \text{ N/m}^2 = 0.000010199 \text{ atm.}$$

### 4.3.3 PRESIÓN A LA ENTRADA DE LA VÁLVULA

Utilizando la ec. 4.10 y despejando la presión  $P_1$  la cual ahora corresponde a la presión antes de la válvula y donde  $P_2$  corresponde a la presión después de la misma, sustituyendo datos y resolviendo:

$$h_1 = 1.6297\text{E-}2 \text{ m} \quad (4.20)$$

Retomando la ec. 4.8 para determinar la presión del gas a la entrada de la válvula, se asume que  $P_2$  es el valor de la presión calculada antes como  $P_1 = 101301.0332 \text{ N/m}^2 = 1.000010199 \text{ atm}$ . Correspondiente a la salida de la válvula

Nuevamente utilizando la ec. 4.8 se determina  $P_1$ :

$$P_1 = P_2 + h_{L \gamma} = 101301.046 \text{ N/m}^2 = 1.000010332 \text{ atm}$$

Donde

$$P_2 = 101301.0332 \text{ N/m}^2$$

$$h_L = 1.6297\text{E-}2 \text{ m ec. 4.20}$$

$$\gamma_{\text{H}_2} = 0.82404 \text{ N/m}^3$$

De esta manera  $P_1$  corresponde a la presión de alimentación de la válvula. En la Tabla 4.7 se resumen las caídas de presión.

**TABLA 4.7**  
CAÍDAS DE PRESIÓN

$\Delta P$ Válvula	$\Delta P_v = 0.133\text{E-}6 \text{ atm.}$
$\Delta P$ Quemador	$\Delta P_q = 0.000010199 \text{ atm.}$
$\Delta P$ Total del sistema	$\Delta P_T = 0.000010332 \text{ atm.}$

### 4.3.4 DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL QUEMADOR POR DIFUSIÓN ATMOSFÉRICA

Al igual que el quemador con premezcla la longitud del tubo y el diámetro de la cabeza del quemador están fundamentadas en las dimensiones de los quemadores de las estufas convencionales

El cuerpo del quemador es pequeño ya que la finalidad de este prototipo es distribuir el caudal de combustible sin necesidad de esperar un premezclado ya que este no existe sino hasta la salida del gas cuando por difusión en el aire ambiente se forma la mezcla. El número de orificios se estableció de manera arbitraria, buscando que fuera el mayor número posible para el tamaño del quemador con la finalidad de distribuir mayormente el gas a la salida y se consiga así una mejor y más rápida difusión en el aire circundante. Como ya se mencionó antes, en el diseño termodinámico el caudal de hidrógeno está establecido para un rango de operación seguro lejos de ocurrir una mezcla explosiva, este caudal está asegurado por la válvula de flujo la cual abre y cierra permitiendo un máximo de  $4.7 \times 10^{-6}$  Kg/s de hidrógeno

<b>TUBO</b>	
Medida nominal del tubo	0.125 in = 3.17 mm
Diámetro externo	0.405 in = 10.28 mm
Diámetro Interno	0.307 in = 7.79 mm
Espesor de pared	0.049 in = 1.24 mm
Área interna transversal	0.074 in <sup>2</sup> = 47.74 mm <sup>2</sup>
Material	Acero inoxidable
Identificación	Cédula 105
<b>CABEZA DEL QUEMADOR</b>	
Material	Acero inoxidable
Diámetro interno menor	13 mm
Diámetro interno mayor	54 mm
Espesor de pared	2.5 mm
Tapa	Roscada con orificios
Diámetro externo sobre orificios	7 mm
Altura de la tapa	19 mm
Orificios	40
Diámetro de orificio	2.5 mm
Junta de luminiscencia	carbón (grafito)
Diámetro interno de la junta	76 mm
Espesor de la junta	2 mm
Altura de la junta	3 mm

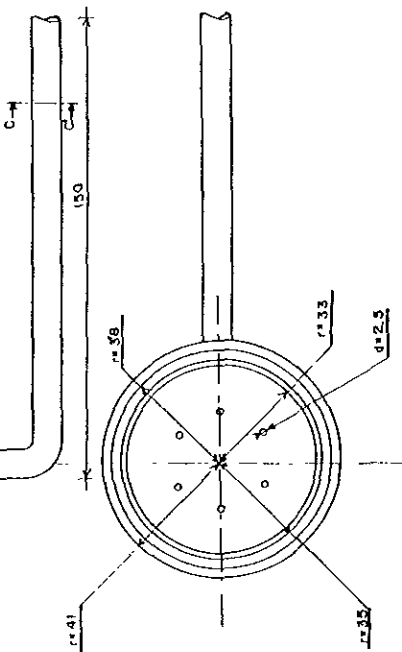
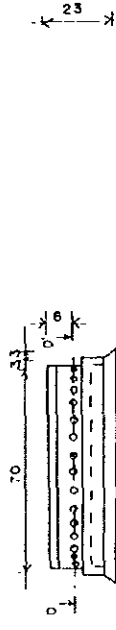
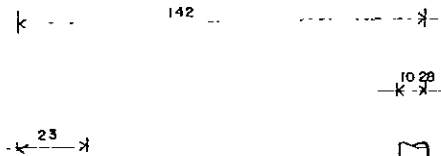
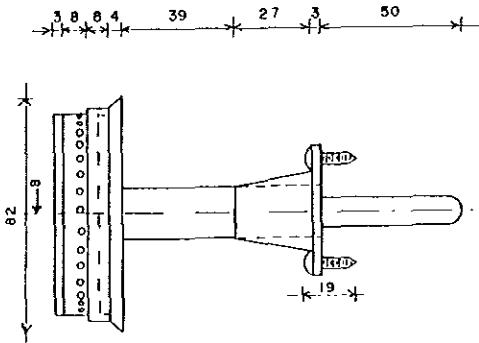
<b>ROSCA DE ENSAMBLE TIPO RECTA EN "V" AGUDA</b>	
Espesor de la rosca	1 mm
Número de hilos	4

### 4.3.5 DIMENSIONAMIENTO DE LA VÁLVULA

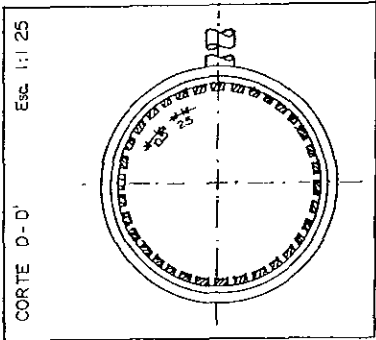
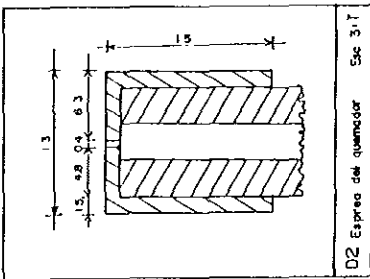
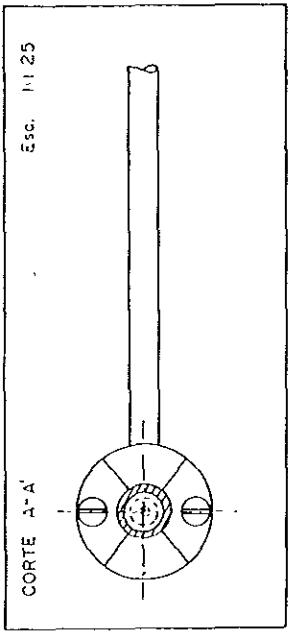
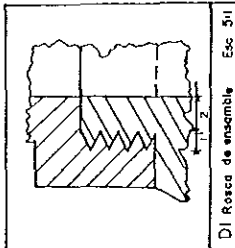
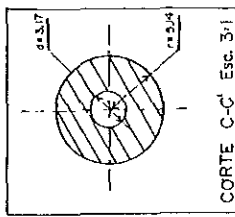
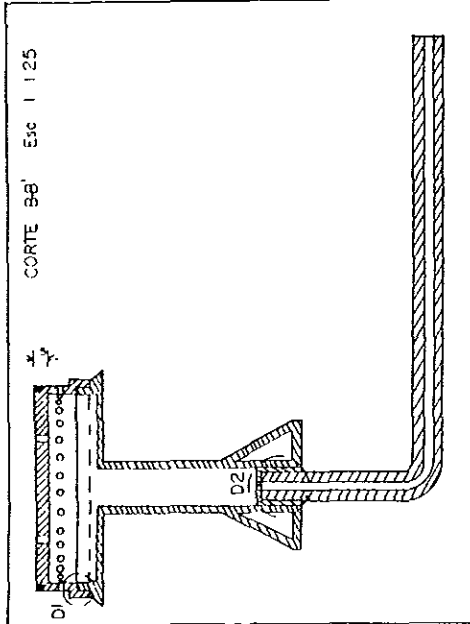
Los datos para el dimensionamiento de la válvula de flujo se resumen en la siguiente tabla:

**TABLA 4.8**  
HOJA DE DATOS PARA LA VÁLVULA

<b>Tipo de Válvula</b>	Aguja
<b>Tipo de flujo</b>	Gas Hidrógeno
$P_{\text{Alimentación}}$	101301.0466 N/m <sup>2</sup> = 1.000010332 atm.
$P_{\text{Salida}}$	101301.0332 N/m <sup>2</sup> = 1.000010199 atm.
$\Delta P$	0.0134 N/m <sup>2</sup> = 0.133E-6 atm.
<b>Velocidad de flujo</b>	0.5728 m/s
<b>Caudal máximo de flujo</b>	4.7E-6 Kg/s
<b>Material</b>	Acero inoxidable



		<b>FES. ZARAGOZA UNAM.</b>	
		Esc. 1 125 Cobos en mm	
		VISTAS GENERALES DEL QUEMADOR POR DIFUSION	
		I.O. Jaime Martínez Ruiz	
		TESIS	
		I.C. Beltrabeh Ramírez Martínez	
		Febrero de 1999	
		A4 1/2	



<b>F.E.S. ZARAGOZA UNAM.</b>	
CORTES Y DETALLES DEL QUEMADOR POR DIFUSION	Esc. indicadas Cotas en mm
I.C. Jaime Martínez Ruiz	TESIS
I.C. Betzabeth Ramírez Martínez	Febrero de 1999
<b>A4 2/2</b>	

# ***CAPÍTULO 5***



***ASPECTOS DE  
SEGURIDAD***



## 5.1 ASPECTOS DE SEGURIDAD

Una dificultad en la economía del hidrógeno es la *imagen de explosivo* a raíz del incendio del Hindenburg en 1938 y la Bomba de Hidrógeno que suele asociarse con el desastre. Dos puntos preliminares a recordar son:

1. La seguridad de un combustible es comparativa. El "mejor" combustible, es el más peligroso si está en contacto con el *aire en las proporciones explosivas*.
2. Nuevos combustibles se consideran peligrosos sólo si se muestra que las medidas de seguridad son poco efectivas.

En general todos los combustibles químicos tales como el gas natural, la gasolina ó el hidrógeno son *potencialmente peligrosos* por lo tanto deberán "ser tratados con respeto". Ningún combustible es inherentemente más seguro que otro en cualquier situación de *seguridad*. Las evidencias indican que todos pueden ser producidos, almacenados, transportados y manejados con seguridad para uso industrial, residencial y de transporte, *siempre que se tomen en cuenta las consideraciones y normas de seguridad establecidas para cada uno de ellos*.

## 5.2 PROPIEDADES DEL HIDRÓGENO QUE LO HACEN MÁS PELIGROSO DE MANEJAR QUE EL GAS NATURAL

Las sustancias de referencia para la discusión de la seguridad del hidrógeno son:  $\text{CH}_4$  y  $\text{C}_3\text{H}_8$ .

1. Los límites de flamabilidad del hidrógeno con oxígeno son amplios. De este modo, el hidrógeno se combina explosivamente con el *oxígeno cuando los límites van del 15 al 90% de hidrógeno* Ref. 5. Obviamente es importante detectar las fugas y proveer una ventilación adecuada cuando se usa en *espacios cerrados*. El rango de flamabilidad es de importancia en los sistemas de transmisión y distribución de hidrógeno, ya que deberá ser necesario purgar las líneas con un gas inerte (*por ejemplo nitrógeno*) como una prioridad después del mantenimiento para evitar la formación de mezclas de hidrógeno-aire, esto para la práctica industrial con el *manejo de sistemas de hidrógeno*. Durante la operación

- normal, por supuesto, una línea de hidrógeno ó el sistema de distribución deben ser presurizados para evitar que el aire se infiltre dentro de la línea o el sistema.
- 2 La energía de ignición es baja, así que una explosión es más fácil de producirse a menor energía
  - 3 Las fugas son fáciles, la velocidad del hidrógeno es 3 veces más rápida que el metano sobre una base de volumen, pero menor que los vapores de gasolina Si el hidrógeno escapa en un espacio cerrado, éste excede el límite de explosión a 18% por volumen en 0.26 veces para la cual el gas natural lo excede en el umbral del 6%.
  - 4 La velocidad de propagación de la flama es de 6 a 100 veces más (dependiendo de la cantidad de aire presente), para el hidrógeno que para el metano.
  - 5 Una flama de hidrógeno-oxígeno es casi invisible.
  6. No hay enfriamiento Joule-Thompson en la expansión del hidrógeno a temperatura normal. Por lo tanto, cuando el hidrógeno escapa por un orificio, proporciona calor y a veces ignición espontánea.

### 5.3 FORMAS EN LAS CUALES EL HIDRÓGENO ES MENOS PELIGROSO QUE EL GAS NATURAL

Hay una mejor manera para que el hidrógeno con respecto a la seguridad reduzca el paso de algunos de los puntos negativos mencionados antes.

- 1 La velocidad de escape Sobre una base de volumen, la velocidad de escape del hidrógeno es mayor que la del metano Porque el hidrógeno contiene por unidad de volumen tres veces menos energía que el metano, cuando el hidrógeno escapa lleva con él sólo 0.93 de energía cuando mucho, por unidad de tiempo con respecto al metano.
2. Cuando el hidrógeno es liberado al aire de un contenedor, éste se difunde más rápido que el metano, porque tiene una densidad mucho más pequeña El hidrógeno se disipa un poco más rápido que el petróleo.

## 5.4 MEDIDAS DE SEGURIDAD NECESARIAS PARA EL MANEJO DEL HIDRÓGENO

El hidrógeno no es tóxico, pero puede actuar como un simple asfixiante por dispersión o dilución en el aire hasta el punto donde el oxígeno en el aire no es suficiente para la vida, y provocar en ocasiones inconsciencia cuando se expone a grandes cantidades de hidrógeno.

Sin embargo el bajo límite de flamabilidad de sólo 4% por volumen de hidrógeno se difuye significativamente antes de alcanzarse un nivel peligroso de asfixia. La flamabilidad del gas hidrógeno está lejos de exceder un nivel peligroso de asfixia. El manejo seguro del hidrógeno requiere prestar atención a su riesgo de flamabilidad

El hidrógeno líquido y el gas frío puede producir severas quemaduras criogénicas similares a las quemaduras térmicas al estar en contacto con la piel, la ropa o los ojos que pueden dañarse por exposición al gas frío o salpicaduras de líquido.

El contacto entre partes desprotegidas del cuerpo con tuberías o recipientes no aislados conteniendo hidrógeno líquido puede causar que la carne se adhiera y desprender al pedazo cuando se intente retirar.

Las siguientes son algunas de las precauciones que necesitan ser observadas durante operaciones de transferencia:

- 1 Sólo el personal capacitado que conozca las propiedades del hidrógeno líquido así como el equipo y procedimientos de operación, se les permitirá intervenir en operaciones de transporte.
- 2 Las tuberías que transportan servicio de hidrógeno líquido deberán purgarse con helio o hidrógeno gaseoso antes de utilizarse
- 3 Los camiones tanque de hidrógeno deben estar estacionados adecuadamente durante las operaciones de carga y descarga.
- 4 Las operaciones de transporte de hidrógeno deben suspenderse durante las tormentas eléctricas.
- 5 Los contenedores para líquidos criogénicos deben mantenerse limpios y restringidos a este servicio. Estos contenedores deben fabricarse de Serie Tipo 300 de Acero Inoxidable, cobre, latón, aluminio, etc., excepto para equipos de vidrio especial para laboratorio. Algunos materiales, tales como acero al carbón, se vuelven quebradizos a temperaturas criogénicas y no pueden utilizarse para manejar estos líquidos.

## MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

El hidrógeno gas no es corrosivo y puede almacenarse a temperatura ambiente utilizando metales comúnmente usados en instalaciones designadas para tener suficiente fortaleza para las presiones de trabajo involucradas. El equipo y tuberías de construcción para usar hidrógeno deberán seleccionarse considerando la posibilidad de altas presiones para el caso del almacenamiento, y temperaturas arriba de los 450°F (232°C), que para éstos prototipos la temperatura máxima será de 1100°C, a presiones atmosféricas. Los metales utilizados para equipo que contenga hidrógeno líquido deben poseer propiedades satisfactorias a muy bajas temperaturas de operación.

Los materiales convenientes incluyen el acero austénico cromo-níquel (acero inoxidable), cobre, aluminio, monel, y algunos latones y bronces. Causando el hidrógeno es absorbido dentro del acero puede causar severos e indeseables efectos tales como escamación, fracturas por dilatación, y a altas temperaturas, además puede causar descarburización. El resquebrajamiento por hidrógeno es probablemente el más perseverante de los efectos y causa baja ductibilidad del acero a ciertos niveles de tensión o esfuerzo, y ciertas temperaturas.

Los pasos involucrados son la absorción del hidrógeno sobre la superficie del acero, la migración del hidrógeno y su retención en regiones de alto estrés y discontinuidades en el acero. El hidrógeno puede introducirse en el acero como resultado de la exposición del metal con el hidrógeno a altas presiones y temperaturas o como un resultado de la corrosión del metal en soluciones acuosas.

## SEGURIDAD EN EL MANEJO DE HIDRÓGENO

Contrariamente a la práctica general con otros cilindros de gas la regulación y válvulas de control no es aconsejable para aberturas parciales.

Quando se trata de cilindros aplican las reglas de gas comprimido pero son necesarias precauciones extra en el manejo del gas hidrógeno. La válvula del cilindro debe colocarse después del regulador, (el retroceso del gas puede causar retroceso de flama). Después de colocar el regulador y antes de abrir la válvula del cilindro, revisar que el regulador esté cerrado y el tornillo de ajuste abierto.

Después de abrir la válvula del cilindro lentamente con la válvula de salida señalando hacia otro lado, no frente a uno mismo. Totalmente abierta la válvula (para minimizar la ignición) cuando el cilindro está en uso (conectada dentro de un sistema de tuberías)

## MANEJO DE FUGAS Y EMERGENCIAS

La situación con el manejo del gas hidrógeno a nivel doméstico, obliga a que éste sea provisto de un colorante y/o odorante introducido dentro del combustible en pequeñas cantidades esto comúnmente se utiliza para detectar la sustancia (con efectividad en concentraciones muy pequeñas).

Las fugas en cilindros de hidrógeno deben manejarse con especial cuidado. Si el hidrógeno se escapa desde la válvula del cilindro incluso cuando la válvula está cerrada, o si la fuga ocurre a la presión de la válvula de relevo, remover cuidadosamente el cilindro a un lugar abierto y alejarlo de cualquier posible fuente de ignición

Hay que extremar precauciones al no emplear cilindros defectuosos porque el hidrógeno que escapa puede encenderse fácilmente con cualquier fuente de ignición y así, encenderá con una flama casi invisible que puede instantáneamente dañar a cualquiera que se encuentre en contacto con ella. La presencia de una flama de hidrógeno puede detectarse por aproximación con una "pajilla" acercándola frente a la flama para hacerla visible

Para fugas en sistemas de hidrógeno líquido, observar las mismas precauciones anotadas arriba. Aislar y restringir el acceso al área, eliminar cualquier fuente de ignición en las inmediaciones al área de la fuga. Notificar inmediatamente al proveedor de hidrógeno para recibir instrucciones y/o asistencia. El personal deberá usar equipo de protección antes de atender el manejo ó reparación de cualquier fuga

Si el hidrógeno se enciende, déjelo quemarse, manteniendo los alrededores fríos roceando agua para prevenir la dispersión del fuego, pero no esparcir agua directamente sobre la flama. De esta manera, una acumulación del gas que puede producir una explosión puede evitarse.

Precaución El agua nunca será directamente descargada sobre la válvula del sistema en grandes volúmenes, porque facilitaría el potencial de taponamiento como resultado de la formación de hielo.

## PRIMEROS AUXILIOS

Si una persona está *consiente* y presenta síntomas de asfixia deberá conducirse a un área no contaminada para que respire aire fresco. Una persona inconsciente deberá llevarse a un área no contaminada y darle respiración artificial con administración simultánea de oxígeno tan pronto como sea posible

Los líquidos criogénicos pueden causar quemaduras similares a las quemaduras térmicas cuando están en contacto con la piel y deberán atenderse inmediatamente. Enjuagar el área afectada de la piel con agua tibia (entre 40 y 45°C) hasta que la temperatura de la piel regrese a la normalidad, y dar atención médica tan pronto como sea posible

## 5.5 ADITIVOS PARA EL HIDRÓGENO

El gas natural es odorizado para ayudar a su detección, de la misma manera al gas hidrógeno debe colocársele un odorante con el fin de localizar una posible fuga, el odorante debe ser un mercaptano, en cantidad de 0.02% por cantidad de combustible hidrógeno (Ref 4)

**Iluminantes:** Para los quemadores de hidrógeno, la flama es muy poco visible por lo tanto algunos autores consideran necesario un iluminante como el sódio-orgánico aunque no mencionan de qué manera usarlo. De otra manera puede hacerse uso de un colorante para detectar las fugas de hidrógeno

En este sentido, para los quemadores de este trabajo se propone utilizar una junta de carbón (grafito), en las salidas de la flama para que al encender, las partículas que se queman proporcionen una coloración amarillenta a la flama, y de esta manera el usuario pueda percatarse de la presencia e intensidad de la flama, para fines de regulación de la misma según convenga a las necesidades de cocción.

## 5.6 USOS INDUSTRIALES Y SEGURIDAD

Las principales contribuciones aquí tienen que ver con el trabajo que desarrolla la N A S A en transporte y distribución con hidrógeno, en forma gaseosa y líquida en grandes cantidades. Así la N A S A. ha desarrollado tanques de almacenamiento, tanques de transporte, accesorios, etc.

La Corporación Linde ha hecho muchas contribuciones en la tecnología del manejo del hidrógeno, particularmente en forma de líquido.

En cuanto a usos se refiere, grandes cantidades de hidrógeno son producidas y transportadas por gasoductos para su empleo en refinerías, petroquímicas, y grandes volúmenes para químicos que necesitan hidrotratamientos, reformaciones catalíticas e hidrocracking

Pequeñas cantidades de hidrógeno son producidas y enviadas por gasoducto para su uso en industrias tales como: química, metalúrgica, grasas y aceites, vidrio y electrónica

Para algunos de estos pequeños usuarios la entrega del hidrógeno se lleva a cabo en forma de hidrógeno gaseoso en cilindros o carros tanque o por descarga en cascada a cilindros de almacén.

El hidrógeno se emplea en la producción de una gran variedad de químicos:

1. **Tintas:** En la manufactura de tintas de derivados de anilina producida por nitrobenzeno y derivados de toluidina producida a partir de nitrotolueno.
2. **Catalizadores:** Para producir aluminio álcalis, compuestos de cobalto, metalhidruros, y una gran variedad de níquel y otros más.
3. **Saborizantes y fragancias:** Se utiliza para elaborar sabores y fragancias las cuales son generalmente obtenidos de unos pocos químicos intermediarios.
4. **Pesticidas:** Utilizado en la manufactura de complejos, con propiedades químicas varias de las cuales se sabe que requieren hidrogenación
5. **Halógenos orgánicos:** Para manufacturar una variedad de químicos utilizados en síntesis orgánicas tales como dibromobutano, pentaclorobenceno, o fluorocarbonos.
6. **Plásticos y fibras sintéticas:** Utilizado para la producción de polietileno y polipropileno de alta densidad, así como también se utiliza en la producción de productos intermedios para el poliuretano, nailon, y fibras de poliamida
7. **Químicos especiales:** El hidrógeno se usa en la producción de gran variedad de químicos especiales incluyendo productos intermedios en la producción de combustibles para cohetes de alta-energía y otras aplicaciones únicas.
8. **Petróleo.** Se emplea para la hidrogenación de productos insaturados de petróleo

En la industria metalúrgica el hidrógeno se emplea en la producción de varios productos:

- ❖ **Tratamiento de calor** Los metales ferrosos son tratados bajo atmósferas controladas para cambiar sus propiedades físicas. Se usan atmósferas protectoras para excluir el oxígeno y prevenir la oxidación del metal a elevadas temperaturas para el horneado. Las atmósferas protectoras contienen hidrógeno.
- ❖ **Producción de metal** La refinación básica del tungsteno, molibdeno, y magnesio utiliza el proceso de hidrometalurgia, que requiere de grandes volúmenes de hidrógeno para producir oxidación de metal.
- ❖ **Soldadura y corte.** El hidrógeno es utilizado con oxígeno en soldadura y corte oxihídrico, su temperatura alcanza hasta los 2204°C, la cual es adecuada para cortes metálicos bajo el agua, así como también aplicada en el trabajo y fabricación de cuarzo y vidrio

## ALMACENAMIENTO

Los requerimientos específicos para almacenar hidrógeno están contenidos en la NFPA 50 A Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites, y NFPA 50 B, Standard for Liquefield Hydrogen Systems at Consumer Sites.

Los depósitos de almacenamiento portátiles y estacionarios, deben de inspeccionarse periódicamente por.

1. Corrosión de recipientes y soportes
2. Condiciones de presión en accesorios de alivio
3. Operaciones propias de las válvulas de no retorno,
4. Condiciones de las tuberías plegables

Deberán desarrollarse periódicamente una prueba de fuga con una solución jabonosa u otra sustancia adecuada para la detección de fugas, a máxima presión de operación



## CÓDIGOS DE SEGURIDAD

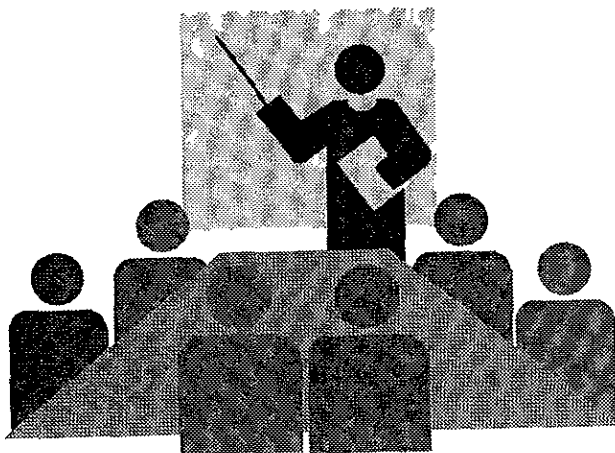
La NASA y la Fuerza Aérea de los Estados Unidos han establecido prácticas de seguridad y procedimientos para distribución del hidrógeno, el principal documento en la NASA es el Tech. Memo. TMX-5254. Este documento es un "Manual de Seguridad del Hidrógeno" y accesorios con detalle, con aspectos prácticos de seguridad con respecto a circunstancias en las que se usa el hidrógeno. Este documento describe los diseños principales de manufactura de aparatos, la eliminación de las fuentes de ignición, protección de personal, procedimientos de operación detallados, etc.

En la Tabla 5.1 se enlistan una serie de documentos sobre la seguridad y manejo del hidrógeno, los cuales son útiles para construir y diseñar equipo de almacenamiento de hidrógeno y transportación del mismo.

**TABLA 5.1**  
GUÍA REGULADORA AMERICANA PARA LA DISTRIBUCIÓN DEL HIDRÓGENO

Método de distribución	Especificación de equipos	Regulación de embarque	Estándares de instalación
Cilindro líquido.	TCG 173.57	TCG 173.316	NFPA 50B
Contenedor líquido.	ASME / (Ref. CGA 341)	Permiso especial	.....
Carro tanque líquido.	TCG 173.316	TCG 173.316	.....
Estación de servicio líquido	ASME	....	NFPA 50B
Cilindro de gas.	ASME / TCG 178.36-37	TCG 173.301	NFPA 567
Contenedor cilíndrico de gas	ASME / TCG 178.36-37	TCG 173.301	NFPA 567
Líneas de gas	ANSI B31.8	.....	DOT Título 9 Parte 192

# CONCLUSIONES



## CONCLUSIONES

El hidrógeno como fuente de energía térmica posee las cualidades más deseables como combustible ya que es tres veces más energético que los hidrocarburos, la alta temperatura de flama, baja energía calorífica por radiación y amplio rango de composiciones, lo hacen un combustible seguro en muchas aplicaciones en las que actualmente se emplean gas natural e hidrocarburos; la mayor ventaja es que se puede almacenar a diferencia de la electricidad que hay que utilizarla conforme se genera, en este sentido el empleo del hidrógeno como vector energético es una opción que ha ido cobrando fuerza en las tareas de investigación en países como Canadá, E U A , Alemania y Japón desarrollando dispositivos para obtener energía útil que incluyen desde quemadores de cocina hasta propulsores de vehículos espaciales pasando por automotores y generadores de vapor. En un futuro no muy lejano el hidrógeno sustituirá a los combustibles fósiles y la introducción de este vector energético a través de fuentes renovables traerá consecuencias positivas sobre la estabilidad política mundial ya que estas últimas están distribuidas de manera más homogénea que las reservas de hidrocarburos evitando así tensiones políticas y económicas mundiales sin mencionar que aún es posible recuperar la estabilidad ecológica del planeta

El presente trabajo es una propuesta de solución para cambiar el gas L.P. por gas hidrógeno a nivel doméstico empleando dos quemadores prototipo cuyas características térmicas cubren las necesidades básicas de cocción de alimentos y potabilización de agua operando a temperaturas entre 900 a 1100°C que están en el intervalo aproximado de la temperatura de flama de las estufas convencionales, bajo un rango de mezcla H<sub>2</sub> - Aire seguro, además de una junta de grafito que permitirá la visualización de la flama para la regulación de la misma y seguridad del usuario. El material así como el diseño aerodinámico de los prototipos posee un fundamento teórico debido a que por ser un accesorio innovador en el campo de las estufas domésticas no existen normas o datos técnicos que puedan servir de guía como es el caso de los orificios de salida que se distribuyen bajo tablas y gráficas experimentales sobre el comportamiento de la flama del combustible (gas L.P.).

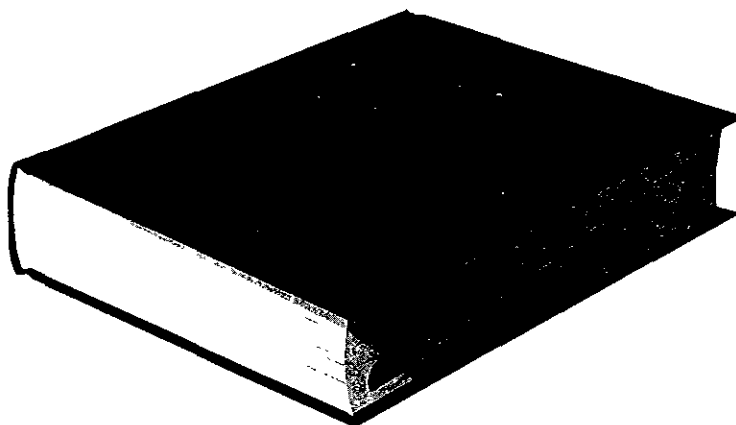
Entre los criterios generales de seguridad, se propone la odorización del gas hidrógeno con etil-mercaptano y el empleo de acero inoxidable austénico para el cuerpo de los quemadores ya que la naturaleza corrosiva del hidrógeno a altas temperaturas necesita de un material resistente, sobre todo para su empleo a nivel prototipo. Así mismo, la válvula

de flujo también se propone de este material ya que las válvulas de aguja se elaboran de diversos materiales incluyendo el acero inoxidable.

Por otro lado la base de cálculo en hoja electrónica para la composición de la mezcla  $H_2$ -Aire puede emplearse tanto para un quemador doméstico como para un quemador industrial fijando la *temperatura de flama* que se desee alcanzar y el caudal másico mensual que se emplea con el combustible que se desea reemplazar (gas L.P.).

Los planos incluyen las dimensiones para ambos prototipos las cuales cumplen con los espacios estructurales de las estufas convencionales, con el propósito de que puedan construirse e implementarse en un futuro.

# **APÉNDICE A**



ESTADÍSTICA DE LA INDUSTRIA

## APÉNDICE A (continuación)

**Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)**

T	t	h	p	u	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	p	u	v <sub>r</sub>	φ
200	-73.15	200.13	33468	142.72	171.52	5.2950	250	-23.15	250.25	7296	178.49	98.353	5.5186
201		201.13	34056	143.44	169.41	5.3000	251		251.25	7398	179.21	97.379	5.5226
202		202.13	34652	144.15	167.32	5.3049	252		252.26	7502	179.93	96.418	5.5266
203		203.14	35254	144.87	165.28	5.3099	253		253.26	7606	180.64	95.471	5.5306
204		204.14	35864	145.58	163.27	5.3148	254		254.26	7712	181.36	94.536	5.5346
205	-68.15	205.14	36482	146.30	161.29	5.3197	255	-18.15	255.27	7819	182.07	93.614	5.5385
206		206.14	37107	147.02	159.35	5.3246	256		256.27	7926	182.79	92.705	5.5424
207		207.15	37740	147.73	157.43	5.3294	257		257.27	8035	183.51	91.808	5.5463
208		208.15	38380	148.45	155.55	5.3343	258		258.28	8145	184.22	90.923	5.5502
209		209.15	39029	149.16	153.71	5.3391	259		259.28	8256	184.94	90.049	5.5541
210	-63.15	210.15	39684	149.88	151.89	5.3439	260	-13.15	260.28	8368	185.65	89.188	5.5580
211		211.15	40348	150.59	150.10	5.3486	261		261.28	8481	186.37	88.338	5.5618
212		212.16	41020	151.31	148.34	5.3534	262		262.29	8595	187.09	87.499	5.5657
213		213.16	41700	152.02	146.61	5.3581	263		263.29	8710	187.80	86.671	5.5695
214		214.16	42387	152.74	144.91	5.3628	264		264.29	8826	188.52	85.855	5.5733
215	-58.15	215.16	43083	153.45	143.24	5.3674	265	-8.15	265.30	8944	189.23	85.049	5.5771
216		216.17	43787	154.17	141.59	5.3721	266		266.30	9062	189.95	84.253	5.5809
217		217.17	44499	154.88	139.97	5.3767	267		267.30	9182	190.67	83.468	5.5846
218		218.17	45219	155.60	138.38	5.3813	268		268.31	9302	191.38	82.693	5.5884
219		219.17	45947	156.31	136.81	5.3859	269		269.31	9424	192.10	81.928	5.5921
220	-53.15	220.18	46684	157.03	135.26	5.3905	270	-3.15	270.31	9547	192.81	81.173	5.5958
221		221.18	47429	157.74	133.74	5.3950	271		271.32	9672	193.53	80.427	5.5996
222		222.18	48183	158.46	132.25	5.3996	272		272.32	9797	194.25	79.691	5.6032
223		223.18	48945	159.17	130.77	5.4041	273		273.32	9923	194.96	78.965	5.6069
224		224.18	49716	159.89	129.32	5.4085	274		274.33	1.0051	195.68	78.248	5.6106
225	-48.15	225.19	50495	160.61	127.90	5.4130	275	1.85	275.33	1.0180	196.40	77.539	5.6143
226		226.19	51284	161.32	126.49	5.4175	276		276.33	1.0310	197.11	76.840	5.6179
227		227.19	52080	162.04	125.11	5.4219	277		277.34	1.0441	197.83	76.149	5.6215
228		228.19	52886	162.75	123.74	5.4263	278		278.34	1.0573	198.55	75.467	5.6251
229		229.20	53701	163.47	122.40	5.4307	279		279.34	1.0707	199.26	74.794	5.6287
230	-43.15	230.20	54524	164.18	121.08	5.4350	280	6.85	280.35	1.0842	199.98	74.129	5.6323
231		231.20	55357	164.90	119.78	5.4394	281		281.35	1.0978	200.70	73.472	5.6359
232		232.20	56198	165.61	118.49	5.4437	282		282.36	1.1115	201.41	72.823	5.6395
233		233.21	57049	166.33	117.23	5.4480	283		283.36	1.1253	202.13	72.182	5.6430
234		234.21	57908	167.04	115.99	5.4523	284		284.36	1.1393	202.85	71.549	5.6466
235	-38.15	235.21	58777	167.76	114.76	5.4566	285	11.85	285.37	1.1534	203.56	70.924	5.6501
236		236.21	59656	168.48	113.55	5.4609	286		286.37	1.1676	204.28	70.306	5.6536
237		237.22	60543	169.19	112.36	5.4651	287		287.37	1.1820	205.00	69.696	5.6571
238		238.22	61440	169.91	111.19	5.4693	288		288.38	1.1964	205.71	69.093	5.6606
239		239.22	62347	170.62	110.03	5.4735	289		289.38	1.2110	206.43	68.497	5.6641
240	-33.15	240.22	63263	171.34	108.89	5.4777	290	16.85	290.39	1.2258	207.15	67.909	5.6676
241		241.23	64188	172.05	107.77	5.4819	291		291.39	1.2406	207.86	67.327	5.6710
242		242.23	65123	172.77	106.66	5.4860	292		292.40	1.2556	208.58	66.753	5.6745
243		243.23	66068	173.48	105.57	5.4902	293		293.40	1.2707	209.30	66.185	5.6779
244		244.24	67023	174.20	104.50	5.4943	294		294.40	1.2859	210.02	65.624	5.6813
245	-28.15	245.24	67987	174.92	103.44	5.4984	295	21.85	295.41	1.3013	210.73	65.069	5.6847
246		246.24	68962	175.63	102.39	5.5025	296		296.41	1.3168	211.45	64.521	5.6881
247		247.24	69946	176.35	101.36	5.5065	297		297.42	1.3324	212.17	63.980	5.6915
248		248.25	70940	177.06	100.34	5.5106	298		298.42	1.3482	212.89	63.445	5.6949
249		249.25	71945	177.78	99.34	5.5146	299		299.43	1.3641	213.60	62.916	5.6983

APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ
300	26.85	300.43	1.3801	214.32	62.393	5.7016	350	76.85	350.73	2.3689	250.27	42.407	5.8567
301		301.43	1.3963	215.04	61.876	5.7050	351		351.74	2.3928	250.99	42.105	5.8596
302		302.44	1.4126	215.76	61.365	5.7083	352		352.75	2.4168	251.71	41.805	5.8624
303		303.44	1.4290	216.47	60.860	5.7116	353		353.76	2.4410	252.43	41.508	5.8653
304		304.45	1.4456	217.19	60.360	5.7149	354		354.76	2.4654	253.16	41.214	5.8681
305	31.85	305.45	1.4623	217.91	59.867	5.7182	355	81.85	355.77	2.4900	253.88	40.923	5.8710
306		306.46	1.4792	218.63	59.379	5.7215	356		356.78	2.5147	254.60	40.635	5.8738
307		307.46	1.4962	219.34	58.896	5.7248	357		357.79	2.5396	255.32	40.349	5.8767
308		308.47	1.5133	220.06	58.419	5.7281	358		358.80	2.5647	256.04	40.067	5.8795
309		309.47	1.5306	220.78	57.947	5.7313	359		359.81	2.5899	256.76	39.787	5.8823
310	36.85	310.48	1.5480	221.50	57.481	5.7346	360	86.85	360.81	2.6154	257.48	39.509	5.8851
311		311.48	1.5655	222.22	57.020	5.7378	361		361.82	2.6410	258.21	39.235	5.8879
312		312.49	1.5832	222.93	56.564	5.7410	362		362.83	2.6668	258.93	38.963	5.8907
313		313.49	1.6011	223.65	56.112	5.7442	363		363.84	2.6928	259.65	38.693	5.8935
314		314.50	1.6191	224.37	55.666	5.7474	364		364.85	2.7190	260.37	38.426	5.8962
315	41.85	315.50	1.6372	225.09	55.225	5.7506	365	91.85	365.86	2.7453	261.09	38.162	5.8990
316		316.51	1.6555	225.81	54.789	5.7538	366		366.87	2.7718	261.82	37.900	5.9018
317		317.51	1.6739	226.53	54.357	5.7570	367		367.88	2.7986	262.54	37.641	5.9045
318		318.52	1.6925	227.24	53.930	5.7602	368		368.89	2.8255	263.26	37.384	5.9073
319		319.53	1.7112	227.96	53.508	5.7633	369		369.90	2.8526	263.98	37.129	5.9100
320	46.85	320.53	1.7301	228.68	53.091	5.7665	370	96.85	370.91	2.8799	264.71	36.877	5.9127
321		321.54	1.7491	229.40	52.677	5.7696	371		371.92	2.9073	265.43	36.628	5.9155
322		322.54	1.7682	230.12	52.269	5.7727	372		372.93	2.9350	266.15	36.380	5.9182
323		323.55	1.7876	230.84	51.865	5.7759	373		373.94	2.9629	266.87	36.135	5.9209
324		324.55	1.8070	231.56	51.465	5.7790	374		374.95	2.9909	267.60	35.892	5.9236
325	51.85	325.56	1.8267	232.27	51.069	5.7821	375	101.85	375.96	3.0191	268.32	35.651	5.9263
326		326.57	1.8464	232.99	50.677	5.7852	376		376.97	3.0476	269.04	35.413	5.9290
327		327.57	1.8664	233.71	50.290	5.7882	377		377.98	3.0762	269.77	35.177	5.9317
328		328.58	1.8864	234.43	49.907	5.7913	378		378.99	3.1050	270.49	34.943	5.9344
329		329.58	1.9067	235.15	49.528	5.7944	379		380.00	3.1340	271.21	34.711	5.9370
330	56.85	330.59	1.9271	235.87	49.152	5.7974	380	106.85	381.01	3.1633	271.94	34.481	5.9397
331		331.60	1.9476	236.59	48.781	5.8005	381		382.02	3.1927	272.66	34.253	5.9423
332		332.60	1.9683	237.31	48.414	5.8035	382		383.03	3.2223	273.39	34.027	5.9450
333		333.61	1.9892	238.03	48.050	5.8065	383		384.04	3.2521	274.11	33.804	5.9476
334		334.62	2.0102	238.75	47.690	5.8096	384		385.05	3.2821	274.83	33.582	5.9503
335	61.85	335.62	2.0314	239.47	47.334	5.8126	385	111.85	386.06	3.3123	275.56	33.362	5.9529
336		336.63	2.0528	240.19	46.982	5.8156	386		387.08	3.3427	276.28	33.145	5.9555
337		337.64	2.0743	240.91	46.633	5.8186	387		388.09	3.3733	277.01	32.929	5.9581
338		338.64	2.0959	241.63	46.288	5.8215	388		389.10	3.4042	277.73	32.715	5.9608
339		339.65	2.1178	242.35	45.946	5.8245	389		390.11	3.4352	278.46	32.503	5.9634
340	66.85	340.66	2.1398	243.07	45.608	5.8275	390	116.85	391.12	3.4664	279.18	32.293	5.9660
341		341.66	2.1619	243.79	45.273	5.8304	391		392.13	3.4979	279.91	32.085	5.9687
342		342.67	2.1843	244.51	44.942	5.8334	392		393.15	3.5295	280.63	31.879	5.9711
343		343.68	2.2068	245.23	44.614	5.8363	393		394.16	3.5614	281.36	31.674	5.9737
344		344.69	2.2294	245.95	44.289	5.8393	394		395.17	3.5934	282.08	31.471	5.9763
345	71.85	345.69	2.2523	246.67	43.967	5.8422	395	121.85	396.18	3.6257	282.81	31.270	5.9788
346		346.70	2.2753	247.39	43.649	5.8451	396		397.20	3.6582	283.53	31.071	5.9814
347		347.71	2.2984	248.11	43.334	5.8480	397		398.21	3.6909	284.26	30.874	5.9840
348		348.72	2.3218	248.83	43.022	5.8509	398		399.22	3.7238	284.98	30.678	5.9865
349		349.72	2.3453	249.55	42.713	5.8538	399		400.23	3.7569	285.71	30.484	5.9891

## APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	P <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	P <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ
400	126.85	401.25	3.7902	286.43	30.292	5.9916	450	176.85	452.07	5.7519	322.91	22.456	6.1113
401		402.26	3.8238	287.16	30.101	5.9941	451		453.09	5.7975	323.64	22.329	6.1136
402		403.27	3.8576	287.89	29.912	5.9966	452		454.11	5.8433	324.38	22.203	6.1158
403		404.29	3.8916	288.61	29.724	5.9992	453		455.14	5.8894	325.11	22.078	6.1181
404		405.30	3.9258	289.34	29.538	6.0017	454		456.16	5.9358	325.84	21.954	6.1203
405	131.85	406.31	3.9602	290.07	29.354	6.0042	455	181.85	457.18	5.9824	326.58	21.831	6.1226
406		407.33	3.9948	290.79	29.171	6.0067	456		458.20	6.0293	327.31	21.708	6.1248
407		408.34	4.0297	291.52	28.990	6.0092	457		459.22	6.0765	328.05	21.587	6.1271
408		409.36	4.0648	292.25	28.811	6.0117	458		460.24	6.1240	328.78	21.467	6.1293
409		410.37	4.1001	292.97	28.632	6.0141	459		461.26	6.1717	329.52	21.347	6.1315
410	136.85	411.38	4.1356	293.70	28.456	6.0166	460	186.85	462.28	6.2197	330.25	21.228	6.1338
411		412.40	4.1714	294.43	28.281	6.0191	461		463.31	6.2680	330.99	21.111	6.1360
412		413.41	4.2074	295.16	28.107	6.0216	462		464.33	6.3165	331.72	20.994	6.1382
413		414.43	4.2436	295.88	27.935	6.0240	463		465.35	6.3653	332.46	20.878	6.1404
414		415.44	4.2800	296.61	27.764	6.0265	464		466.37	6.4145	333.19	20.763	6.1426
415	141.85	416.46	4.3167	297.34	27.595	6.0289	465	191.85	467.40	6.4638	333.93	20.649	6.1448
416		417.47	4.3536	298.07	27.427	6.0314	466		468.42	6.5135	334.66	20.535	6.1470
417		418.49	4.3907	298.80	27.260	6.0338	467		469.44	6.5635	335.40	20.423	6.1492
418		419.50	4.4281	299.53	27.095	6.0362	468		470.47	6.6137	336.13	20.311	6.1514
419		420.52	4.4657	300.25	26.931	6.0387	469		471.49	6.6642	336.87	20.200	6.1536
420	146.85	421.54	4.5035	300.98	26.769	6.0411	470	196.85	472.51	6.7150	337.61	20.090	6.1557
421		422.55	4.5416	301.71	26.608	6.0435	471		473.54	6.7661	338.34	19.981	6.1579
422		423.57	4.5799	302.44	26.448	6.0459	472		474.56	6.8175	339.08	19.872	6.1601
423		424.58	4.6184	303.17	26.289	6.0483	473		475.58	6.8692	339.82	19.764	6.1623
424		425.60	4.6572	303.90	26.132	6.0507	474		476.61	6.9212	340.56	19.658	6.1644
425	151.85	426.62	4.6962	304.63	25.976	6.0531	475	201.85	477.63	6.9734	341.29	19.551	6.1666
426		427.63	4.7354	305.36	25.821	6.0555	476		478.66	7.0260	342.03	19.446	6.1687
427		428.65	4.7749	306.09	25.668	6.0579	477		479.68	7.0788	342.77	19.341	6.1709
428		429.67	4.8147	306.82	25.516	6.0603	478		480.71	7.1319	343.51	19.238	6.1730
429		430.68	4.8546	307.55	25.365	6.0626	479		481.73	7.1854	344.24	19.134	6.1752
430	156.85	431.70	4.8949	308.28	25.215	6.0650	480	206.85	482.76	7.2391	344.98	19.032	6.1773
431		432.72	4.9353	309.01	25.066	6.0674	481		483.78	7.2931	345.72	18.930	6.1794
432		433.73	4.9760	309.74	24.919	6.0697	482		484.81	7.3475	346.46	18.830	6.1816
433		434.75	5.0170	310.47	24.773	6.0721	483		485.83	7.4021	347.20	18.729	6.1837
434		435.77	5.0582	311.20	24.628	6.0744	484		486.86	7.4570	347.94	18.630	6.1858
435	161.85	436.79	5.0996	311.93	24.484	6.0768	485	211.85	487.89	7.5123	348.68	18.531	6.1879
436		437.81	5.1413	312.66	24.341	6.0791	486		488.91	7.5678	349.42	18.433	6.1901
437		438.82	5.1833	313.39	24.199	6.0814	487		489.94	7.6236	350.16	18.336	6.1922
438		439.84	5.2255	314.12	24.059	6.0838	488		490.97	7.6798	350.90	18.239	6.1943
439		440.86	5.2679	314.85	23.920	6.0861	489		491.99	7.7362	351.64	18.143	6.1964
440	166.85	441.88	5.3106	315.59	23.781	6.0884	490	216.85	493.02	7.7930	352.38	18.048	6.1985
441		442.90	5.3536	316.32	23.644	6.0907	491		494.05	7.8501	353.12	17.953	6.2006
442		443.92	5.3968	317.05	23.508	6.0930	492		495.08	7.9075	353.86	17.859	6.2027
443		444.94	5.4403	317.78	23.373	6.0953	493		496.10	7.9652	354.60	17.766	6.2047
444		445.95	5.4840	318.51	23.239	6.0976	494		497.13	8.0232	355.34	17.673	6.2068
445	171.85	446.97	5.5280	319.25	23.106	6.0999	495	221.85	498.16	8.0815	356.08	17.581	6.2089
446		447.99	5.5723	319.98	22.974	6.1022	496		499.19	8.1401	356.82	17.490	6.2110
447		449.01	5.6168	320.71	22.843	6.1045	497		500.22	8.1991	357.56	17.399	6.2131
448		450.03	5.6616	321.44	22.713	6.1068	498		501.24	8.2584	358.30	17.309	6.2151
449		451.05	5.7066	322.18	22.584	6.1090	499		502.27	8.3180	359.04	17.219	6.2172



APÉNDICE A (continuación)

Table I Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	p	α	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	p	α	v <sub>r</sub>	φ
500	226.85	503.30	8.378	359.79	17.130	6.2193	550	276.85	555.01	11.810	397.15	13.367	6.3178
501		504.33	8.438	360.53	17.042	6.2213	551		556.05	11.888	397.90	13.303	6.3197
502		505.36	8.499	361.27	16.954	6.2234	552		557.09	11.967	398.65	13.240	6.3216
503		506.39	8.560	362.01	16.867	6.2254	553		558.13	12.045	399.40	13.178	6.3235
504		507.42	8.621	362.76	16.781	6.2275	554		559.17	12.125	400.16	13.115	6.3253
505	231.85	508.45	8.682	363.50	16.695	6.2295	555	281.85	560.21	12.204	400.91	13.053	6.3272
506		509.48	8.744	364.24	16.610	6.2315	556		561.25	12.284	401.66	12.992	6.3291
507		510.51	8.806	364.99	16.525	6.2336	557		562.29	12.364	402.42	12.931	6.3310
508		511.54	8.869	365.73	16.441	6.2356	558		563.33	12.445	403.17	12.870	6.3328
509		512.57	8.932	366.47	16.357	6.2376	559		564.38	12.526	403.93	12.809	6.3347
510	236.85	513.60	8.995	367.22	16.274	6.2396	560	286.85	565.42	12.608	404.68	12.749	6.3366
511		514.64	9.058	367.96	16.192	6.2417	561		566.46	12.689	405.43	12.690	6.3384
512		515.67	9.122	368.71	16.110	6.2437	562		567.50	12.772	406.19	12.630	6.3403
513		516.70	9.187	369.45	16.029	6.2457	563		568.54	12.854	406.94	12.571	6.3421
514		517.73	9.251	370.20	15.948	6.2477	564		569.59	12.938	407.70	12.513	6.3440
515	241.85	518.76	9.316	370.94	15.868	6.2497	565	291.85	570.63	13.021	408.46	12.455	6.3458
516		519.79	9.381	371.69	15.788	6.2517	566		571.67	13.105	409.21	12.397	6.3477
517		520.83	9.447	372.43	15.709	6.2537	567		572.71	13.189	409.97	12.339	6.3495
518		521.86	9.513	373.18	15.630	6.2557	568		573.76	13.274	410.72	12.282	6.3513
519		522.89	9.579	373.92	15.552	6.2577	569		574.80	13.359	411.48	12.225	6.3532
520	246.85	523.93	9.645	374.67	15.474	6.2597	570	296.85	575.84	13.445	412.24	12.169	6.3550
521		524.96	9.712	375.42	15.397	6.2617	571		576.89	13.531	412.99	12.113	6.3568
522		525.99	9.780	376.16	15.321	6.2637	572		577.93	13.617	413.75	12.057	6.3587
523		527.03	9.847	376.91	15.244	6.2656	573		578.98	13.704	414.51	12.002	6.3605
524		528.06	9.915	377.65	15.169	6.2676	574		580.02	13.791	415.27	11.946	6.3623
525	251.85	529.09	9.984	378.40	15.094	6.2696	575	301.85	581.07	13.879	416.02	11.892	6.3641
526		530.13	10.052	379.15	15.019	6.2716	576		582.11	13.967	416.78	11.837	6.3660
527		531.16	10.121	379.90	14.945	6.2735	577		583.16	14.056	417.54	11.783	6.3678
528		532.20	10.191	380.64	14.872	6.2755	578		584.20	14.144	418.30	11.729	6.3696
529		533.23	10.261	381.39	14.798	6.2774	579		585.25	14.234	419.06	11.676	6.3714
530	256.85	534.27	10.331	382.14	14.726	6.2794	580	306.85	586.29	14.324	419.82	11.623	6.3732
531		535.30	10.401	382.89	14.654	6.2813	581		587.34	14.414	420.58	11.570	6.3750
532		536.34	10.472	383.64	14.582	6.2833	582		588.39	14.504	421.33	11.517	6.3768
533		537.37	10.543	384.39	14.511	6.2852	583		589.43	14.594	422.09	11.465	6.3786
534		538.41	10.615	385.13	14.440	6.2872	584		590.48	14.687	422.85	11.413	6.3804
535	261.85	539.45	10.687	385.88	14.369	6.2891	585	311.85	591.53	14.779	423.61	11.362	6.3822
536		540.48	10.759	386.63	14.300	6.2910	586		592.57	14.871	424.37	11.310	6.3840
537		541.52	10.832	387.38	14.230	6.2930	587		593.62	14.964	425.13	11.259	6.3857
538		542.55	10.905	388.13	14.161	6.2949	588		594.67	15.058	425.90	11.209	6.3875
539		543.59	10.978	388.88	14.093	6.2968	589		595.72	15.151	426.66	11.158	6.3893
540	266.85	544.63	11.052	389.63	14.025	6.2988	590	316.85	596.77	15.245	427.42	11.108	6.3911
541		545.67	11.126	390.38	13.957	6.3007	591		597.81	15.340	428.18	11.058	6.3929
542		546.70	11.201	391.13	13.890	6.3026	592		598.86	15.435	428.94	11.009	6.3946
543		547.74	11.275	391.88	13.823	6.3045	593		599.91	15.531	429.70	10.960	6.3964
544		548.78	11.351	392.63	13.756	6.3064	594		600.96	15.626	430.46	10.911	6.3982
545	271.85	549.82	11.426	393.39	13.690	6.3083	595	321.85	602.01	15.723	431.23	10.862	6.3999
546		550.86	11.502	394.14	13.625	6.3102	596		603.06	15.820	431.99	10.814	6.4017
547		551.89	11.579	394.89	13.560	6.3121	597		604.11	15.917	432.75	10.766	6.4035
548		552.93	11.656	395.64	13.495	6.3140	598		605.16	16.015	433.52	10.718	6.4052
549		553.97	11.733	396.39	13.431	6.3159	599		606.21	16.113	434.28	10.670	6.4070

APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ
600	326.85	607.26	16.212	435.04	10.623	6.4087	650	376.85	660.09	21.766	473.52	8.5718	6.4933
601		608.31	16.311	435.81	10.576	6.4105	651		661.15	21.890	474.29	8.5363	6.4949
602		609.36	16.410	436.57	10.530	6.4122	652		662.21	22.015	475.07	8.5009	6.4966
603		610.41	16.510	437.33	10.483	6.4140	653		663.28	22.140	475.84	8.4658	6.4982
604		611.47	16.611	438.10	10.437	6.4157	654		664.34	22.266	476.62	8.4308	6.4998
605	331.85	612.52	16.712	438.86	10.391	6.4175	655	381.85	665.40	22.392	477.40	8.3960	6.5014
606		613.57	16.813	439.63	10.345	6.4192	656		666.47	22.519	478.17	8.3614	6.5031
607		614.62	16.915	440.39	10.300	6.4209	657		667.53	22.647	478.95	8.3270	6.5047
608		615.67	17.018	441.16	10.255	6.4227	658		668.59	22.775	479.73	8.2928	6.5063
609		616.73	17.121	441.92	10.210	6.4244	659		669.66	22.903	480.51	8.2588	6.5079
610	336.85	617.78	17.224	442.69	10.165	6.4261	660	386.85	670.72	23.033	481.28	8.2249	6.5095
611		618.83	17.328	443.46	10.121	6.4278	661		671.79	23.162	482.06	8.1912	6.5111
612		619.89	17.432	444.22	10.077	6.4296	662		672.85	23.293	482.84	8.1577	6.5128
613		620.94	17.537	444.99	10.033	6.4313	663		673.92	23.423	483.62	8.1244	6.5144
614		621.99	17.642	445.76	9.990	6.4330	664		674.98	23.555	484.40	8.0913	6.5160
615	341.85	623.05	17.748	446.52	9.946	6.4347	665	391.85	676.05	23.687	485.17	8.0583	6.5176
616		624.10	17.854	447.29	9.903	6.4364	666		677.12	23.820	485.95	8.0255	6.5192
617		625.16	17.961	448.06	9.860	6.4381	667		678.18	23.953	486.73	7.9928	6.5208
618		626.21	18.068	448.83	9.818	6.4398	668		679.25	24.086	487.51	7.9604	6.5224
619		627.27	18.176	449.59	9.775	6.4416	669		680.32	24.221	488.29	7.9281	6.5240
620	346.85	628.32	18.284	450.36	9.733	6.4433	670	396.85	681.38	24.356	489.07	7.8960	6.5256
621		629.38	18.393	451.13	9.691	6.4450	671		682.45	24.491	489.85	7.8640	6.5272
622		630.43	18.502	451.90	9.650	6.4467	672		683.52	24.627	490.63	7.8322	6.5287
623		631.49	18.611	452.67	9.608	6.4484	673		684.59	24.764	491.41	7.8006	6.5303
624		632.54	18.722	453.44	9.567	6.4500	674		685.65	24.901	492.20	7.7692	6.5319
625	351.85	633.60	18.832	454.21	9.526	6.4517	675	401.85	686.72	25.039	492.98	7.7379	6.5335
626		634.66	18.943	454.98	9.485	6.4534	676		687.79	25.177	493.76	7.7068	6.5351
627		635.71	19.055	455.75	9.445	6.4551	677		688.86	25.316	494.54	7.6758	6.5367
628		636.77	19.167	456.52	9.404	6.4568	678		689.93	25.456	495.32	7.6450	6.5382
629		637.83	19.280	457.29	9.364	6.4585	679		691.00	25.596	496.10	7.6143	6.5398
630	356.85	638.89	19.393	458.06	9.324	6.4602	680	406.85	692.07	25.736	496.89	7.5839	6.5414
631		639.94	19.507	458.83	9.285	6.4618	681		693.14	25.878	497.67	7.5535	6.5430
632		641.00	19.621	459.60	9.245	6.4635	682		694.21	26.020	498.45	7.5233	6.5445
633		642.06	19.736	460.37	9.206	6.4652	683		695.28	26.162	499.24	7.4933	6.5461
634		643.12	19.851	461.14	9.167	6.4669	684		696.35	26.305	500.02	7.4635	6.5477
635	361.85	644.18	19.967	461.91	9.129	6.4685	685	411.85	697.42	26.449	500.80	7.4337	6.5492
636		645.24	20.083	462.68	9.090	6.4702	686		698.49	26.594	501.59	7.4042	6.5508
637		646.30	20.200	463.46	9.052	6.4719	687		699.56	26.739	502.37	7.3748	6.5524
638		647.35	20.317	464.23	9.013	6.4735	688		700.63	26.884	503.16	7.3455	6.5539
639		648.41	20.435	465.00	8.976	6.4752	689		701.71	27.030	503.94	7.3164	6.5555
640	366.85	649.47	20.553	465.77	8.938	6.4768	690	416.85	702.78	27.177	504.73	7.2875	6.5570
641		650.53	20.672	466.55	8.900	6.4785	691		703.85	27.324	505.51	7.2586	6.5586
642		651.60	20.791	467.32	8.863	6.4801	692		704.92	27.473	506.30	7.2300	6.5601
643		652.66	20.911	468.09	8.826	6.4818	693		705.99	27.621	507.08	7.2015	6.5617
644		653.72	21.032	468.87	8.789	6.4834	694		707.07	27.770	507.87	7.1731	6.5632
645	371.85	654.78	21.153	469.64	8.752	6.4851	695	421.85	708.14	27.920	508.65	7.1448	6.5648
646		655.84	21.274	470.42	8.716	6.4867	696		709.21	28.071	509.44	7.1168	6.5663
647		656.90	21.396	471.19	8.680	6.4884	697		710.29	28.222	510.23	7.0888	6.5679
648		657.96	21.519	471.97	8.643	6.4900	698		711.36	28.374	511.01	7.0610	6.5694
649		659.02	21.642	472.74	8.608	6.4917	699		712.44	28.526	511.80	7.0333	6.5709

APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	p <sub>s</sub>	v	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	p <sub>s</sub>	v	v <sub>r</sub>	φ
700	426.85	713.51	28.679	512.59	7.0058	6.5725	750	476.85	767.53	37.184	552.26	5.7894	6.6470
701		714.58	28.833	513.38	6.9784	6.5740	751		768.62	37.372	553.06	5.7680	6.6485
702		715.66	28.987	514.16	6.9512	6.5755	752		769.71	37.561	553.86	5.7467	6.6499
703		716.73	29.142	514.95	6.9241	6.5771	753		770.79	37.750	554.66	5.7254	6.6513
704		717.81	29.298	515.74	6.8971	6.5786	754		771.88	37.940	555.46	5.7043	6.6528
705	431.85	718.89	29.454	516.53	6.8702	6.5801	755	481.85	772.97	38.131	556.26	5.6832	6.6542
706		719.96	29.611	517.32	6.8435	6.5816	756		774.06	38.323	557.06	5.6623	6.6557
707		721.04	29.769	518.11	6.8170	6.5832	757		775.15	38.516	557.86	5.6414	6.6571
708		722.11	29.927	518.90	6.7905	6.5847	758		776.23	38.709	558.66	5.6207	6.6585
709		723.19	30.086	519.68	6.7642	6.5862	759		777.32	38.903	559.47	5.6000	6.6600
710	436.85	724.27	30.245	520.47	6.7380	6.5877	760	486.85	778.41	39.098	560.27	5.5795	6.6614
711		725.34	30.405	521.26	6.7120	6.5892	761		779.50	39.293	561.07	5.5590	6.6628
712		726.42	30.566	522.05	6.6861	6.5908	762		780.59	39.489	561.87	5.5386	6.6643
713		727.50	30.728	522.85	6.6603	6.5923	763		781.68	39.687	562.67	5.5184	6.6657
714		728.58	30.890	523.64	6.6346	6.5938	764		782.77	39.884	563.48	5.4982	6.6671
715	441.85	729.65	31.052	524.43	6.6091	6.5953	765	491.85	783.86	40.083	564.28	5.4781	6.6686
716		730.73	31.216	525.22	6.5836	6.5968	766		784.95	40.282	565.08	5.4581	6.6700
717		731.81	31.380	526.01	6.5584	6.5983	767		786.04	40.482	565.89	5.4382	6.6714
718		732.89	31.545	526.80	6.5332	6.5998	768		787.13	40.683	566.69	5.4184	6.6728
719		733.97	31.710	527.59	6.5082	6.6013	769		788.22	40.885	567.49	5.3987	6.6742
720	446.85	735.05	31.876	528.39	6.4832	6.6028	770	496.85	789.31	41.088	568.30	5.3791	6.6757
721		736.13	32.043	529.18	6.4584	6.6043	771		790.40	41.291	569.10	5.3596	6.6771
722		737.21	32.211	529.97	6.4338	6.6058	772		791.49	41.495	569.91	5.3401	6.6785
723		738.29	32.379	530.76	6.4092	6.6073	773		792.59	41.700	570.71	5.3208	6.6799
724		739.37	32.548	531.56	6.3848	6.6088	774		793.68	41.905	571.52	5.3015	6.6813
725	451.85	740.45	32.717	532.35	6.3605	6.6103	775	501.85	794.77	42.112	572.32	5.2824	6.6827
726		741.53	32.888	533.14	6.3363	6.6118	776		795.86	42.319	573.13	5.2633	6.6841
727		742.61	33.058	533.94	6.3122	6.6133	777		796.95	42.527	573.93	5.2443	6.6855
728		743.69	33.230	534.73	6.2883	6.6147	778		798.05	42.736	574.74	5.2254	6.6869
729		744.77	33.402	535.53	6.2644	6.6162	779		799.14	42.945	575.54	5.2066	6.6884
730	456.85	745.85	33.575	536.32	6.2407	6.6177	780	506.85	800.23	43.156	576.35	5.1878	6.6898
731		746.93	33.749	537.11	6.2171	6.6192	781		801.33	43.367	577.16	5.1692	6.6912
732		748.02	33.923	537.91	6.1936	6.6207	782		802.42	43.579	577.96	5.1506	6.6926
733		749.10	34.098	538.70	6.1702	6.6221	783		803.52	43.792	578.77	5.1322	6.6940
734		750.18	34.274	539.50	6.1469	6.6236	784		804.61	44.005	579.58	5.1138	6.6954
735	461.85	751.26	34.451	540.30	6.1238	6.6251	785	511.85	805.71	44.220	580.39	5.0955	6.6967
736		752.35	34.628	541.09	6.1007	6.6266	786		806.80	44.435	581.19	5.0772	6.6981
737		753.43	34.806	541.89	6.0778	6.6280	787		807.90	44.651	582.00	5.0591	6.6995
738		754.51	34.984	542.68	6.0550	6.6295	788		808.99	44.868	582.81	5.0410	6.7009
739		755.60	35.164	543.48	6.0323	6.6310	789		810.09	45.086	583.62	5.0231	6.7023
740	466.85	756.68	35.344	544.28	6.0097	6.6324	790	516.85	811.18	45.304	584.43	5.0052	6.7037
741		757.77	35.524	545.08	5.9872	6.6339	791		812.28	45.523	585.24	4.9874	6.7051
742		758.85	35.706	545.87	5.9648	6.6354	792		813.37	45.744	586.05	4.9696	6.7065
743		759.93	35.888	546.67	5.9425	6.6368	793		814.47	45.965	586.85	4.9520	6.7079
744		761.02	36.071	547.47	5.9203	6.6383	794		815.57	46.187	587.66	4.9344	6.7092
745	471.85	762.10	36.255	548.27	5.8982	6.6397	795	521.85	816.66	46.409	588.47	4.9169	6.7106
746		763.19	36.439	549.06	5.8763	6.6412	796		817.76	46.633	589.28	4.8995	6.7120
747		764.28	36.624	549.86	5.8544	6.6427	797		818.86	46.857	590.09	4.8822	6.7134
748		765.36	36.810	550.66	5.8327	6.6441	798		819.96	47.082	590.91	4.8649	6.7148
749		766.45	36.996	551.46	5.8110	6.6456	799		821.05	47.308	591.72	4.8477	6.7161

APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	l	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ	T	l	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ
800	526.85	822.15	47.535	592.53	4.8306	6.7175	850	576.85	877.35	60.017	633.37	4.0652	6.7844
801		823.25	47.763	593.34	4.8136	6.7189	851		878.46	60.290	634.19	4.0515	6.7857
802		824.35	47.992	594.15	4.7966	6.7202	852		879.57	60.564	635.02	4.0379	6.7870
803		825.45	48.221	594.96	4.7798	6.7216	853		880.68	60.840	635.84	4.0243	6.7883
804		826.55	48.452	595.77	4.7630	6.7230	854		881.79	61.116	636.66	4.0108	6.7896
805	531.85	827.65	48.683	596.59	4.7462	6.7243	855	581.85	882.90	61.394	637.49	3.9974	6.7909
806		828.75	48.915	597.40	4.7296	6.7257	856		884.01	61.672	638.31	3.9840	6.7922
807		829.85	49.148	598.21	4.7130	6.7271	857		885.12	61.951	639.13	3.9706	6.7935
808		830.95	49.382	599.02	4.6965	6.7284	858		886.23	62.232	639.96	3.9574	6.7948
809		832.05	49.616	599.84	4.6801	6.7298	859		887.34	62.513	640.78	3.9441	6.7961
810	536.85	833.15	49.852	600.65	4.6637	6.7312	860	586.85	888.45	62.795	641.61	3.9310	6.7974
811		834.25	50.088	601.46	4.6475	6.7325	861		889.57	63.078	642.43	3.9179	6.7987
812		835.35	50.325	602.28	4.6312	6.7339	862		890.68	63.363	643.26	3.9048	6.8000
813		836.45	50.564	603.09	4.6151	6.7352	863		891.79	63.648	644.08	3.8918	6.8013
814		837.55	50.803	603.91	4.5990	6.7366	864		892.90	63.934	644.91	3.8789	6.8026
815	541.85	838.65	51.043	604.72	4.5831	6.7379	865	591.85	894.02	64.222	645.73	3.8660	6.8039
816		839.75	51.283	605.54	4.5671	6.7393	866		895.13	64.510	646.56	3.8532	6.8051
817		840.85	51.525	606.35	4.5513	6.7406	867		896.24	64.800	647.39	3.8404	6.8064
818		841.96	51.768	607.17	4.5355	6.7420	868		897.36	65.090	648.21	3.8277	6.8077
819		843.06	52.011	607.98	4.5198	6.7433	869		898.47	65.381	649.04	3.8150	6.8090
820	546.85	844.16	52.256	608.80	4.5041	6.7447	870	596.85	899.58	65.674	649.87	3.8024	6.8103
821		845.26	52.501	609.61	4.4886	6.7460	871		900.70	65.967	650.69	3.7898	6.8116
822		846.37	52.747	610.43	4.4730	6.7474	872		901.81	66.262	651.52	3.7773	6.8128
823		847.47	52.994	611.24	4.4576	6.7487	873		902.93	66.557	652.35	3.7649	6.8141
824		848.58	53.242	612.06	4.4422	6.7500	874		904.04	66.854	653.17	3.7524	6.8154
825	551.85	849.68	53.491	612.88	4.4269	6.7514	875	601.85	905.15	67.152	654.00	3.7401	6.8167
826		850.78	53.741	613.70	4.4117	6.7527	876		906.27	67.450	654.83	3.7278	6.8179
827		851.89	53.992	614.51	4.3965	6.7541	877		907.39	67.750	655.66	3.7155	6.8192
828		852.99	54.243	615.33	4.3814	6.7554	878		908.50	68.051	656.49	3.7033	6.8205
829		854.10	54.496	616.15	4.3664	6.7567	879		909.62	68.352	657.32	3.6912	6.8218
830	556.85	855.20	54.749	616.97	4.3514	6.7581	880	606.85	910.73	68.655	658.15	3.6791	6.8230
831		856.31	55.004	617.78	4.3365	6.7594	881		911.85	68.959	658.97	3.6670	6.8243
832		857.41	55.259	618.60	4.3216	6.7607	882		912.97	69.264	659.80	3.6550	6.8256
833		858.52	55.515	619.42	4.3069	6.7620	883		914.08	69.570	660.63	3.6431	6.8268
834		859.62	55.773	620.24	4.2921	6.7634	884		915.20	69.877	661.46	3.6312	6.8281
835	561.85	860.73	56.031	621.06	4.2775	6.7647	885	611.85	916.32	70.185	662.29	3.6193	6.8293
836		861.84	56.290	621.88	4.2629	6.7660	886		917.43	70.495	663.12	3.6075	6.8306
837		862.94	56.550	622.70	4.2484	6.7673	887		918.55	70.805	663.95	3.5958	6.8319
838		864.05	56.811	623.52	4.2339	6.7687	888		919.67	71.116	664.78	3.5841	6.8331
839		865.16	57.073	624.34	4.2195	6.7700	889		920.79	71.429	665.62	3.5724	6.8344
840	566.85	866.26	57.336	625.16	4.2052	6.7713	890	616.85	921.90	71.742	666.45	3.5608	6.8356
841		867.37	57.599	625.98	4.1909	6.7726	891		923.02	72.057	667.28	3.5492	6.8369
842		868.48	57.864	626.80	4.1767	6.7739	892		924.14	72.372	668.11	3.5377	6.8382
843		869.59	58.130	627.62	4.1625	6.7753	893		925.26	72.689	668.94	3.5262	6.8394
844		870.69	58.396	628.44	4.1484	6.7766	894		926.38	73.007	669.77	3.5148	6.8407
845	571.85	871.80	58.664	629.26	4.1344	6.7779	895	621.85	927.50	73.326	670.61	3.5034	6.8419
846		872.91	58.933	630.08	4.1204	6.7792	896		928.62	73.646	671.44	3.4921	6.8432
847		874.02	59.202	630.90	4.1065	6.7805	897		929.74	73.967	672.27	3.4808	6.8444
848		875.13	59.473	631.73	4.0927	6.7818	898		930.86	74.289	673.10	3.4696	6.8457
849		876.24	59.744	632.55	4.0789	6.7831	899		931.98	74.613	673.94	3.4584	6.8469

APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	p <sub>r</sub>	v	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	p <sub>r</sub>	v	v <sub>r</sub>	φ
900	626.85	933.10	74.937	674.77	3.4473	6.8482	950	676.85	989.38	92.63	716.70	2.9436	6.9090
901		934.22	75.263	675.60	3.4362	6.8494	951		990.51	93.02	717.54	2.9345	6.9102
902		935.34	75.589	676.44	3.4251	6.8506	952		991.64	93.41	718.39	2.9255	6.9114
903		936.46	75.917	677.27	3.4141	6.8519	953		992.77	93.79	719.23	2.9164	6.9126
904		937.58	76.246	678.11	3.4031	6.8531	954		993.90	94.18	720.07	2.9074	6.9138
905	631.85	938.70	76.576	678.94	3.3922	6.8544	955	681.85	995.03	94.57	720.92	2.8985	6.9149
906		939.82	76.907	679.77	3.3813	6.8556	956		996.17	94.96	721.76	2.8896	6.9161
907		940.95	77.240	680.61	3.3705	6.8568	957		997.30	95.35	722.61	2.8807	6.9173
908		942.07	77.573	681.44	3.3597	6.8581	958		998.43	95.75	723.45	2.8719	6.9185
909		943.19	77.908	682.28	3.3490	6.8593	959		999.56	96.14	724.30	2.8631	6.9197
910	636.85	944.31	78.243	683.11	3.3383	6.8605	960	686.85	1000.69	96.54	725.14	2.8543	6.9209
911		945.44	78.580	683.95	3.3276	6.8618	961		1001.83	96.94	725.99	2.8455	6.9220
912		946.56	78.918	684.79	3.3170	6.8630	962		1002.96	97.34	726.84	2.8368	6.9232
913		947.68	79.257	685.62	3.3064	6.8642	963		1004.09	97.74	727.68	2.8281	6.9244
914		948.80	79.597	686.46	3.2959	6.8655	964		1005.23	98.14	728.53	2.8195	6.9256
915	641.85	949.93	79.939	687.29	3.2854	6.8667	965	691.85	1006.36	98.54	729.38	2.8109	6.9267
916		951.05	80.281	688.13	3.2750	6.8679	966		1007.49	98.94	730.22	2.8023	6.9279
917		952.18	80.625	688.97	3.2646	6.8692	967		1008.63	99.35	731.07	2.7938	6.9291
918		953.30	80.970	689.80	3.2542	6.8704	968		1009.76	99.76	731.92	2.7853	6.9303
919		954.42	81.316	690.64	3.2439	6.8716	969		1010.90	100.16	732.76	2.7768	6.9314
920	646.85	955.55	81.663	691.48	3.2336	6.8728	970	696.85	1012.03	100.57	733.61	2.7683	6.9326
921		956.67	82.012	692.32	3.2234	6.8740	971		1013.17	100.98	734.46	2.7599	6.9338
922		957.80	82.361	693.15	3.2132	6.8753	972		1014.30	101.40	735.31	2.7516	6.9349
923		958.92	82.712	693.99	3.2031	6.8765	973		1015.44	101.81	736.16	2.7432	6.9361
924		960.05	83.064	694.83	3.1929	6.8777	974		1016.57	102.22	737.00	2.7349	6.9373
925	651.85	961.17	83.417	695.67	3.1829	6.8789	975	701.85	1017.71	102.64	737.85	2.7266	6.9384
926		962.30	83.771	696.51	3.1728	6.8801	976		1018.84	103.06	738.70	2.7184	6.9396
927		963.43	84.126	697.35	3.1628	6.8814	977		1019.98	103.47	739.55	2.7101	6.9408
928		964.55	84.483	698.19	3.1529	6.8826	978		1021.12	103.89	740.40	2.7019	6.9419
929		965.68	84.841	699.03	3.1430	6.8838	979		1022.25	104.32	741.25	2.6938	6.9431
930	656.85	966.80	85.200	699.87	3.1331	6.8850	980	706.85	1023.39	104.74	742.10	2.6857	6.9443
931		967.93	85.560	700.70	3.1233	6.8862	981		1024.52	105.16	742.95	2.6776	6.9454
932		969.06	85.921	701.54	3.1135	6.8874	982		1025.66	105.59	743.80	2.6695	6.9466
933		970.18	86.284	702.38	3.1037	6.8886	983		1026.80	106.01	744.65	2.6615	6.9477
934		971.31	86.648	703.23	3.0940	6.8898	984		1027.94	106.44	745.50	2.6535	6.9489
935	661.85	972.44	87.013	704.07	3.0843	6.8910	985	711.85	1029.07	106.87	746.35	2.6455	6.9500
936		973.57	87.379	704.91	3.0747	6.8922	986		1030.21	107.30	747.20	2.6375	6.9512
937		974.70	87.746	705.75	3.0651	6.8934	987		1031.35	107.73	748.05	2.6296	6.9523
938		975.82	88.115	706.59	3.0555	6.8946	988		1032.49	108.17	748.90	2.6217	6.9535
939		976.95	88.485	707.43	3.0460	6.8959	989		1033.63	108.60	749.75	2.6139	6.9547
940	666.85	978.08	88.856	708.27	3.0365	6.8971	990	716.85	1034.76	109.04	750.60	2.6061	6.9558
941		979.21	89.228	709.11	3.0270	6.8983	991		1035.90	109.48	751.45	2.5983	6.9570
942		980.34	89.602	709.96	3.0176	6.8995	992		1037.04	109.91	752.31	2.5905	6.9581
943		981.47	89.977	710.80	3.0082	6.9006	993		1038.18	110.36	753.16	2.5828	6.9592
944		982.60	90.353	711.64	2.9989	6.9018	994		1039.32	110.80	754.01	2.5751	6.9604
945	671.85	983.73	90.730	712.48	2.9896	6.9030	995	721.85	1040.46	111.24	754.86	2.5674	6.9615
946		984.86	91.108	713.33	2.9803	6.9042	996		1041.60	111.68	755.72	2.5597	6.9627
947		985.99	91.488	714.17	2.9711	6.9054	997		1042.74	112.13	756.57	2.5521	6.9638
948		987.12	91.869	715.01	2.9619	6.9066	998		1043.88	112.58	757.42	2.5445	6.9650
949		988.25	92.251	715.85	2.9527	6.9078	999		1045.02	113.03	758.27	2.5370	6.9661

APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	l	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ	T	l	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ
1000	726.85	1046.16	113.48	759.13	2.5294	6.9673	1050	776.85	1103.41	137.86	802.03	2.1862	7.0231
1001		1047.30	113.93	759.98	2.5219	6.9684	1051		1104.56	138.39	802.89	2.1799	7.0242
1002		1048.44	114.38	760.83	2.5144	6.9695	1052		1105.71	138.91	803.76	2.1737	7.0253
1003		1049.58	114.84	761.69	2.5070	6.9707	1053		1106.86	139.44	804.62	2.1675	7.0264
1004		1050.72	115.29	762.54	2.4996	6.9718	1054		1108.01	139.98	805.48	2.1613	7.0275
1005	731.85	1051.86	115.75	763.40	2.4922	6.9729	1055	781.85	1109.16	140.51	806.34	2.1552	7.0286
1006		1053.00	116.21	764.25	2.4848	6.9741	1056		1110.31	141.04	807.21	2.1490	7.0297
1007		1054.15	116.67	765.11	2.4775	6.9752	1057		1111.46	141.58	808.07	2.1429	7.0308
1008		1055.29	117.13	765.96	2.4702	6.9763	1058		1112.62	142.12	808.94	2.1368	7.0319
1009		1056.43	117.59	766.82	2.4629	6.9775	1059		1113.77	142.66	809.80	2.1308	7.0329
1010	736.85	1057.57	118.06	767.67	2.4556	6.9786	1060	786.85	1114.92	143.20	810.66	2.1247	7.0340
1011		1058.72	118.52	768.53	2.4484	6.9797	1061		1116.07	143.74	811.53	2.1187	7.0351
1012		1059.86	118.99	769.38	2.4412	6.9809	1062		1117.22	144.28	812.39	2.1127	7.0362
1013		1061.00	119.46	770.24	2.4340	6.9820	1063		1118.37	144.83	813.26	2.1067	7.0373
1014		1062.14	119.93	771.09	2.4268	6.9831	1064		1119.52	145.38	814.12	2.1007	7.0384
1015	741.85	1063.29	120.40	771.95	2.4197	6.9843	1065	791.85	1120.68	145.93	814.99	2.0948	7.0394
1016		1064.43	120.87	772.81	2.4126	6.9854	1066		1121.83	146.48	815.85	2.0889	7.0405
1017		1065.57	121.35	773.66	2.4056	6.9865	1067		1122.98	147.03	816.72	2.0830	7.0416
1018		1066.72	121.82	774.52	2.3985	6.9876	1068		1124.13	147.59	817.58	2.0771	7.0427
1019		1067.86	122.30	775.38	2.3915	6.9888	1069		1125.29	148.14	818.45	2.0712	7.0438
1020	746.85	1069.01	122.78	776.23	2.3845	6.9899	1070	796.85	1126.44	148.70	819.32	2.0654	7.0448
1021		1070.15	123.26	777.09	2.3775	6.9910	1071		1127.59	149.26	820.18	2.0596	7.0459
1022		1071.29	123.74	777.95	2.3706	6.9921	1072		1128.75	149.82	821.05	2.0538	7.0470
1023		1072.44	124.23	778.81	2.3637	6.9932	1073		1129.90	150.38	821.92	2.0480	7.0481
1024		1073.58	124.71	779.66	2.3568	6.9944	1074		1131.05	150.94	822.78	2.0423	7.0491
1025	751.85	1074.73	125.20	780.52	2.3499	6.9955	1075	801.85	1132.21	151.51	823.65	2.0365	7.0502
1026		1075.87	125.69	781.38	2.3431	6.9966	1076		1133.36	152.08	824.52	2.0308	7.0513
1027		1077.02	126.18	782.24	2.3363	6.9977	1077		1134.52	152.65	825.38	2.0251	7.0524
1028		1078.16	126.67	783.10	2.3295	6.9988	1078		1135.67	153.22	826.25	2.0195	7.0534
1029		1079.31	127.16	783.96	2.3227	6.9999	1079		1136.83	153.79	827.12	2.0138	7.0545
1030	756.85	1080.46	127.65	784.81	2.3160	7.0010	1080	806.85	1137.98	154.37	827.99	2.0082	7.0556
1031		1081.60	128.15	785.67	2.3092	7.0022	1081		1139.13	154.94	828.85	2.0026	7.0566
1032		1082.75	128.65	786.53	2.3025	7.0033	1082		1140.29	155.52	829.72	1.9970	7.0577
1033		1083.90	129.15	787.39	2.2959	7.0044	1083		1141.45	156.10	830.59	1.9914	7.0588
1034		1085.04	129.65	788.25	2.2892	7.0055	1084		1142.60	156.68	831.46	1.9859	7.0599
1035	761.85	1086.19	130.15	789.11	2.2826	7.0066	1085	811.85	1143.76	157.26	832.33	1.9803	7.0609
1036		1087.34	130.65	789.97	2.2760	7.0077	1086		1144.91	157.85	833.20	1.9748	7.0620
1037		1088.48	131.16	790.83	2.2694	7.0088	1087		1146.07	158.43	834.06	1.9693	7.0630
1038		1089.63	131.66	791.69	2.2629	7.0099	1088		1147.22	159.02	834.93	1.9638	7.0641
1039		1090.78	132.17	792.55	2.2564	7.0110	1089		1148.38	159.61	835.80	1.9584	7.0652
1040	766.85	1091.93	132.68	793.41	2.2499	7.0121	1090	816.85	1149.54	160.20	836.67	1.9529	7.0662
1041		1093.07	133.19	794.27	2.2434	7.0132	1091		1150.69	160.79	837.54	1.9475	7.0673
1042		1094.22	133.70	795.13	2.2370	7.0143	1092		1151.85	161.39	838.41	1.9421	7.0684
1043		1095.37	134.22	796.00	2.2305	7.0154	1093		1153.01	161.99	839.28	1.9368	7.0694
1044		1096.52	134.73	796.86	2.2241	7.0165	1094		1154.16	162.58	840.15	1.9314	7.0705
1045	771.85	1097.67	135.25	797.72	2.2177	7.0176	1095	821.85	1155.32	163.18	841.02	1.9260	7.0715
1046		1098.82	135.77	798.58	2.2114	7.0187	1096		1156.48	163.79	841.89	1.9207	7.0726
1047		1099.96	136.29	799.44	2.2050	7.0198	1097		1157.64	164.39	842.76	1.9154	7.0736
1048		1101.11	136.81	800.30	2.1987	7.0209	1098		1158.79	164.99	843.63	1.9101	7.0747
1049		1102.26	137.33	801.17	2.1924	7.0220	1099		1159.95	165.60	844.51	1.9049	7.0757

APÉNDICE A (continuación)

Table I Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	p	v	$\rho$	$\phi$	T	t	h	p	v	$\rho$	$\phi$
1109	876.85	1161.11	166.21	845.38	1.8996	7.0768	1150	876.85	1219.23	198.99	889.14	1.6588	7.1285
1101		1162.27	166.82	846.25	1.8944	7.0779	1151		1220.39	199.69	890.02	1.6544	7.1295
1102		1163.43	167.43	847.12	1.8892	7.0789	1152		1221.56	200.40	890.90	1.6500	7.1305
1103		1164.59	168.05	847.99	1.8840	7.0800	1153		1222.72	201.11	891.78	1.6456	7.1315
1104		1165.74	168.66	848.86	1.8788	7.0810	1154		1223.89	201.82	892.66	1.6413	7.1325
1105	831.85	1166.90	169.28	849.73	1.8736	7.0821	1155	881.85	1225.06	202.53	893.54	1.6369	7.1335
1106		1168.06	169.90	850.61	1.8685	7.0831	1156		1226.23	203.24	894.42	1.6326	7.1345
1107		1169.22	170.52	851.48	1.8634	7.0842	1157		1227.39	203.96	895.30	1.6282	7.1355
1108		1170.38	171.14	852.35	1.8583	7.0852	1158		1228.56	204.68	896.18	1.6239	7.1366
1109		1171.54	171.77	853.22	1.8532	7.0862	1159		1229.73	205.40	897.06	1.6196	7.1376
1110	836.85	1172.70	172.40	854.10	1.8481	7.0873	1160	886.85	1230.90	206.12	897.94	1.6154	7.1386
1111		1173.86	173.03	854.97	1.8430	7.0883	1161		1232.06	206.84	898.82	1.6111	7.1396
1112		1175.02	173.66	855.84	1.8380	7.0894	1162		1233.23	207.57	899.70	1.6068	7.1406
1113		1176.18	174.29	856.72	1.8330	7.0904	1163		1234.40	208.30	900.58	1.6026	7.1416
1114		1177.34	174.92	857.59	1.8280	7.0915	1164		1235.57	209.03	901.46	1.5984	7.1426
1115	841.85	1178.50	175.56	858.46	1.8230	7.0925	1165	891.85	1236.74	209.76	902.35	1.5942	7.1436
1116		1179.66	176.19	859.34	1.8180	7.0935	1166		1237.91	210.49	903.23	1.5900	7.1446
1117		1180.82	176.83	860.21	1.8131	7.0946	1167		1239.07	211.23	904.11	1.5858	7.1456
1118		1181.99	177.48	861.08	1.8081	7.0956	1168		1240.24	211.97	904.99	1.5816	7.1466
1119		1183.15	178.12	861.96	1.8032	7.0967	1169		1241.41	212.71	905.87	1.5775	7.1476
1120	846.85	1184.31	178.76	862.83	1.7983	7.0977	1170	896.85	1242.58	213.45	906.76	1.5733	7.1486
1121		1185.47	179.41	863.71	1.7934	7.0987	1171		1243.75	214.19	907.64	1.5692	7.1496
1122		1186.63	180.06	864.58	1.7886	7.0998	1172		1244.92	214.94	908.52	1.5651	7.1506
1123		1187.79	180.71	865.46	1.7837	7.1008	1173		1246.09	215.69	909.40	1.5610	7.1516
1124		1188.96	181.36	866.33	1.7789	7.1018	1174		1247.26	216.44	910.29	1.5569	7.1526
1125	851.85	1190.12	182.02	867.21	1.7741	7.1029	1175	901.85	1248.43	217.19	911.17	1.5528	7.1536
1126		1191.28	182.67	868.08	1.7693	7.1039	1176		1249.60	217.95	912.05	1.5488	7.1546
1127		1192.44	183.33	868.96	1.7645	7.1049	1177		1250.77	218.70	912.94	1.5447	7.1556
1128		1193.61	183.99	869.83	1.7597	7.1060	1178		1251.94	219.46	913.82	1.5407	7.1566
1129		1194.77	184.65	870.71	1.7550	7.1070	1179		1253.11	220.22	914.70	1.5367	7.1576
1130	856.85	1195.93	185.32	871.59	1.7502	7.1080	1180	906.85	1254.28	220.99	915.59	1.5327	7.1586
1131		1197.09	185.98	872.46	1.7455	7.1091	1181		1255.45	221.75	916.47	1.5287	7.1596
1132		1198.26	186.65	873.34	1.7408	7.1101	1182		1256.63	222.52	917.35	1.5247	7.1606
1133		1199.42	187.32	874.21	1.7361	7.1111	1183		1257.80	223.29	918.24	1.5207	7.1616
1134		1200.58	187.99	875.09	1.7315	7.1121	1184		1258.97	224.06	919.12	1.5168	7.1625
1135	861.85	1201.75	188.66	875.97	1.7268	7.1132	1185	911.85	1260.14	224.83	920.01	1.5128	7.1635
1136		1202.91	189.34	876.85	1.7222	7.1142	1186		1261.31	225.61	920.89	1.5089	7.1645
1137		1204.08	190.01	877.72	1.7175	7.1152	1187		1262.48	226.38	921.78	1.5050	7.1655
1138		1205.24	190.69	878.60	1.7129	7.1162	1188		1263.65	227.16	922.66	1.5011	7.1665
1139		1206.41	191.37	879.48	1.7083	7.1173	1189		1264.83	227.95	923.55	1.4972	7.1675
1140	866.85	1207.57	192.06	880.35	1.7038	7.1183	1190	916.85	1266.00	228.73	924.43	1.4933	7.1684
1141		1208.74	192.74	881.23	1.6992	7.1193	1191		1267.17	229.52	925.32	1.4895	7.1694
1142		1209.90	193.43	882.11	1.6946	7.1203	1192		1268.34	230.30	926.20	1.4856	7.1704
1143		1211.07	194.12	882.99	1.6901	7.1213	1193		1269.52	231.09	927.09	1.4818	7.1714
1144		1212.23	194.81	883.87	1.6856	7.1224	1194		1270.69	231.89	927.97	1.4779	7.1724
1145	871.85	1213.40	195.50	884.75	1.6811	7.1234	1195	921.85	1271.86	232.68	928.86	1.4741	7.1734
1146		1214.56	196.19	885.62	1.6766	7.1244	1196		1273.04	233.48	929.75	1.4703	7.1743
1147		1215.73	196.89	886.50	1.6721	7.1254	1197		1274.21	234.28	930.63	1.4665	7.1753
1148		1216.89	197.59	887.38	1.6677	7.1264	1198		1275.38	235.08	931.52	1.4628	7.1763
1149		1218.06	198.29	888.26	1.6632	7.1275	1199		1276.56	235.88	932.41	1.4590	7.1773

APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	p	u	v <sub>r</sub>	φ	T	t	h	p	u	v <sub>r</sub>	φ
1200	926.85	1277.73	236.69	933.29	1.4552	7.1783	1250	976.85	1336.60	279.83	977.81	1.2822	7.2263
1201		1278.90	237.50	934.18	1.4515	7.1792	1251		1337.78	280.76	978.71	1.2790	7.2273
1202		1280.08	238.31	935.07	1.4478	7.1802	1252		1338.96	281.68	979.60	1.2758	7.2282
1203		1281.25	239.12	935.95	1.4441	7.1812	1253		1340.14	282.61	980.49	1.2726	7.2292
1204		1282.43	239.93	936.84	1.4403	7.1822	1254		1341.33	283.54	981.39	1.2695	7.2301
1205	931.85	1283.60	240.75	937.73	1.4367	7.1831	1255	981.85	1342.51	284.47	982.28	1.2663	7.2310
1206		1284.78	241.57	938.62	1.4330	7.1841	1256		1343.69	285.40	983.18	1.2632	7.2320
1207		1285.95	242.39	939.50	1.4293	7.1851	1257		1344.87	286.34	984.07	1.2600	7.2329
1208		1287.13	243.21	940.39	1.4256	7.1861	1258		1346.05	287.28	984.97	1.2569	7.2339
1209		1288.30	244.04	941.28	1.4220	7.1870	1259		1347.23	288.22	985.86	1.2538	7.2348
1210	936.85	1289.48	244.86	942.17	1.4184	7.1880	1260	986.85	1348.42	289.16	986.76	1.2507	7.2357
1211		1290.65	245.69	943.06	1.4147	7.1890	1261		1349.60	290.11	987.65	1.2476	7.2367
1212		1291.83	246.53	943.95	1.4111	7.1900	1262		1350.78	291.06	988.55	1.2445	7.2376
1213		1293.00	247.36	944.83	1.4075	7.1909	1263		1351.96	292.01	989.44	1.2415	7.2386
1214		1294.18	248.20	945.72	1.4040	7.1919	1264		1353.15	292.97	990.34	1.2384	7.2395
1215	941.85	1295.35	249.04	946.61	1.4004	7.1929	1265	991.85	1354.33	293.92	991.24	1.2353	7.2404
1216		1296.53	249.88	947.50	1.3968	7.1938	1266		1355.51	294.88	992.13	1.2323	7.2414
1217		1297.71	250.72	948.39	1.3933	7.1948	1267		1356.70	295.84	993.03	1.2293	7.2423
1218		1298.88	251.56	949.28	1.3897	7.1958	1268		1357.88	296.81	993.92	1.2262	7.2432
1219		1300.06	252.41	950.17	1.3862	7.1967	1269		1359.06	297.77	994.82	1.2232	7.2442
1220	946.85	1301.24	253.26	951.06	1.3827	7.1977	1270	996.85	1360.25	298.74	995.72	1.2202	7.2451
1221		1302.41	254.11	951.95	1.3792	7.1987	1271		1361.43	299.71	996.61	1.2172	7.2460
1222		1303.59	254.97	952.84	1.3757	7.1996	1272		1362.61	300.69	997.51	1.2142	7.2470
1223		1304.77	255.83	953.73	1.3722	7.2006	1273		1363.80	301.66	998.41	1.2113	7.2479
1224		1305.94	256.68	954.62	1.3687	7.2015	1274		1364.98	302.64	999.30	1.2083	7.2488
1225	951.85	1307.12	257.55	955.51	1.3652	7.2025	1275	1001.85	1366.17	303.62	1000.20	1.2053	7.2497
1226		1308.30	258.41	956.40	1.3618	7.2035	1276		1367.35	304.61	1001.10	1.2024	7.2507
1227		1309.48	259.28	957.29	1.3584	7.2044	1277		1368.54	305.59	1002.00	1.1994	7.2516
1228		1310.65	260.14	958.18	1.3549	7.2054	1278		1369.72	306.58	1002.89	1.1965	7.2525
1229		1311.83	261.01	959.07	1.3515	7.2063	1279		1370.90	307.57	1003.79	1.1936	7.2535
1230	956.85	1313.01	261.89	959.96	1.3481	7.2073	1280	1006.85	1372.09	308.57	1004.69	1.1907	7.2544
1231		1314.19	262.76	960.85	1.3447	7.2083	1281		1373.27	309.56	1005.59	1.1878	7.2553
1232		1315.37	263.64	961.74	1.3413	7.2092	1282		1374.46	310.56	1006.49	1.1849	7.2562
1233		1316.55	264.52	962.64	1.3379	7.2102	1283		1375.64	311.56	1007.38	1.1820	7.2572
1234		1317.72	265.40	963.53	1.3346	7.2111	1284		1376.83	312.57	1008.28	1.1791	7.2581
1235	961.85	1318.90	266.29	964.42	1.3312	7.2121	1285	1011.85	1378.02	313.57	1009.18	1.1762	7.2590
1236		1320.08	267.17	965.31	1.3279	7.2130	1286		1379.20	314.58	1010.08	1.1734	7.2599
1237		1321.26	268.06	966.20	1.3245	7.2140	1287		1380.39	315.60	1010.98	1.1705	7.2608
1238		1322.44	268.95	967.10	1.3212	7.2149	1288		1381.57	316.61	1011.88	1.1677	7.2618
1239		1323.62	269.85	967.99	1.3179	7.2159	1289		1382.76	317.63	1012.78	1.1648	7.2627
1240	966.85	1324.80	270.74	968.88	1.3146	7.2168	1290	1016.85	1383.95	318.65	1013.68	1.1620	7.2636
1241		1325.98	271.64	969.77	1.3113	7.2178	1291		1385.13	319.67	1014.57	1.1592	7.2645
1242		1327.16	272.54	970.67	1.3080	7.2187	1292		1386.32	320.69	1015.47	1.1564	7.2654
1243		1328.34	273.44	971.56	1.3048	7.2197	1293		1387.50	321.72	1016.37	1.1536	7.2664
1244		1329.52	274.35	972.45	1.3015	7.2206	1294		1388.69	322.75	1017.27	1.1508	7.2673
1245	971.85	1330.70	275.26	973.34	1.2983	7.2216	1295	1021.85	1389.88	323.78	1018.17	1.1480	7.2682
1246		1331.88	276.17	974.24	1.2950	7.2225	1296		1391.07	324.82	1019.07	1.1452	7.2691
1247		1333.06	277.08	975.13	1.2918	7.2235	1297		1392.25	325.86	1019.97	1.1425	7.2700
1248		1334.24	278.00	976.02	1.2886	7.2244	1298		1393.44	326.90	1020.87	1.1397	7.2709
1249		1335.42	278.91	976.92	1.2854	7.2254	1299		1394.63	327.94	1021.77	1.1370	7.2719



APÉNDICE A (continuación)

Table 1 Air at Low Pressures (for One Kilogram)

T	t	h	R	w	v <sub>1</sub>	φ	T	t	h	R	w	v <sub>1</sub>	φ
1300	1026.85	1393.81	328.98	1022.67	1.1342	7.2728	1350	1076.81	1455.35	384.74	1067.86	1.00716	7.3177
1306		1397.06	330.03	1023.57	1.1315	7.2737	1351		1456.54	383.93	1068.76	1.00680	7.3186
1312		1398.19	331.08	1024.47	1.1288	7.2746	1352		1457.74	383.12	1069.67	1.00646	7.3195
1318		1399.38	332.14	1025.38	1.1260	7.2755	1353		1458.93	382.31	1070.58	1.00612	7.3204
1324		1400.57	333.19	1026.28	1.1233	7.2764	1354		1460.12	381.50	1071.48	.99778	7.3212
1330	1031.85	1401.75	334.25	1027.18	1.1206	7.2773	1355	1081.85	1461.32	380.70	1072.39	.99546	7.3221
1336		1402.94	335.31	1028.08	1.1179	7.2782	1356		1462.51	381.90	1073.30	.99314	7.3230
1342		1404.13	336.38	1028.98	1.1153	7.2792	1357		1463.71	383.11	1074.21	.99083	7.3239
1348		1405.32	337.45	1029.88	1.1126	7.2801	1358		1464.90	384.31	1075.11	.98852	7.3248
1354		1406.51	338.52	1030.78	1.1099	7.2810	1359		1466.10	385.52	1076.02	.98622	7.3256
1360	1036.85	1407.70	339.59	1031.69	1.1073	7.2819	1360	1086.85	1467.29	386.74	1076.93	.98393	7.3265
1366		1408.88	340.66	1032.59	1.1046	7.2828	1361		1468.49	387.95	1077.84	.98165	7.3274
1372		1410.07	341.74	1033.49	1.1020	7.2837	1362		1469.68	389.17	1078.75	.97937	7.3283
1378		1411.26	342.82	1034.39	1.0993	7.2846	1363		1470.88	390.39	1079.65	.97710	7.3292
1384		1412.45	343.90	1035.29	1.0967	7.2855	1364		1472.07	391.62	1080.56	.97483	7.3300
1390	1041.85	1413.64	344.99	1036.20	1.0941	7.2864	1365	1091.85	1473.27	392.85	1081.47	.97257	7.3309
1396		1414.83	346.08	1037.10	1.0915	7.2873	1366		1474.46	394.08	1082.38	.97032	7.3318
1402		1416.02	347.17	1038.00	1.0889	7.2882	1367		1475.66	395.31	1083.29	.96808	7.3327
1408		1417.21	348.26	1038.90	1.0863	7.2891	1368		1476.86	396.55	1084.20	.96584	7.3335
1414		1418.40	349.36	1039.81	1.0837	7.2900	1369		1478.05	397.79	1085.11	.96360	7.3344
1420	1046.85	1419.59	350.46	1040.71	1.0811	7.2909	1370	1096.85	1479.25	399.03	1086.01	.96138	7.3353
1426		1420.78	351.56	1041.61	1.0785	7.2918	1371		1480.44	410.28	1086.92	.95916	7.3362
1432		1421.97	352.67	1042.52	1.0760	7.2927	1372		1481.64	411.52	1087.83	.95695	7.3370
1438		1423.16	353.77	1043.42	1.0734	7.2936	1373		1482.84	412.78	1088.74	.95474	7.3379
1444		1424.35	354.88	1044.32	1.0709	7.2945	1374		1484.03	414.03	1089.65	.95254	7.3388
1450	1051.85	1425.54	356.00	1045.23	1.0683	7.2954	1375	1101.85	1485.23	415.29	1090.56	.95035	7.3396
1456		1426.73	357.11	1046.13	1.0658	7.2963	1376		1486.43	416.55	1091.47	.94816	7.3405
1462		1427.92	358.23	1047.03	1.0632	7.2972	1377		1487.62	417.81	1092.38	.94598	7.3414
1468		1429.12	359.35	1047.94	1.0607	7.2981	1378		1488.82	419.08	1093.29	.94380	7.3423
1474		1430.31	360.48	1048.84	1.0582	7.2990	1379		1490.02	420.35	1094.20	.94164	7.3431
1480	1056.85	1431.50	361.61	1049.75	1.0557	7.2999	1380	1106.85	1491.21	421.62	1095.11	.93947	7.3440
1486		1432.69	362.74	1050.65	1.0532	7.3008	1381		1492.41	422.90	1096.02	.93732	7.3449
1492		1433.88	363.87	1051.55	1.0507	7.3017	1382		1493.61	424.18	1096.93	.93517	7.3457
1498		1435.07	365.00	1052.46	1.0482	7.3026	1383		1494.81	425.46	1097.84	.93302	7.3466
1504		1436.26	366.14	1053.36	1.0458	7.3035	1384		1496.00	426.75	1098.75	.93089	7.3475
1510	1061.85	1437.46	367.28	1054.27	1.0433	7.3044	1385	1111.85	1497.20	428.03	1099.66	.92876	7.3483
1516		1438.65	368.43	1055.17	1.0408	7.3053	1386		1498.40	429.32	1100.57	.92663	7.3492
1522		1439.84	369.57	1056.08	1.0384	7.3062	1387		1499.60	430.62	1101.49	.92451	7.3500
1528		1441.03	370.72	1056.98	1.0359	7.3071	1388		1500.80	431.92	1102.40	.92240	7.3509
1534		1442.22	371.88	1057.89	1.0335	7.3079	1389		1501.99	433.22	1103.31	.92029	7.3518
1540	1066.85	1443.42	373.03	1058.79	1.0311	7.3088	1390	1116.85	1503.19	434.52	1104.22	.91819	7.3526
1546		1444.61	374.19	1059.70	1.0287	7.3097	1391		1504.39	435.83	1105.13	.91610	7.3535
1552		1445.80	375.35	1060.61	1.0262	7.3106	1392		1505.59	437.14	1106.04	.91401	7.3544
1558		1446.99	376.51	1061.51	1.0238	7.3115	1393		1506.79	438.45	1106.95	.91193	7.3552
1564		1448.19	377.68	1062.42	1.0214	7.3124	1394		1507.99	439.77	1107.87	.90985	7.3561
1570	1071.85	1449.38	378.85	1063.32	1.0190	7.3133	1395	1121.85	1509.19	441.09	1108.78	.90778	7.3569
1576		1450.57	380.02	1064.23	1.0166	7.3142	1396		1510.39	442.41	1109.69	.90572	7.3578
1582		1451.77	381.20	1065.14	1.0143	7.3151	1397		1511.58	443.73	1110.60	.90366	7.3587
1588		1452.96	382.37	1066.04	1.0119	7.3159	1398		1512.78	445.06	1111.51	.90160	7.3595
1594		1454.15	383.56	1066.95	1.0095	7.3168	1399		1513.98	446.39	1112.43	.89956	7.3604

APÉNDICE A (continuación)

Table 2 Air at Low Pressures

T	t	$\rho_p$	$\rho_c$	$k = \frac{c_p}{c_v}$	a	$\frac{C_{max}}{P_1}$	$\mu \times 10^7$	$\lambda$	Pr =
K	C	$\frac{J}{kg K}$	$\frac{J}{kg K}$		$\frac{m}{s}$	$\frac{kg}{s m^2} / kPa$	$\frac{Ns}{m^2}$	$\frac{W}{m K}$	$\frac{c_p \mu}{\lambda}$
50	-223.15	1001.9	714.8	1.402	141.8	5.7179			
75	-198.15	1001.9	714.9	1.402	173.7	4.6686			
100	-173.15	1001.9	714.9	1.401	200.6	4.0431	70.6	.0092	.767
125	-148.15	1002.0	714.9	1.401	224.2	3.6163	87.6	.0115	.763
150	-123.15	1002.0	715.0	1.401	245.6	3.3012	103.8	.0137	.756
175	-98.15	1002.1	715.0	1.401	265.3	3.0563	119.1	.0159	.749
200	-73.15	1002.2	715.1	1.401	283.6	2.8589	133.6	.0181	.740
225	-48.15	1002.4	715.4	1.401	300.8	2.6953	147.4	.0202	.731
250	-23.15	1002.8	715.8	1.401	317.1	2.5569	160.6	.0223	.724
275	1.85	1003.5	716.5	1.401	332.5	2.4378	173.2	.0242	.717
300	26.85	1004.5	717.5	1.400	347.2	2.3338	185.3	.0261	.712
325	51.85	1006.0	718.9	1.399	361.3	2.2420	196.9	.0279	.709
350	76.85	1007.9	720.8	1.398	374.8	2.1601	208.1	.0297	.706
375	101.85	1010.2	723.2	1.397	387.8	2.0864	219.0	.0314	.705
400	126.85	1013.1	726.1	1.395	400.3	2.0196	229.4	.0330	.703
450	176.85	1020.3	733.2	1.391	423.9	1.9027	249.3	.0363	.700
500	226.85	1029.2	742.1	1.387	446.1	1.8035	268.2	.0395	.699
550	276.85	1039.4	752.4	1.381	467.0	1.7177	286.0	.0426	.698
600	326.85	1050.7	763.6	1.376	486.8	1.6426	303.0	.0456	.698
650	376.85	1062.5	775.4	1.370	505.6	1.5761	319.3	.0484	.701
700	426.85	1074.5	787.4	1.365	523.6	1.5168	334.9	.0513	.701
750	476.85	1086.5	799.4	1.359	540.9	1.4634	349.8	.0541	.702
800	526.85	1098.2	811.2	1.354	557.6	1.4151	364.3	.0569	.703
850	576.85	1109.5	822.5	1.349	573.7	1.3711	378.3	.0597	.703
900	626.85	1120.4	833.4	1.344	589.3	1.3309	391.8	.0625	.702
1000	726.85	1140.4	853.4	1.336	619.3	1.2598	417.7	.0672	.709
1100	826.85	1158.2	871.2	1.329	647.9	1.1988	442.0	.0717	.714
1200	926.85	1173.8	886.8	1.324	675.2	1.1459	465.0	.0759	.719
1300	1026.85	1187.5	900.5	1.319	701.5	1.0994	488.0	.0797	.727
1400	1126.85	1199.6	912.6	1.315	726.8	1.0581	509.0	.0835	.731
1500	1226.85	1210.2	923.2	1.311	751.3	1.0211			
1600	1326.85	1219.7	932.6	1.308	775.0	.9877			
1700	1426.85	1228.1	941.1	1.305	798.0	.9575			
1800	1526.85	1235.7	948.7	1.303	820.4	.9298			
1900	1626.85	1242.6	955.6	1.300	842.1	.9044			
2000	1726.85	1248.9	961.9	1.298	863.3	.8810			
2100	1826.85	1254.7	969.6	1.297	884.1	.8593			
2200	1926.85	1260.0	973.0	1.295	904.3	.8392			
2300	2026.85	1264.9	977.9	1.294	924.1	.8204			
2400	2126.85	1269.5	982.5	1.292	943.5	.8028			
2500	2226.85	1273.8	986.7	1.291	962.5	.7863			
2600	2326.85	1277.8	990.7	1.290	981.1	.7707			
2700	2426.85	1281.5	994.5	1.289	999.3	.7561			
2800	2526.85	1285.0	998.0	1.288	1017.3	.7422			
2900	2626.85	1288.3	1001.3	1.287	1034.9	.7291			
3000	2726.85	1291.5	1004.4	1.286	1052.2	.7167			
3100	2826.85	1294.4	1007.4	1.285	1069.3	.7049			
3200	2926.85	1297.2	1010.2	1.284	1086.0	.6936			
3300	3026.85	1299.8	1012.8	1.283	1102.6	.6828			
3400	3126.85	1302.3	1015.3	1.283	1118.8	.6726			

APÉNDICE A (continuación)

Table 13 Oxygen at Low Pressures (for One Gram-Mole)

$\bar{m} = 31.9988$

T	t	$\bar{h}$	$p_r$	$\bar{u}$	$v_r$	$\bar{\phi}$	T	t	$\bar{h}$	$p_r$	$\bar{u}$	$v_r$	$\bar{\phi}$
100	-173.15	2904.5	.1108	2073.1	7.506	173.152	600	326.85	17927.3	66.124	12938.7	.0754	226.296
110	-163.15	3195.6	.1546	2281.0	5.914	175.926	610	336.85	18248.7	70.486	13176.9	.0720	226.827
120	-153.15	3486.7	.2097	2488.9	4.758	178.459	620	346.85	18571.0	75.072	13416.1	.0687	227.352
130	-143.15	3777.7	.2735	2696.9	3.895	180.789	630	356.85	18894.3	79.890	13656.2	.0656	227.869
140	-133.15	4068.8	.3597	2904.8	3.236	182.946	640	366.85	19218.4	84.950	13897.2	.0626	228.379
150	-123.15	4359.9	.4580	3112.7	2.723	184.954	650	376.85	19543.5	90.258	14139.1	.0599	228.883
160	-113.15	4651.0	.5742	3320.7	2.317	186.833	660	386.85	19869.5	95.826	14382.0	.0573	229.381
170	-103.15	4942.1	.7099	3528.7	1.991	188.598	670	396.85	20196.3	101.661	14625.6	.0548	229.872
180	-93.15	5233.3	.8672	3736.7	1.726	190.262	680	406.85	20524.0	107.774	14870.2	.0525	230.358
190	-83.15	5524.4	1.0480	3944.7	1.507	191.836	690	416.85	20852.6	114.174	15115.6	.0502	230.838
200	-73.15	5815.7	1.2543	4152.8	1.326	193.330	700	426.85	21182.0	120.872	15361.9	.0482	231.312
210	-63.15	6107.0	1.4881	4360.9	1.173	194.751	710	436.85	21512.2	127.877	15608.9	.0462	231.780
220	-53.15	6398.4	1.7516	4569.2	1.044	196.107	720	446.85	21843.2	135.199	15856.8	.0443	232.243
230	-43.15	6689.9	2.0471	4777.6	.934	197.403	730	456.85	22175.0	142.850	16105.5	.0425	232.701
240	-33.15	6981.6	2.3767	4986.1	.840	198.644	740	466.85	22507.6	150.841	16355.0	.0408	233.153
250	-23.15	7273.5	2.7429	5194.9	.758	199.836	750	476.85	22841.0	159.181	16605.2	.0392	233.601
260	-13.15	7565.6	3.1482	5403.9	.687	200.981	760	486.85	23175.1	167.883	16856.1	.0376	234.043
270	-3.15	7858.0	3.5951	5613.1	.624	202.085	770	496.85	23509.9	176.958	17107.9	.0362	234.481
280	6.85	8150.8	4.0863	5822.8	.570	203.150	780	506.85	23845.5	186.418	17360.3	.0348	234.914
290	16.85	8444.0	4.6245	6032.8	.521	204.179	790	516.85	24181.8	196.275	17613.4	.0335	235.342
300	26.85	8737.6	5.2127	6243.3	.479	205.174	800	526.85	24518.8	206.541	17867.3	.0322	235.766
310	36.85	9031.7	5.8538	6454.3	.440	206.138	810	536.85	24856.5	217.229	18121.8	.0310	236.186
320	46.85	9326.4	6.5509	6665.8	.406	207.074	820	546.85	25194.8	228.350	18377.0	.0299	236.601
330	56.85	9621.6	7.3073	6877.9	.375	207.983	830	556.85	25533.8	239.919	18632.8	.0288	237.012
340	66.85	9917.5	8.1264	7090.6	.348	208.866	840	566.85	25873.4	251.949	18889.3	.0277	237.418
350	76.85	10214.1	9.0117	7304.1	.323	209.726	850	576.85	26213.7	264.452	19146.5	.0267	237.821
360	86.85	10511.4	9.9668	7518.3	.300	210.563	860	586.85	26554.6	277.443	19404.2	.0258	238.220
370	96.85	10809.5	10.9955	7733.2	.280	211.380	870	596.85	26896.1	290.935	19662.6	.0249	238.615
380	106.85	11108.4	12.1019	7949.0	.261	212.177	880	606.85	27238.2	304.942	19921.5	.0240	239.006
390	116.85	11408.2	13.2899	8165.6	.244	212.956	890	616.85	27580.9	319.480	20181.1	.0232	239.393
400	126.85	11708.8	14.5639	8383.0	.228	213.717	900	626.85	27924.2	334.563	20441.2	.0224	239.776
410	136.85	12010.3	15.9282	8601.4	.214	214.461	910	636.85	28268.0	350.205	20701.9	.0216	240.156
420	146.85	12312.8	17.3875	8820.7	.201	215.190	920	646.85	28612.4	366.423	20963.1	.0209	240.533
430	156.85	12616.2	18.9464	9041.0	.189	215.904	930	656.85	28957.3	383.231	21224.9	.0202	240.906
440	166.85	12920.5	20.6099	9262.2	.178	216.604	940	666.85	29302.8	400.645	21487.2	.0195	241.275
450	176.85	13225.9	22.3830	9484.4	.167	217.290	950	676.85	29648.8	418.681	21750.1	.0189	241.641
460	186.85	13532.2	24.2710	9707.6	.158	217.963	960	686.85	29995.2	437.336	22013.4	.0183	242.004
470	196.85	13839.6	26.2793	9931.8	.149	218.624	970	696.85	30342.2	456.686	22277.3	.0177	242.364
480	206.85	14147.9	28.4134	10157.0	.140	219.273	980	706.85	30689.7	476.688	22541.6	.0171	242.720
490	216.85	14457.3	30.6792	10383.2	.133	219.911	990	716.85	31037.7	497.379	22806.5	.0165	243.073
500	226.85	14767.7	33.0826	10610.5	.126	220.538	1000	726.85	31386.2	518.777	23071.8	.0160	243.423
510	236.85	15079.1	35.6297	10838.8	.119	221.155	1010	736.85	31735.1	540.898	23337.5	.0155	243.771
520	246.85	15391.6	38.3267	11068.1	.113	221.762	1020	746.85	32084.5	563.762	23603.8	.0150	244.115
530	256.85	15705.0	41.1804	11298.4	.107	222.359	1030	756.85	32434.3	587.386	23870.5	.0146	244.456
540	266.85	16019.5	44.1972	11529.7	.102	222.947	1040	766.85	32784.6	611.788	24137.6	.0141	244.795
550	276.85	16335.0	47.3840	11762.1	.097	223.526	1050	776.85	33135.3	636.989	24405.2	.0137	245.130
560	286.85	16651.5	50.7481	11995.4	.092	224.096	1060	786.85	33486.4	663.006	24673.2	.0133	245.463
570	296.85	16969.0	54.2965	12229.8	.087	224.658	1070	796.85	33838.0	689.859	24941.6	.0129	245.793
580	306.85	17287.4	58.0367	12465.1	.083	225.212	1080	806.85	34190.0	717.568	25210.4	.0125	246.121
590	316.85	17606.9	61.9765	12701.4	.079	225.758	1090	816.85	34542.4	746.153	25479.7	.0121	246.445

APÉNDICE A (continuación)

Table 13 Oxygen at Low Pressures (for One Gram-Mole)

$\bar{m} = 31.9988$

T	t	$\bar{h}$	$P_r$	$\bar{u}$	$v_r$	$\bar{\phi}$	T	t	$\bar{h}$	$P_r$	$\bar{u}$	$v_r$	$\bar{\phi}$
1100	826.85	34895.2	775.63	25749.3	0.1179	246.768	1600	1326.85	52946.2	3938.6	39643.2	0.0338	260.278
1110	836.85	35248.4	806.03	26019.4	0.1145	247.087	1610	1336.85	53314.2	4048.7	39928.0	0.0331	260.507
1120	846.85	35601.9	837.37	26289.8	0.1112	247.404	1620	1346.85	53682.4	4161.2	40213.1	0.0324	260.735
1130	856.85	35955.9	869.66	26560.6	0.1080	247.719	1630	1356.85	54050.9	4276.3	40498.4	0.0317	260.962
1140	866.85	36310.2	902.94	26831.8	0.1050	248.031	1640	1366.85	54419.5	4393.9	40783.9	0.0310	261.187
1150	876.85	36664.9	937.21	27103.3	0.1020	248.341	1650	1376.85	54788.5	4514.0	41069.7	0.0304	261.411
1160	886.85	37020.0	972.51	27375.3	0.0992	248.648	1660	1386.85	55157.6	4636.7	41355.7	0.0298	261.634
1170	896.85	37375.4	1008.85	27647.6	0.0964	248.953	1670	1396.85	55527.0	4762.1	41642.0	0.0292	261.856
1180	906.85	37731.2	1046.28	27920.2	0.0938	249.256	1680	1406.85	55896.7	4890.2	41928.5	0.0286	262.077
1190	916.85	38087.3	1084.79	28193.2	0.0912	249.557	1690	1416.85	56266.6	5021.0	42215.2	0.0280	262.296
1200	926.85	38443.8	1124.42	28466.5	0.0887	249.855	1700	1426.85	56636.7	5154.7	42502.2	0.0274	262.515
1210	936.85	38800.6	1165.19	28740.2	0.0863	250.151	1710	1436.85	57007.0	5291.1	42789.4	0.0269	262.732
1220	946.85	39157.8	1207.12	29014.2	0.0840	250.445	1720	1446.85	57377.6	5430.4	43076.8	0.0263	262.948
1230	956.85	39515.2	1250.24	29288.5	0.0818	250.737	1730	1456.85	57748.4	5572.6	43364.5	0.0258	263.163
1240	966.85	39873.1	1294.57	29563.2	0.0796	251.027	1740	1466.85	58119.5	5717.8	43652.4	0.0253	263.377
1250	976.85	40231.2	1340.15	29838.2	0.0776	251.314	1750	1476.85	58490.7	5866.0	43940.5	0.0248	263.590
1260	986.85	40589.6	1386.98	30113.5	0.0755	251.600	1760	1486.85	58862.3	6017.3	44228.9	0.0243	263.801
1270	996.85	40948.4	1435.11	30389.1	0.0736	251.884	1770	1496.85	59234.0	6171.7	44517.5	0.0238	264.012
1280	1006.85	41307.5	1484.56	30665.1	0.0717	252.165	1780	1506.85	59606.0	6329.2	44806.3	0.0234	264.222
1290	1016.85	41666.9	1535.24	30941.3	0.0699	252.445	1790	1516.85	59978.2	6490.0	45095.4	0.0229	264.430
1300	1026.85	42026.6	1587.50	31217.9	0.0681	252.723	1800	1526.85	60350.6	6654.0	45384.7	0.0225	264.638
1310	1036.85	42386.6	1641.05	31494.7	0.0664	252.999	1810	1536.85	60723.3	6821.3	45674.2	0.0221	264.844
1320	1046.85	42746.9	1696.03	31771.9	0.0647	253.272	1820	1546.85	61096.2	6991.9	45963.9	0.0216	265.050
1330	1056.85	43107.5	1752.47	32049.3	0.0631	253.545	1830	1556.85	61469.3	7166.0	46253.9	0.0212	265.254
1340	1066.85	43468.3	1810.38	32327.0	0.0615	253.815	1840	1566.85	61842.6	7343.5	46544.1	0.0208	265.457
1350	1076.85	43829.5	1869.80	32605.1	0.0600	254.083	1850	1576.85	62216.2	7524.5	46834.5	0.0204	265.660
1360	1086.85	44191.0	1930.73	32883.4	0.0586	254.350	1860	1586.85	62590.0	7709.1	47125.2	0.0201	265.861
1370	1096.85	44552.7	1993.30	33162.0	0.0571	254.615	1870	1596.85	62964.0	7897.3	47416.1	0.0197	266.062
1380	1106.85	44914.7	2057.43	33440.9	0.0558	254.879	1880	1606.85	63338.3	8089.2	47707.2	0.0193	266.262
1390	1116.85	45277.0	2123.19	33720.0	0.0544	255.140	1890	1616.85	63712.8	8284.8	47998.5	0.0190	266.460
1400	1126.85	45639.6	2190.61	33999.4	0.0531	255.400	1900	1626.85	64087.5	8484.2	48290.1	0.0186	266.658
1410	1136.85	46002.5	2259.72	34279.2	0.0519	255.658	1910	1636.85	64462.4	8687.4	48581.9	0.0183	266.855
1420	1146.85	46365.6	2330.56	34559.1	0.0507	255.915	1920	1646.85	64837.5	8894.6	48873.9	0.0179	267.051
1430	1156.85	46729.0	2403.15	34839.4	0.0495	256.170	1930	1656.85	65212.9	9105.6	49166.1	0.0176	267.246
1440	1166.85	47092.6	2477.52	35119.9	0.0483	256.423	1940	1666.85	65588.5	9320.7	49458.6	0.0173	267.440
1450	1176.85	47456.6	2553.72	35400.7	0.0472	256.675	1950	1676.85	65964.4	9539.9	49751.3	0.0170	267.633
1460	1186.85	47820.8	2631.77	35681.7	0.0461	256.926	1960	1686.85	66340.4	9763.2	50044.2	0.0167	267.825
1470	1196.85	48185.2	2711.70	35963.0	0.0451	257.174	1970	1696.85	66716.7	9990.6	50337.3	0.0164	268.017
1480	1196.85	48549.9	2793.55	36244.6	0.0440	257.422	1980	1706.85	67093.2	10222.3	50630.7	0.0161	268.208
1490	1216.85	48914.9	2877.36	36526.4	0.0431	257.667	1990	1716.85	67469.9	10458.3	50924.2	0.0158	268.397
1500	1226.85	49280.1	2963.16	36808.5	0.0421	257.912	2000	1726.85	67846.8	10698.7	51218.0	0.0155	268.586
1510	1236.85	49645.6	3050.99	37090.9	0.0411	258.154	2010	1736.85	68224.0	10943.5	51512.0	0.0153	268.774
1520	1246.85	50011.3	3140.87	37373.5	0.0402	258.396	2020	1746.85	68601.4	11192.8	51806.3	0.0150	268.962
1530	1256.85	50377.3	3232.86	37656.3	0.0393	258.636	2030	1756.85	68979.0	11446.7	52100.7	0.0147	269.148
1540	1266.85	50743.6	3326.97	37939.4	0.0385	258.874	2040	1766.85	69356.8	11705.2	52395.4	0.0145	269.334
1550	1276.85	51110.1	3423.26	38222.7	0.0376	259.112	2050	1776.85	69734.9	11968.4	52690.3	0.0142	269.519
1560	1286.85	51476.8	3521.75	38506.3	0.0368	259.348	2060	1786.85	70113.1	12236.3	52985.5	0.0140	269.703
1570	1296.85	51843.8	3622.49	38790.2	0.0360	259.582	2070	1796.85	70491.6	12509.0	53280.8	0.0138	269.886
1580	1306.85	52211.0	3725.52	39074.3	0.0353	259.815	2080	1806.85	70870.3	12786.7	53576.4	0.0135	270.069
1590	1316.85	52578.5	3830.87	39358.6	0.0345	260.047	2090	1816.85	71249.2	13069.2	53872.1	0.0133	270.250

Table 13 Oxygen at Low Pressures (for One Gram-Mole)

 $\bar{m} = 31.9988$ 

T	l	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ	T	l	h	p <sub>r</sub>	u	v <sub>r</sub>	φ
2100	1826.85	71628.4	13357	54168.1	.001307	270.431	2600	2326.85	90857.6	35853	69240.2	.000603	278.641
2110	1836.85	72007.8	13649	54464.4	.001285	270.611	2610	2336.85	91247.5	36505	69546.9	.000594	278.791
2120	1846.85	72387.3	13947	54760.8	.001264	270.791	2620	2346.85	91637.5	37165	69853.8	.000586	278.940
2130	1856.85	72767.1	14250	55057.5	.001243	270.970	2630	2356.85	92027.8	37836	70160.9	.000578	279.088
2140	1866.85	73147.2	14559	55354.3	.001222	271.148	2640	2366.85	92418.2	38516	70468.2	.000570	279.237
2150	1876.85	73527.4	14872	55651.4	.001202	271.325	2650	2376.85	92808.8	39206	70775.7	.000562	279.384
2160	1886.85	73907.9	15192	55948.7	.001182	271.501	2660	2386.85	93199.7	39907	71083.4	.000554	279.532
2170	1896.85	74288.5	15516	56246.3	.001163	271.677	2670	2396.85	93590.7	40617	71391.2	.000547	279.678
2180	1906.85	74669.4	15847	56544.0	.001144	271.852	2680	2406.85	93981.9	41338	71699.3	.000539	279.824
2190	1916.85	75050.5	16183	56842.0	.001125	272.027	2690	2416.85	94373.3	42069	72007.6	.000532	279.970
2200	1926.85	75431.8	16524	57140.2	.001107	272.201	2700	2426.85	94764.9	42811	72316.1	.000524	280.116
2210	1936.85	75813.4	16872	57438.6	.001089	272.374	2710	2436.85	95156.8	43563	72624.7	.000517	280.260
2220	1946.85	76195.1	17225	57737.2	.001072	272.546	2720	2446.85	95548.7	44326	72933.6	.000510	280.405
2230	1956.85	76577.1	17584	58036.0	.001054	272.718	2730	2456.85	95940.9	45100	73242.6	.000503	280.549
2240	1966.85	76959.3	17950	58335.0	.001038	272.889	2740	2466.85	96333.3	45885	73551.9	.000496	280.692
2250	1976.85	77341.7	18321	58634.3	.001021	273.059	2750	2476.85	96725.9	46681	73861.3	.000490	280.835
2260	1986.85	77724.3	18699	58933.7	.001005	273.229	2760	2486.85	97118.7	47489	74170.9	.000483	280.978
2270	1996.85	78107.1	19083	59233.4	.000989	273.398	2770	2496.85	97511.6	48307	74480.7	.000477	281.120
2280	2006.85	78490.2	19474	59533.3	.000973	273.566	2780	2506.85	97904.7	49138	74790.7	.000470	281.262
2290	2016.85	78873.4	19870	59833.3	.000958	273.734	2790	2516.85	98298.1	49979	75100.9	.000464	281.403
2300	2026.85	79256.9	20274	60133.7	.000943	273.901	2800	2526.85	98691.6	50833	75411.3	.000458	281.544
2310	2036.85	79640.5	20684	60434.3	.000929	274.067	2810	2536.85	99085.3	51698	75721.8	.000452	281.684
2320	2046.85	80024.4	21100	60735.0	.000914	274.233	2820	2546.85	99479.2	52576	76032.6	.000446	281.824
2330	2056.85	80408.5	21524	61036.0	.000900	274.398	2830	2556.85	99873.3	53465	76343.5	.000440	281.963
2340	2066.85	80792.8	21954	61337.1	.000886	274.563	2840	2566.85	100267.5	54367	76654.6	.000434	282.102
2350	2076.85	81177.4	22391	61638.5	.000873	274.727	2850	2576.85	100662.0	55281	76965.9	.000429	282.241
2360	2086.85	81562.1	22836	61940.1	.000859	274.890	2860	2586.85	101056.6	56208	77277.4	.000423	282.379
2370	2096.85	81947.0	23287	62241.9	.000846	275.053	2870	2596.85	101451.4	57147	77589.1	.000418	282.517
2380	2106.85	82332.2	23746	62543.9	.000833	275.215	2880	2606.85	101846.4	58100	77900.9	.000412	282.654
2390	2116.85	82717.5	24212	62846.1	.000821	275.377	2890	2616.85	102241.6	59065	78213.0	.000407	282.791
2400	2126.85	83103.1	24685	63148.5	.000808	275.538	2900	2626.85	102637.0	60043	78525.2	.000402	282.928
2410	2136.85	83488.9	25166	63451.2	.000796	275.698	2910	2636.85	103032.5	61034	78837.6	.000396	283.064
2420	2146.85	83874.9	25654	63754.0	.000784	275.858	2920	2646.85	103428.2	62039	79150.2	.000391	283.200
2430	2156.85	84261.1	26151	64057.1	.000773	276.017	2930	2656.85	103824.1	63057	79462.9	.000386	283.335
2440	2166.85	84647.5	26654	64360.3	.000761	276.176	2940	2666.85	104220.2	64089	79775.9	.000381	283.470
2450	2176.85	85034.1	27166	64663.8	.000750	276.334	2950	2676.85	104616.5	65135	80089.0	.000377	283.605
2460	2186.85	85420.9	27686	64967.4	.000739	276.492	2960	2686.85	105012.9	66194	80402.3	.000372	283.739
2470	2196.85	85807.9	28214	65271.3	.000728	276.649	2970	2696.85	105409.5	67268	80715.7	.000367	283.873
2480	2206.85	86195.1	28750	65575.4	.000717	276.805	2980	2706.85	105806.3	68356	81029.4	.000362	284.006
2490	2216.85	86582.5	29294	65879.7	.000707	276.961	2990	2716.85	106203.3	69458	81343.2	.000358	284.139
2500	2226.85	86970.2	29846	66184.2	.000696	277.116	3000	2726.85	106600.4	70574	81657.2	.000353	284.272
2510	2236.85	87358.0	30407	66488.9	.000686	277.271	3010	2736.85	106997.7	71706	81971.4	.000349	284.404
2520	2246.85	87746.1	30977	66793.8	.000676	277.425	3020	2746.85	107395.2	72852	82285.7	.000345	284.536
2530	2256.85	88134.3	31555	67098.9	.000667	277.579	3030	2756.85	107792.9	74013	82600.2	.000340	284.667
2540	2266.85	88522.7	32142	67404.2	.000657	277.732	3040	2766.85	108190.7	75189	82914.9	.000336	284.798
2550	2276.85	88911.4	32738	67709.7	.000648	277.885	3050	2776.85	108588.7	76380	83229.8	.000332	284.929
2560	2286.85	89300.2	33343	68015.4	.000638	278.037	3060	2786.85	108986.9	77587	83544.8	.000328	285.059
2570	2296.85	89689.3	33956	68321.3	.000629	278.189	3070	2796.85	109385.2	78809	83860.0	.000324	285.189
2580	2306.85	90078.5	34579	68627.4	.000620	278.340	3080	2806.85	109783.8	80047	84175.4	.000320	285.319
2590	2316.85	90468.0	35212	68933.7	.000612	278.491	3090	2816.85	110182.4	81301	84490.9	.000316	285.448

APÉNDICE A (continuación)

Table 14 Oxygen

$\bar{m} = 31.9988$

T K	t C	$\bar{c}_p$ J g-mol K	$\bar{c}_v$ J g-mol K	$k = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v}$	a m s
100	-173.15	29.106	20.792	1.400	190.7
120	-153.15	29.107	20.793	1.400	208.9
140	-133.15	29.108	20.794	1.400	225.7
160	-113.15	29.111	20.796	1.400	241.2
180	-93.15	29.115	20.801	1.400	255.9
200	-73.15	29.126	20.811	1.400	269.7
250	-23.15	29.201	20.887	1.398	301.4
300	26.85	29.386	21.071	1.395	329.7
350	76.85	29.695	21.380	1.389	355.4
400	126.85	30.107	21.792	1.382	378.9
450	176.85	30.584	22.270	1.373	400.7
500	226.85	31.091	22.777	1.365	421.1
550	276.85	31.599	23.285	1.357	440.4
600	326.85	32.090	23.775	1.350	458.7
650	376.85	32.552	24.238	1.343	476.3
700	426.85	32.981	24.666	1.337	493.1
750	476.85	33.374	25.060	1.332	509.4
800	526.85	33.733	25.418	1.327	525.2
850	576.85	34.059	25.744	1.323	540.5
900	626.85	34.355	26.041	1.319	555.4
950	676.85	34.624	26.310	1.316	570.0
1000	726.85	34.869	26.555	1.313	584.1
1050	776.85	35.093	26.779	1.310	597.9
1100	826.85	35.299	26.984	1.308	611.5
1150	876.85	35.488	27.174	1.306	624.7
1200	926.85	35.665	27.350	1.304	637.6
1300	1026.85	35.985	27.670	1.300	662.8
1400	1126.85	36.271	27.957	1.297	687.0
1500	1226.85	36.536	28.221	1.295	710.3
1600	1326.85	36.784	28.470	1.292	732.9
1700	1426.85	37.023	28.709	1.290	754.7
1800	1526.85	37.255	28.940	1.287	775.9
1900	1626.85	37.482	29.167	1.285	796.5
2000	1726.85	37.705	29.391	1.283	816.5
2100	1826.85	37.926	29.611	1.281	836.0
2200	1926.85	38.143	29.828	1.279	855.0
2300	2026.85	38.357	30.043	1.277	873.5
2400	2126.85	38.567	30.253	1.275	891.6
2500	2226.85	38.773	30.459	1.273	909.3
2600	2326.85	38.975	30.660	1.271	926.7
2700	2426.85	39.171	30.856	1.269	943.7
2800	2526.85	39.361	31.047	1.268	960.4
2900	2626.85	39.545	31.231	1.266	976.8
3000	2726.85	39.723	31.408	1.265	992.9
3100	2826.85	39.894	31.579	1.263	1008.7
3200	2926.85	40.057	31.743	1.262	1024.3
3300	3026.85	40.214	31.900	1.261	1039.7
3400	3126.85	40.364	32.049	1.259	1054.8
3500	3226.85	40.506	32.192	1.258	1069.7
3600	3326.85	40.641	32.327	1.257	1084.4

APÉNDICE A (continuación)

Table 15 Water Vapor at Low Pressures (for One Gram-Mole)

m̄ = 18.0152

T	t	h	p <sub>v</sub>	u	v <sub>g</sub>	φ	T	t	h	p <sub>v</sub>	u	v <sub>g</sub>	φ
100	-173.15	3289.6	.0090	2458.1	92.477	152.272	600	326.85	20405.3	13.257	15416.6	3763	212.935
110	-163.15	3622.5	0.132	2707.9	69.440	155.447	610	336.85	20769.1	14.252	15697.3	3559	213.537
120	-153.15	3955.7	0.187	2958.0	53.457	158.345	620	346.85	21134.1	15.306	15979.1	3368	214.130
130	-143.15	4288.9	0.257	3208.0	42.023	161.012	630	356.85	21500.2	16.424	16262.1	3189	214.716
140	-133.15	4622.0	.0346	3458.0	33.627	163.481	640	366.85	21867.4	17.607	16546.2	.3022	215.294
150	-123.15	4955.2	0.456	3708.1	27.326	165.780	650	376.85	22235.8	18.859	16831.5	2866	215.866
160	-113.15	5288.4	.0591	3958.1	22.503	167.931	660	386.85	22605.6	20.183	17118.1	2719	216.430
170	-103.15	5621.8	0.754	4208.4	18.754	169.951	670	396.85	22976.2	21.583	17405.6	2581	216.987
180	-93.15	5955.0	.0948	4458.4	15.789	171.856	680	406.85	23348.2	23.062	17694.4	2452	217.538
190	-83.15	6288.4	1.177	4708.7	13.418	173.659	690	416.85	23721.4	24.624	17984.4	2330	218.083
200	-73.15	6621.8	1.446	4958.9	11.498	175.369	700	426.85	24095.7	26.272	18275.6	2215	218.622
210	-63.15	6955.4	1.759	5209.4	9.926	176.997	710	436.85	24471.3	28.010	18568.1	2108	219.155
220	-53.15	7289.3	2.120	5460.1	8.628	178.549	720	446.85	24848.1	29.843	18861.7	2006	219.681
230	-43.15	7622.9	2.534	5710.6	7.546	180.033	730	456.85	25226.0	31.774	19156.5	1910	220.203
240	-33.15	7956.8	3.007	5961.3	6.637	181.454	740	466.85	25605.3	33.808	19452.7	1820	220.719
250	-23.15	8291.1	3.543	6212.5	5.867	182.819	750	476.85	25985.7	35.950	19749.9	1735	221.229
260	-13.15	8625.4	4.148	6463.7	5.212	184.129	760	486.85	26367.3	38.203	20048.3	1654	221.735
270	-3.15	8960.0	4.828	6715.1	4.650	185.392	770	496.85	26750.2	40.573	20348.1	1578	222.235
280	6.85	9295.2	5.590	6967.2	4.164	186.611	780	506.85	27134.3	43.065	20649.0	1506	222.731
290	16.85	9630.4	6.440	7219.2	3.744	187.787	790	516.85	27519.7	45.685	20951.3	1438	223.222
300	26.85	9966.1	7.384	7471.8	3.378	188.925	800	526.85	27906.2	48.436	21254.7	1373	223.708
310	36.85	10302.4	8.431	7725.0	3.057	190.027	810	536.85	28293.9	51.326	21559.2	1312	224.190
320	46.85	10639.0	9.588	7978.4	2.775	191.097	820	546.85	28683.2	54.359	21865.4	1254	224.667
330	56.85	10976.3	1.0863	8232.5	2.526	192.134	830	556.85	29073.4	57.542	22172.4	1199	225.140
340	66.85	11314.0	1.2264	8487.1	2.305	193.143	840	566.85	29465.2	60.881	22481.1	1147	225.609
350	76.85	11652.7	1.3800	8742.6	2.109	194.124	850	576.85	29858.1	64.383	22790.8	1098	226.074
360	86.85	11991.5	1.5480	8998.3	1.934	195.079	860	586.85	30252.1	68.054	23101.7	1051	226.535
370	96.85	12331.5	1.7314	9255.2	1.777	196.010	870	596.85	30647.5	71.900	23414.0	1006	226.993
380	106.85	12672.0	1.9312	9512.5	1.636	196.918	880	606.85	31044.1	75.929	23727.4	964	227.446
390	116.85	13013.5	2.1487	9770.9	1.509	197.805	890	616.85	31442.2	80.148	24042.4	923	227.896
400	126.85	13355.6	2.3846	10029.8	1.395	198.672	900	626.85	31841.2	84.566	24358.3	885	228.342
410	136.85	13698.7	2.6404	10289.8	1.291	199.519	910	636.85	32241.9	89.189	24675.8	848	228.784
420	146.85	14042.6	2.9170	10550.5	1.197	200.347	920	646.85	32643.6	94.027	24994.4	814	229.223
430	156.85	14387.6	3.2164	10812.4	1.112	201.159	930	656.85	33046.8	99.085	25314.4	0780	229.659
440	166.85	14733.3	3.5387	11074.9	1.034	201.954	940	666.85	33451.0	104.376	25635.5	0749	230.092
450	176.85	15080.1	3.8867	11338.6	.963	202.733	950	676.85	33856.7	109.905	25958.0	0719	230.521
460	186.85	15427.8	4.2608	11603.2	.898	203.498	960	686.85	34263.7	115.685	26281.8	0690	230.947
470	196.85	15776.4	4.6630	11868.6	.838	204.247	970	696.85	34671.8	121.722	26606.8	0663	231.370
480	206.85	16126.2	5.0944	12135.2	.783	204.983	980	706.85	35081.3	128.029	26933.2	0636	231.790
490	216.85	16476.6	5.5575	12402.5	.733	205.707	990	716.85	35492.1	134.614	27260.9	0611	232.207
500	226.85	16828.4	6.0530	12671.2	.687	206.417	1000	726.85	35904.1	141.489	27589.7	0588	232.621
510	236.85	17181.3	6.5838	12941.0	.644	207.116	1010	736.85	36317.5	148.663	27919.9	0565	233.032
520	246.85	17535.2	7.1510	13211.7	.605	207.803	1020	746.85	36732.0	156.149	28251.3	0543	233.441
530	256.85	17889.9	7.7568	13483.3	.568	208.479	1030	756.85	37147.8	163.958	28584.0	0522	233.846
540	266.85	18246.1	8.4031	13756.3	.534	209.144	1040	766.85	37565.0	172.101	28918.0	0502	234.249
550	276.85	18603.1	9.0921	14030.2	.503	209.799	1050	776.85	37983.4	180.592	29253.2	0483	234.650
560	286.85	18961.3	9.8261	14305.2	.474	210.445	1060	786.85	38403.1	189.441	29589.8	0465	235.048
570	296.85	19320.6	10.6071	14581.3	.447	211.081	1070	796.85	38823.9	198.665	29927.5	0448	235.443
580	306.85	19681.0	11.4377	14858.6	.422	211.708	1080	806.85	39246.1	208.275	30266.6	0431	235.836
590	316.85	20042.6	12.3203	15137.1	.398	212.326	1090	816.85	39669.7	218.284	30607.0	0415	236.226

APÉNDICE A (continuación)

Table 15 Water Vapor at Low Pressures (for One Gram-Mole)

$\bar{m} = 18.0152$

T	t	$\bar{h}$	$p_r$	u	$v_r$	$\bar{\phi}$	T	t	$\bar{h}$	$p_r$	u	$v_r$	$\bar{\phi}$
1100	826.85	40094.4	228.71	30948.6	.0400	236.614	1600	1326.85	62811.9	1758.5	49508.9	.00756	253.573
1110	836.85	40520.5	239.56	31291.5	.0385	236.999	1610	1336.85	63293.0	1823.1	49906.8	.00734	253.873
1120	846.85	40947.5	250.86	31635.3	.0371	237.383	1620	1346.85	63774.9	1889.7	50305.6	.00713	254.171
1130	856.85	41376.0	262.62	31980.8	.0358	237.763	1630	1356.85	64257.8	1958.4	50705.3	.00692	254.468
1140	866.85	41805.7	274.86	32327.3	.0345	238.142	1640	1366.85	64741.3	2029.3	51105.7	.00672	254.764
1150	876.85	42236.8	287.59	32675.2	.0332	238.518	1650	1376.85	65226.0	2102.5	51507.2	.00652	255.059
1160	886.85	42669.0	300.83	33024.3	.0321	238.893	1660	1386.85	65711.5	2178.0	51909.6	.00634	255.352
1170	896.85	43102.3	314.59	33374.5	.0309	239.265	1670	1396.85	66197.6	2255.9	52312.5	.00615	255.644
1180	906.85	43537.0	328.90	33726.1	.0298	239.634	1680	1406.85	66685.0	2336.2	52716.8	.00598	255.935
1190	916.85	43972.9	343.78	34078.7	.0288	240.002	1690	1416.85	67173.0	2419.1	53121.7	.00581	256.225
1200	926.85	44410.1	359.24	34432.8	.0278	240.368	1700	1426.85	67662.0	2504.5	53527.5	.00564	256.513
1210	936.85	44848.2	375.31	34787.8	.0268	240.732	1710	1436.85	68151.7	2592.5	53934.0	.00548	256.801
1220	946.85	45287.7	391.99	35144.1	.0259	241.093	1720	1446.85	68642.2	2683.2	54341.5	.00533	257.087
1230	956.85	45728.5	409.32	35501.8	.0250	241.453	1730	1456.85	69133.7	2776.8	54749.8	.00518	257.372
1240	966.85	46170.2	427.32	35860.4	.0241	241.811	1740	1466.85	69626.1	2873.2	55159.1	.00504	257.655
1250	976.85	46613.3	446.01	36220.3	.0233	242.167	1750	1476.85	70119.2	2972.5	55569.0	.00489	257.938
1260	986.85	47057.6	465.41	36581.4	.0225	242.521	1760	1486.85	70613.2	3074.8	55979.8	.00476	258.219
1270	996.85	47502.9	485.54	36943.7	.0217	242.873	1770	1496.85	71107.8	3180.3	56391.3	.00463	258.500
1280	1006.85	47949.5	506.43	37307.0	.0210	243.223	1780	1506.85	71603.4	3288.9	56803.8	.00450	258.779
1290	1016.85	48397.3	528.10	37671.8	.0203	243.572	1790	1516.85	72099.6	3400.7	57216.9	.00438	259.057
1300	1026.85	48846.1	550.58	38037.4	.0196	243.918	1800	1526.85	72596.8	3515.9	57630.9	.00426	259.334
1310	1036.85	49296.0	573.90	38404.2	.0190	244.263	1810	1536.85	73094.6	3634.5	58045.6	.00414	259.610
1320	1046.85	49747.3	598.08	38772.3	.0184	244.606	1820	1546.85	73593.2	3756.6	58460.9	.00403	259.884
1330	1056.85	50199.5	623.14	39143.3	.0177	244.947	1830	1556.85	74092.6	3882.3	58877.2	.00392	260.158
1340	1066.85	50652.8	649.12	39511.5	.0172	245.287	1840	1566.85	74592.9	4011.7	59294.4	.00381	260.430
1350	1076.85	51107.5	676.05	39883.1	.0166	245.625	1850	1576.85	75093.7	4144.8	59712.1	.00371	260.702
1360	1086.85	51563.1	703.95	40255.5	.0161	245.961	1860	1586.85	75595.4	4281.9	60130.6	.00361	260.972
1370	1096.85	52019.8	732.86	40629.1	.0155	246.296	1870	1596.85	76097.8	4422.9	60549.9	.00352	261.242
1380	1106.85	52477.7	762.80	41003.8	.0150	246.629	1880	1606.85	76601.1	4567.9	60970.0	.00342	261.510
1390	1116.85	52936.5	793.82	41379.5	.0146	246.960	1890	1616.85	77104.8	4717.2	61390.6	.00333	261.777
1400	1126.85	53396.6	825.94	41756.5	.0141	247.290	1900	1626.85	77609.5	4870.7	61812.1	.00324	262.044
1410	1136.85	53857.7	859.19	42134.4	.0136	247.618	1910	1636.85	78114.8	5028.6	62234.3	.00316	262.309
1420	1146.85	54319.8	893.61	42513.4	.0132	247.945	1920	1646.85	78620.8	5191.0	62657.2	.00308	262.573
1430	1156.85	54782.9	929.23	42893.3	.0128	248.270	1930	1656.85	79127.5	5358.0	63080.7	.00299	262.836
1440	1166.85	55247.2	966.10	43274.4	.0124	248.593	1940	1666.85	79634.9	5529.6	63505.0	.00292	263.099
1450	1176.85	55712.5	1004.25	43656.6	.0120	248.915	1950	1676.85	80143.0	5706.1	63929.9	.00284	263.360
1460	1186.85	56179.0	1043.72	44040.0	.0116	249.236	1960	1686.85	80651.9	5887.6	64355.7	.00277	263.620
1470	1196.85	56646.2	1084.55	44424.0	.0113	249.555	1970	1696.85	81161.3	6074.0	64782.0	.00270	263.879
1480	1206.85	57114.7	1126.77	44809.4	.0109	249.872	1980	1706.85	81671.5	6265.7	65208.9	.00263	264.138
1490	1216.85	57584.0	1170.43	45195.5	.0106	250.189	1990	1716.85	82182.2	6462.7	65636.6	.00256	264.395
1500	1226.85	58054.5	1215.57	45582.9	.0103	250.503	2000	1726.85	82693.7	6665.1	66064.9	.00249	264.652
1510	1236.85	58525.8	1262.25	45972.1	.0099	250.816	2010	1736.85	83205.8	6873.0	66493.9	.00243	264.907
1520	1246.85	58998.2	1310.48	46363.0	.0096	251.128	2020	1746.85	83718.4	7086.7	66923.4	.00237	265.161
1530	1256.85	59471.5	1360.33	46750.5	.0094	251.439	2030	1756.85	84232.0	7306.1	67353.7	.00231	265.415
1540	1266.85	59946.0	1411.84	47141.8	.0091	251.748	2040	1766.85	84746.2	7531.4	67784.8	.00225	265.668
1550	1276.85	60421.3	1465.06	47534.0	.0088	252.055	2050	1776.85	85260.8	7762.9	68216.3	.00220	265.919
1560	1286.85	60897.6	1520.04	47927.1	.0085	252.362	2060	1786.85	85776.1	8000.6	68648.5	.00214	266.170
1570	1296.85	61374.8	1576.81	48321.1	.0083	252.666	2070	1796.85	86292.1	8244.6	69081.3	.00209	266.420
1580	1306.85	61853.1	1635.46	48716.3	.0080	252.970	2080	1806.85	86808.6	8495.3	69514.6	.00204	266.669
1590	1316.85	62332.0	1696.00	49112.1	.0078	253.272	2090	1816.85	87325.7	8752.5	69948.6	.00199	266.917



## APÉNDICE A (continuación)

Table 15 Water Vapor at Low Pressures (for One Gram-Mole)

 $\bar{m} = 18.0152$ 

T	t	$\bar{h}$	$\bar{u}$	$\bar{v}$	$\bar{\phi}$	T	t	$\bar{h}$	$\bar{u}$	$\bar{v}$	$\bar{\phi}$		
2100	1826.85	87843.6	9017	70383.3	.001936	267.164	2600	2326.85	114410.3	35261	92792.8	000613	278.502
2110	1836.85	88361.8	9288	70818.5	.001889	267.410	2610	2336.85	114953.5	36156	93252.9	000600	278.711
2120	1846.85	88881.0	9566	71254.5	.001843	267.656	2620	2346.85	115497.2	37072	93713.5	000588	278.919
2130	1856.85	89400.4	9851	71690.8	.001798	267.900	2630	2356.85	116041.4	38008	94174.5	000575	279.126
2140	1866.85	89920.8	10144	72127.9	.001754	268.144	2640	2366.85	116585.8	38964	94635.8	000563	279.333
2150	1876.85	90441.5	10445	72565.6	.001711	268.387	2650	2376.85	117130.7	39941	95097.5	.000552	279.539
2160	1886.85	90962.8	10753	73003.7	.001670	268.629	2660	2386.85	117676.0	40940	95559.6	000540	279.744
2170	1896.85	91484.7	11070	73442.4	.001630	268.870	2670	2396.85	118221.7	41961	96022.3	000529	279.949
2180	1906.85	92007.3	11394	73881.9	.001591	269.110	2680	2406.85	118767.7	43004	96485.1	.000518	280.153
2190	1916.85	92530.3	11727	74321.8	.001553	269.349	2690	2416.85	119314.1	44069	96948.4	000508	280.356
2200	1926.85	93053.8	12068	74762.1	.001516	269.588	2700	2426.85	119860.8	45158	97411.9	.000497	280.559
2210	1936.85	93578.0	12418	75203.2	.001480	269.825	2710	2436.85	120408.2	46270	97876.1	.000487	280.762
2220	1946.85	94102.7	12777	75644.7	.001445	270.062	2720	2446.85	120955.7	47406	98340.6	.000477	280.963
2230	1956.85	94628.0	13145	76086.9	.001411	270.298	2730	2456.85	121503.5	48567	98805.2	000467	281.164
2240	1966.85	95153.8	13522	76529.5	.001377	270.534	2740	2466.85	122052.0	49752	99270.6	.000458	281.365
2250	1976.85	95680.0	13909	76972.6	.001345	270.768	2750	2476.85	122600.5	50963	99735.9	.000449	281.565
2260	1986.85	96206.9	14305	77416.3	.001314	271.002	2760	2486.85	123149.7	52200	100201.9	.000440	281.764
2270	1996.85	96734.3	14712	77860.6	.001283	271.235	2770	2496.85	123699.1	53462	100668.2	.000431	281.963
2280	2006.85	97262.1	15128	78305.2	.001253	271.467	2780	2506.85	124248.9	54751	101134.9	.000422	282.161
2290	2016.85	97790.6	15555	78750.6	.001224	271.698	2790	2516.85	124799.0	56068	101601.8	.000414	282.359
2300	2026.85	98319.5	15992	79196.4	.001196	271.928	2800	2526.85	125349.8	57413	102069.4	.000405	282.556
2310	2036.85	98848.9	16440	79642.7	.001168	272.158	2810	2536.85	125900.5	58785	102537.0	.000397	282.752
2320	2046.85	99378.8	16899	80089.4	.001141	272.387	2820	2546.85	126452.0	60186	103005.3	.000390	282.948
2330	2056.85	99909.3	17369	80536.8	.001115	272.615	2830	2556.85	127003.6	61617	103473.9	.000382	283.143
2340	2066.85	100440.3	17851	80984.6	.001090	272.842	2840	2566.85	127555.7	63077	103942.8	.000374	283.338
2350	2076.85	100971.8	18344	81432.9	.001065	273.069	2850	2576.85	128108.1	64567	104412.0	.000367	283.532
2360	2086.85	101503.9	18849	81881.9	.001041	273.295	2860	2586.85	128660.9	66088	104881.7	.000360	283.726
2370	2096.85	102036.3	19366	82331.1	.001017	273.520	2870	2596.85	129213.9	67641	105351.6	.000353	283.919
2380	2106.85	102569.3	19896	82781.0	.000995	273.745	2880	2606.85	129767.4	69226	105821.9	.000346	284.111
2390	2116.85	103102.8	20439	83231.4	.000972	273.968	2890	2616.85	130321.3	70843	106292.7	.000339	284.303
2400	2126.85	103636.5	20994	83682.0	.000950	274.191	2900	2626.85	130875.5	72493	106763.7	.000333	284.495
2410	2136.85	104170.9	21563	84133.2	.000929	274.413	2910	2636.85	131430.1	74176	107235.2	.000326	284.686
2420	2146.85	104705.8	22145	84585.0	.000909	274.635	2920	2646.85	131985.0	75894	107706.9	.000320	284.876
2430	2156.85	105241.3	22741	85037.3	.000888	274.856	2930	2656.85	132540.3	77647	108179.1	.000314	285.065
2440	2166.85	105777.1	23351	85490.0	.000869	275.076	2940	2666.85	133095.8	79435	108651.4	.000308	285.255
2450	2176.85	106313.3	23975	85943.0	.000850	275.295	2950	2676.85	133651.8	81259	109124.3	.000302	285.444
2460	2186.85	106850.0	24613	86396.6	.000831	275.514	2960	2686.85	134208.0	83120	109597.3	.000296	285.632
2470	2196.85	107387.1	25267	86850.6	.000813	275.731	2970	2696.85	134764.6	85018	110070.9	.000290	285.820
2480	2206.85	107924.7	25936	87305.0	.000795	275.949	2980	2706.85	135321.8	86954	110544.8	.000285	286.007
2490	2216.85	108462.8	26620	87759.9	.000778	276.165	2990	2716.85	135878.9	88929	111018.8	.000280	286.194
2500	2226.85	109001.3	27320	88215.2	.000761	276.381	3000	2726.85	136436.7	90942	111493.5	.000274	286.380
2510	2236.85	109540.2	28037	88671.1	.000744	276.596	3010	2736.85	136995.4	92996	111968.1	.000269	286.566
2520	2246.85	110079.6	28769	89127.3	.000728	276.811	3020	2746.85	137555.2	95090	112443.4	.000264	286.751
2530	2256.85	110619.2	29519	89583.8	.000713	277.025	3030	2756.85	138111.4	97226	112918.8	.000259	286.935
2540	2266.85	111159.5	30285	90041.0	.000697	277.238	3040	2766.85	138670.4	99403	113394.6	.000254	287.120
2550	2276.85	111700.3	31069	90498.6	.000682	277.450	3050	2776.85	139229.7	101623	113870.8	.000250	287.303
2560	2286.85	112241.5	31870	90956.7	.000668	277.662	3060	2786.85	139789.4	103888	114347.3	.000245	287.486
2570	2296.85	112783.2	32690	91415.2	.000654	277.873	3070	2796.85	140349.2	106196	114824.0	.000240	287.669
2580	2306.85	113325.1	33528	91873.9	.000640	278.083	3080	2806.85	140909.5	108548	115301.1	.000236	287.851
2590	2316.85	113867.4	34385	92333.1	.000626	278.293	3090	2816.85	141470.0	110946	115778.5	.000232	288.033

APÉNDICE A (continuación)

**Table 16 Water Vapor**

$\bar{m} = 18.0152$

T K	t C	$\bar{c}_p$ J g-mol K	$\bar{c}_v$ J g-mol K	$k = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v}$	$\frac{a}{s}$
100	-173.15	33.301	24.986	1.333	248.0
120	-153.15	33.313	24.999	1.333	271.7
140	-133.15	33.320	25.006	1.333	293.4
160	-113.15	33.327	25.013	1.332	313.7
180	-93.15	33.337	25.022	1.332	332.7
200	-73.15	33.350	25.035	1.332	350.7
250	-23.15	33.426	25.111	1.331	391.9
300	26.85	33.596	25.282	1.329	428.9
350	76.85	33.879	25.564	1.325	462.7
400	126.85	34.262	25.948	1.320	493.7
450	176.85	34.720	26.406	1.315	522.6
500	226.85	35.226	26.912	1.309	549.6
550	276.85	35.764	27.450	1.303	575.1
600	326.85	36.325	28.010	1.297	599.3
650	376.85	36.902	28.588	1.291	622.3
700	426.85	37.495	29.181	1.285	644.3
750	476.85	38.102	29.788	1.279	665.4
800	526.85	38.721	30.407	1.273	685.7
850	576.85	39.350	31.036	1.268	705.3
900	626.85	39.987	31.672	1.263	724.2
950	676.85	40.627	32.312	1.257	742.5
1000	726.85	41.267	32.953	1.252	760.2
1050	776.85	41.905	33.590	1.248	777.5
1100	826.85	42.536	34.221	1.243	794.4
1150	876.85	43.158	34.843	1.239	810.8
1200	926.85	43.768	35.453	1.235	826.9
1300	1026.85	44.945	36.630	1.227	858.0
1400	1126.85	46.054	37.740	1.220	888.0
1500	1226.85	47.090	38.776	1.214	916.9
1600	1326.85	48.050	39.736	1.209	945.0
1700	1426.85	48.935	40.621	1.205	972.2
1800	1526.85	49.749	41.434	1.201	998.7
1900	1626.85	50.495	42.181	1.197	1024.6
2000	1726.85	51.180	42.866	1.194	1049.8
2100	1826.85	51.809	43.494	1.191	1074.5
2200	1926.85	52.387	44.073	1.189	1098.6
2300	2026.85	52.921	44.607	1.186	1122.2
2400	2126.85	53.414	45.100	1.184	1145.4
2500	2226.85	53.873	45.559	1.182	1168.1
2600	2326.85	54.301	45.986	1.181	1190.3
2700	2426.85	54.702	46.388	1.179	1212.2
2800	2526.85	55.080	46.765	1.178	1233.7
2900	2626.85	55.437	47.123	1.176	1254.8
3000	2726.85	55.778	47.464	1.175	1275.6
3100	2826.85	56.103	47.789	1.174	1296.0
3200	2926.85	56.416	48.101	1.173	1316.1
3300	3026.85	56.718	48.403	1.172	1335.9
3400	3126.85	57.010	48.696	1.171	1355.4
3500	3226.85	57.295	48.981	1.170	1374.6
3600	3326.85	57.573	49.259	1.169	1393.5

## APÉNDICE A (continuación)

## SYMBOLS AND UNITS USED IN TABLES

- $a$  velocity of sound =  $\sqrt{kRT/\bar{m}}$ ,  $\text{m s}^{-1}$   
 $\bar{c}_p$  specific heat at constant pressure,  $\text{J K}^{-1} \text{g mol}^{-1}$   
 $\bar{c}_v$  specific heat at constant volume,  $\text{J K}^{-1} \text{g mol}^{-1}$   
 $h$  enthalpy per mole,  $\text{J g mol}^{-1}$   
 $k$   $\bar{c}_p/\bar{c}_v$   
 $\bar{m}$  molecular weight,  $\text{g g mol}^{-1}$   
 $p_r$  relative pressure\*  
 $R$  universal gas constant =  $8.31441 \text{ J K}^{-1} \text{ g mol}^{-1}$   
 $T$  temperature,  $\text{K}$   
 $t$  temperature,  $^{\circ}\text{C}$   
 $\bar{u}$  internal energy per mole,  $\text{J g mol}^{-1}$   
 $v_r$  relative volume\*  
 $\bar{\phi}$   $\int_{T_b}^T \frac{\bar{c}_p}{T} dT$ ,  $\text{J K}^{-1} \text{ g mol}^{-1}$

\*The ratio of the pressures  $p_a$  and  $p_b$  corresponding to the temperatures  $T_a$  and  $T_b$ , respectively, along a given isentropic is equal to the ratio of the relative pressures  $p_{r,a}$  and  $p_{r,b}$  as tabulated for  $T_a$  and  $T_b$ , respectively. Thus

$$\left(\frac{p_a}{p_b}\right)_{s=\text{constant}} = \frac{p_{r,a}}{p_{r,b}}$$

Similarly

$$\left(\frac{v_a}{v_b}\right)_{s=\text{constant}} = \frac{v_{r,a}}{v_{r,b}}$$

# APÉNDICE B



## ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL QUEMADOR DE HIDRÓGENO

### DATOS DE ENTRADA DEL QUEMADOR DE GAS L.P.

Uso promedio diario del quemador (hr/día) 7 45  
 Tamaño del tanque de almacenamiento (Kg): 300  
 Gasto promedio mensual del Gas L.P. (Kg/mes) 80

Requerimiento calorífico mensual del quemador (W): 574.8197  
 Gasto másico de hidrógeno por segundo (g H<sub>2</sub>/s): 0.004754  
 Gasto másico de hidrógeno al mes (Kg de H<sub>2</sub>/mes): 1.062553

T (°K)	T (°C)	H <sub>masa</sub> aire aire	H <sub>masa</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>masa</sub> H <sub>2</sub> O	X	Y	Z	R <sub>w</sub>
300	26.85	300.43	8737.6	9966.1	4056.89	0.0002	170181.1	58764.0
310	36.85	310.48	9031.7	10302.4	675.58	0.0015	28256.4	9785.8
320	46.85	320.53	9326.4	10639.0	368.20	0.0027	15354.7	5333.4
330	56.85	330.59	9621.6	10976.3	252.86	0.0039	10513.2	3662.6
340	66.85	340.66	9917.5	11314.0	192.42	0.0052	7976.5	2787.2
350	76.85	350.73	10214.1	11652.7	155.25	0.0064	6416.5	2248.8
360	86.85	360.81	10511.4	11991.5	130.06	0.0076	5359.2	1884.0
370	96.85	370.91	10809.5	12331.5	111.85	0.0089	4594.8	1620.2
380	106.85	381.01	11108.4	12672.0	98.09	0.0101	4017.3	1420.9
390	116.85	391.12	11408.2	13013.5	87.32	0.0113	3565.3	1264.9
400	126.85	401.25	11708.8	13355.6	78.66	0.0126	3201.5	1139.3
410	136.85	411.38	12010.3	13698.7	71.54	0.0138	2902.9	1036.3
420	146.85	421.54	12312.8	14042.6	65.59	0.0150	2652.9	950.0
430	156.85	431.70	12616.2	14387.6	60.54	0.0163	2440.9	876.9
440	166.85	441.88	12920.5	14733.3	56.19	0.0175	2258.7	814.0
450	176.85	452.07	13225.9	15080.1	52.42	0.0187	2100.4	759.4
460	186.85	462.28	13532.2	15427.8	49.12	0.0200	1961.6	711.5
470	196.85	472.51	13839.6	15776.4	46.19	0.0212	1838.8	669.1
480	206.85	482.76	14147.9	16126.2	43.59	0.0224	1729.5	631.3
490	216.85	493.02	14457.3	16476.6	41.25	0.0237	1631.6	597.6
500	226.85	503.30	14767.7	16828.4	39.15	0.0249	1543.3	567.1
510	236.85	513.60	15079.1	17781.3	37.15	0.0262	1459.3	538.1
520	246.85	523.93	15391.6	17535.2	35.51	0.0274	1390.4	514.3
530	256.85	534.27	15705.0	17889.9	33.92	0.0286	1323.9	491.4
540	266.85	544.63	16019.5	18246.1	32.47	0.0299	1262.8	470.3

T (°K)	T (°C)	$H_{\text{max}}$ air air	$H_{\text{max}}$ O <sub>2</sub>	$H_{\text{max}}$ H <sub>2</sub> O	X	Y	Z	R <sub>2</sub>
550	276.85	555.01	16335.0	18603.1	31.13	0.0311	1206.5	450.9
560	286.85	565.42	16651.5	18961.3	29.89	0.0324	1154.5	432.9
570	296.85	575.84	16969.0	19320.6	28.74	0.0336	1106.3	416.3
580	306.85	586.29	17287.4	19681.0	27.67	0.0349	1061.5	400.8
590	316.85	596.77	17606.9	20042.6	26.68	0.0361	1019.7	386.4
600	326.85	607.26	17927.3	20405.3	25.75	0.0374	980.8	373.0
610	336.85	617.78	18248.7	20769.1	24.88	0.0386	944.2	360.4
620	346.85	628.32	18571.0	21134.1	24.06	0.0399	910.0	348.5
630	356.85	638.89	18894.3	21500.2	23.29	0.0412	877.8	337.4
640	366.85	649.47	19218.4	21867.4	22.57	0.0424	847.4	327.0
650	376.85	660.09	19543.5	22235.8	21.89	0.0437	818.8	317.1
660	386.85	670.72	19869.5	22605.6	21.25	0.0450	791.8	307.7
670	396.85	681.38	20196.3	22976.2	20.64	0.0462	766.2	298.9
680	406.85	692.07	20524.0	23348.2	20.06	0.0475	741.9	290.5
690	416.85	702.78	20852.6	23721.4	19.51	0.0488	718.8	282.6
700	426.85	713.51	21182.0	24095.7	18.99	0.0500	696.9	275.0
710	436.85	724.27	21512.2	24471.3	18.49	0.0513	676.1	267.8
720	446.85	735.05	21843.2	24848.1	18.02	0.0526	656.2	261.0
730	456.85	745.85	22175.0	25226.0	17.57	0.0539	637.3	254.4
740	466.85	756.68	22507.6	25605.3	17.13	0.0551	619.2	248.2
750	476.85	767.53	22841.0	25985.7	16.72	0.0564	601.9	242.2
760	486.85	778.41	23175.1	26367.3	16.33	0.0577	585.3	236.5
770	496.85	789.31	23509.9	26750.2	15.95	0.0590	569.5	231.0
780	506.85	800.23	23845.5	27134.3	15.59	0.0603	554.3	225.8
790	516.85	811.18	24181.8	27519.7	15.24	0.0616	539.7	220.8
800	526.85	822.15	24518.8	27906.2	14.91	0.0629	525.7	215.9
810	536.85	833.15	24856.5	28293.9	14.59	0.0642	512.2	211.3
820	546.85	844.16	25194.8	28683.2	14.28	0.0655	499.3	206.8
830	556.85	855.20	25533.8	29073.4	13.98	0.0668	486.8	202.5
840	566.85	866.26	25873.4	29465.2	13.70	0.0680	474.8	198.4
850	576.85	877.35	26213.7	29858.1	13.42	0.0694	463.3	194.4
860	586.85	888.45	26554.6	30252.1	13.15	0.0707	452.1	190.5
870	596.85	899.58	26896.1	30647.5	12.90	0.0720	441.4	186.8
880	606.85	910.73	27238.2	31044.0	12.65	0.0733	431.0	183.2
890	616.85	921.90	27580.9	31442.2	12.41	0.0746	420.9	179.8
900	626.85	933.10	27924.2	31843.6	12.18	0.0759	411.2	176.4
910	636.85	944.31	28268.0	32241.9	11.96	0.0772	401.8	173.2
920	646.85	955.55	28612.4	32643.6	11.74	0.0785	392.7	170.0
930	656.85	966.80	28957.3	33046.8	11.53	0.0798	383.9	167.0
940	666.85	978.08	29302.8	33451.0	11.33	0.0811	375.4	164.1
950	676.85	989.38	29648.8	33856.7	11.13	0.0824	367.2	161.2

T (K)	T (°C)	H <sub>2</sub> air	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	X	Y	Z	R <sub>1</sub>
960	686.85	1000.69	29995.2	34263.7	10.94	0.0838	359.1	158.5
970	696.85	1012.03	30342.2	34671.8	10.75	0.0851	351.4	155.8
980	706.85	1023.39	30689.7	35081.3	10.57	0.0864	343.8	153.2
990	716.85	1034.66	31037.7	35492.1	10.40	0.0877	336.6	150.7
1000	726.85	1046.16	31386.2	35904.1	10.23	0.0890	329.4	148.2
1010	736.85	1057.57	31735.1	36317.5	10.07	0.0904	322.5	145.8
1020	746.85	1069.01	32084.5	36732.0	9.91	0.0917	315.8	143.5
1030	756.85	1080.46	32434.3	37147.8	9.75	0.0930	309.2	141.2
1040	766.85	1091.93	32784.6	37565.0	9.60	0.0944	302.9	139.0
1050	776.85	1103.41	33135.3	37983.4	9.45	0.0957	296.7	136.9
1060	786.85	1114.92	33486.4	38403.1	9.31	0.0970	290.7	134.8
1070	796.85	1126.44	33838.0	38823.9	9.17	0.0984	284.8	132.8
1080	806.85	1137.98	34190.0	39246.1	9.03	0.0997	279.1	130.8
1090	816.85	1149.54	34542.4	39669.7	8.90	0.1010	273.5	128.9
1100	826.85	1161.11	34895.2	40094.4	8.77	0.1024	268.1	127.0
1110	836.85	1172.70	35248.4	40520.5	8.64	0.1037	262.8	125.2
1120	846.85	1184.31	35601.9	40947.5	8.52	0.1050	257.6	123.4
1130	856.85	1195.93	35955.9	41376.0	8.40	0.1064	252.6	121.7
1140	866.85	1207.57	36310.2	41805.7	8.28	0.1077	247.7	120.0
1150	876.85	1219.23	36664.9	42236.8	8.17	0.1091	242.9	118.3
1160	886.85	1230.90	37020.0	42669.0	8.06	0.1104	238.2	116.7
1170	896.85	1242.58	37375.4	43102.3	7.95	0.1118	233.6	115.1
1174	900.85	1247.26	37517.7	43276.1	7.91	0.1123	231.8	114.5
1180	906.85	1254.28	37731.2	43537.0	7.84	0.1131	229.1	113.6
1190	916.85	1266.00	38087.3	43972.9	7.74	0.1144	224.8	112.1
1200	926.85	1282.43	38586.2	44585.1	7.60	0.1163	218.8	110.0
1210	936.85	1294.18	38943.5	45023.8	7.50	0.1177	214.7	108.6
1220	946.85	1305.94	39300.6	45463.8	7.40	0.1190	210.6	107.2
1230	956.85	1317.72	39658.3	45905.0	7.31	0.1204	206.7	105.8
1240	966.85	1329.52	40016.3	46347.2	7.21	0.1217	202.8	104.5
1250	976.85	1341.33	40374.5	46190.9	7.14	0.1228	199.8	103.5
1260	986.85	1353.15	40733.0	47235.5	7.03	0.1245	195.3	101.9
1270	996.85	1364.98	41091.9	47681.3	6.95	0.1258	191.6	100.6
1280	1006.85	1372.09	41307.5	47949.5	6.90	0.1266	189.5	99.9
1290	1016.85	1383.95	41666.9	48397.3	6.81	0.1280	186.0	98.7
1300	1026.85	1395.81	42026.6	48846.1	6.73	0.1294	182.5	97.5
1310	1036.85	1407.70	42386.6	49296.0	6.65	0.1307	179.1	96.3
1320	1046.85	1419.59	42746.9	49747.3	6.57	0.1321	175.8	95.2
1330	1056.85	1431.50	43107.5	50199.5	6.49	0.1334	172.6	94.1
1340	1066.85	1443.42	43468.3	50652.8	6.42	0.1348	169.4	93.0
1350	1076.85	1455.35	43829.5	51107.5	6.34	0.1362	166.3	91.9

T (K)	T (°C)	H <sub>2</sub> airé	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	X	Y	Z	R <sub>2</sub>
1360	1086.85	1467.29	44191.0	51563.1	6.27	0.1375	163.2	90.8
1370	1096.85	1479.25	44552.7	52019.8	6.20	0.1389	160.2	89.8
1371	1097.85	1480.44	44588.8	52065.5	6.19	0.1390	159.9	89.7
1372	1098.85	1481.64	44625.0	52111.2	6.19	0.1392	159.6	89.6
1373	1099.85	1482.84	44661.2	52157.0	6.18	0.1393	159.3	89.5
1374	1100.85	1484.03	44697.4	52202.8	6.17	0.1394	159.0	89.4
1375	1101.85	1485.23	44733.6	52248.6	6.16	0.1396	158.7	89.3
1376	1102.85	1486.43	44769.8	52294.4	6.16	0.1397	158.4	89.2
1377	1103.85	1487.62	44806.0	52340.2	6.15	0.1399	158.1	89.1
1378	1104.85	1488.82	44842.2	52386.0	6.14	0.1400	157.8	89.0
1379	1105.85	1490.02	44878.4	52431.8	6.14	0.1401	157.6	88.9
1380	1106.85	1491.21	44914.7	52477.7	6.13	0.1403	157.3	88.8
1390	1116.85	1503.19	45277.0	52936.5	6.08	0.1416	154.4	87.8
1400	1126.85	1515.18	45639.6	53396.6	5.99	0.1430	151.5	86.8



# APÉNDICE C

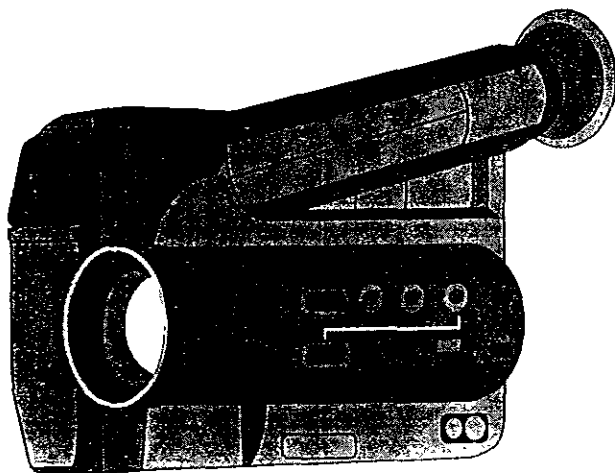




IMAGEN 1: Estufa de leña.

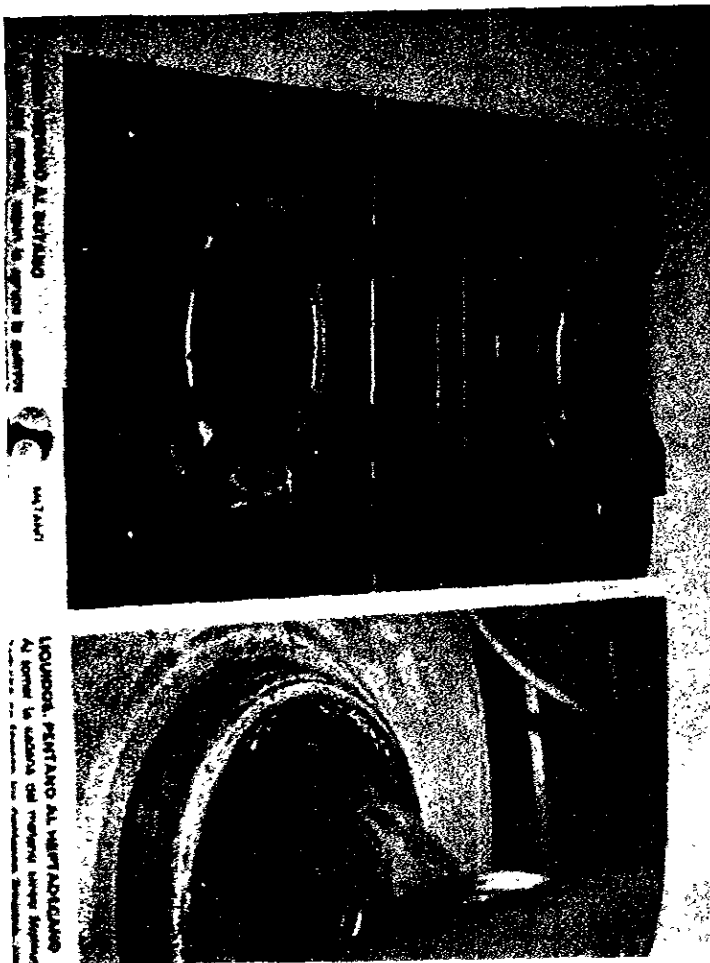


IMAGEN 2: Estufa doméstica que muestra la flama de metano y butano.

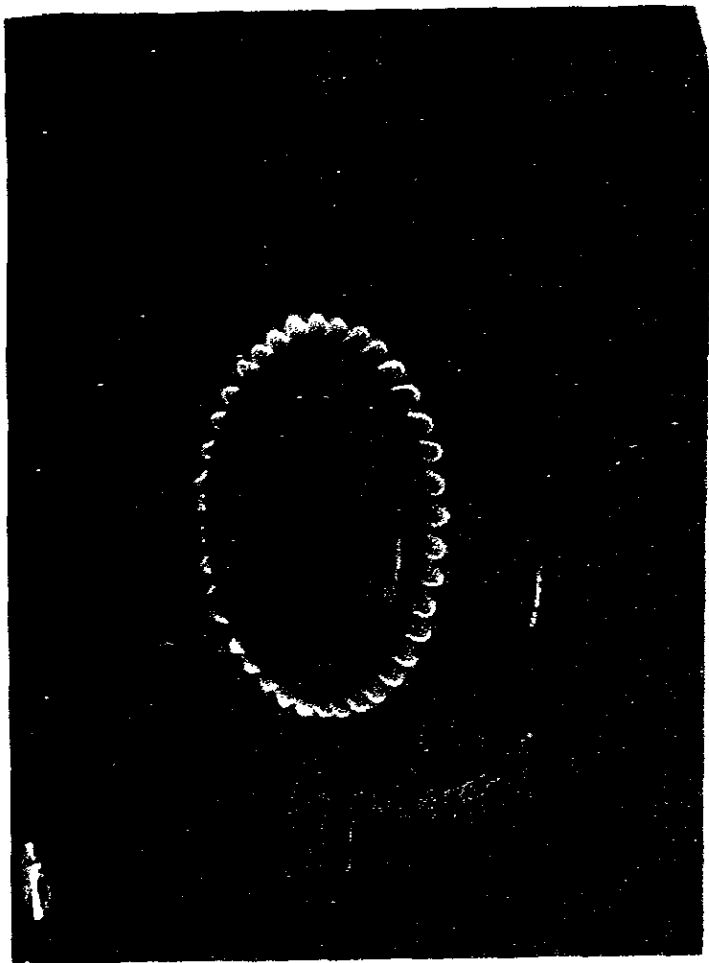


IMAGEN 3: Ejemplo de un quemador de inducción atmosférica de una estufa convencional de dos piezas.

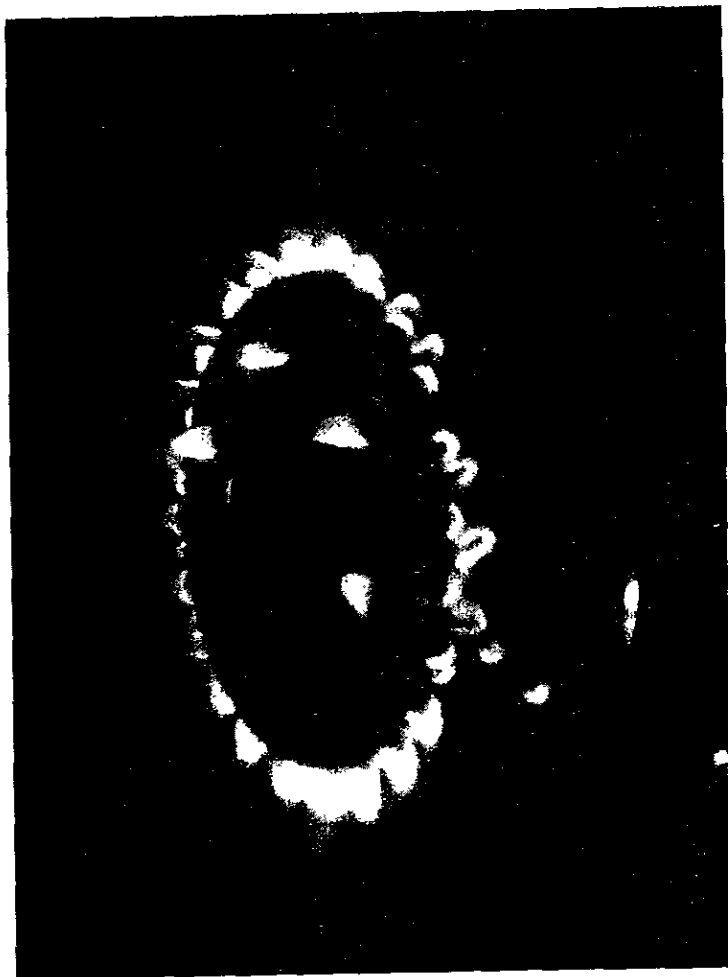


IMAGEN 4: Ejemplo de un quemador de inducción atmosférica de una sola pieza.

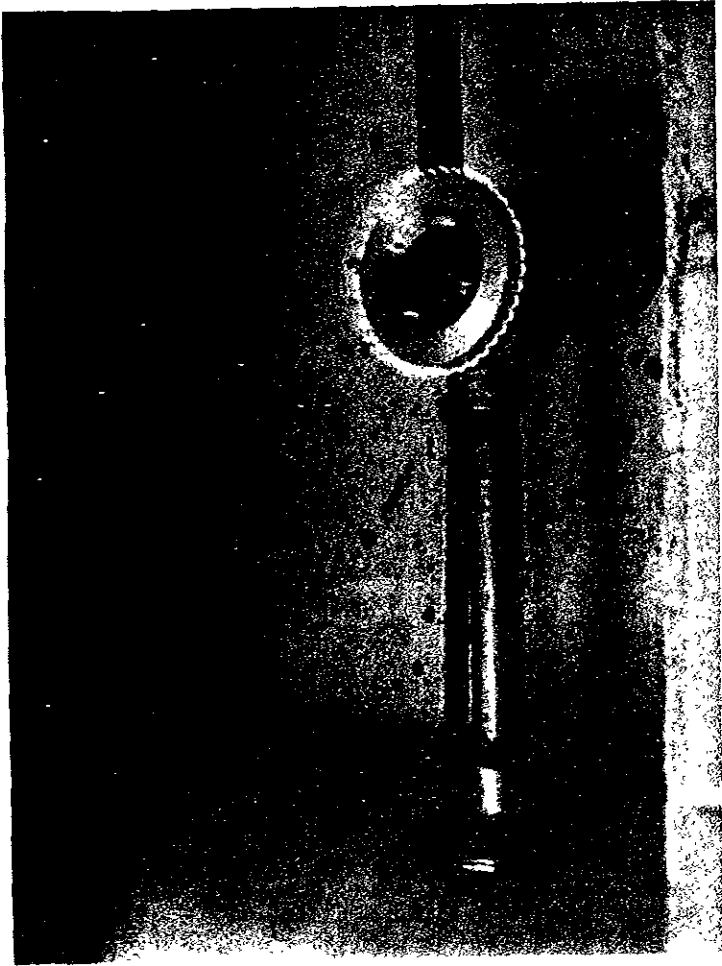


IMAGEN 5: Quemador circular de inducción atmosférica de cuatro piezas desarmables, para uso doméstico.

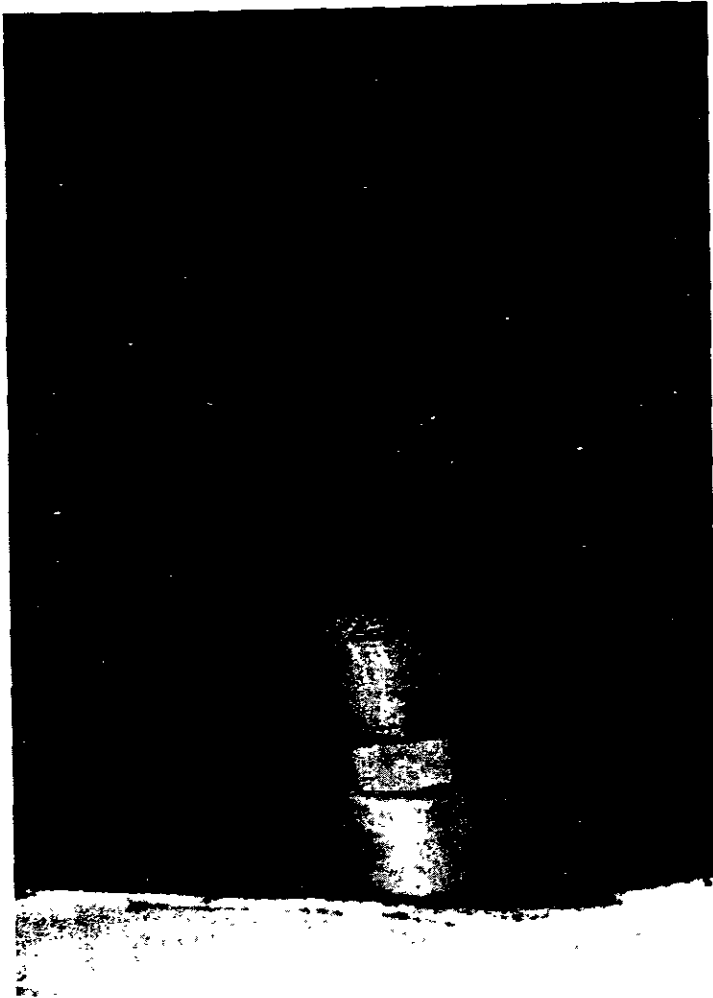


IMAGEN 6: Vista de la boquilla de salida del gas de una estufa convencional.



IMAGEN 7: Vista de la entrada de la placa reguladora de aire y válvula de flujo de un quemador tipo estrella, de uso comercial y doméstico.



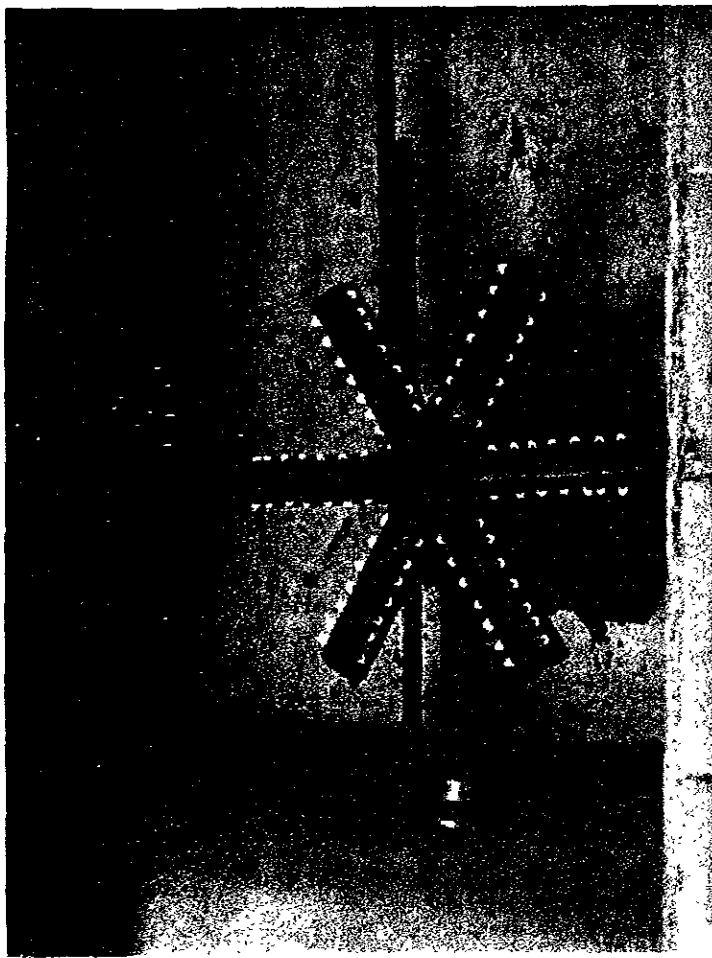


IMAGEN 8: Quemador tipo estrella de inducción atmosférica de uso comercial y doméstico.



IMAGEN 9: Quemador de inducción atmosférica sin placa reguladora de aire, para uso comercial.



IMAGEN 10: Quemador de gas L.P. para calentador de agua de encendido automático.

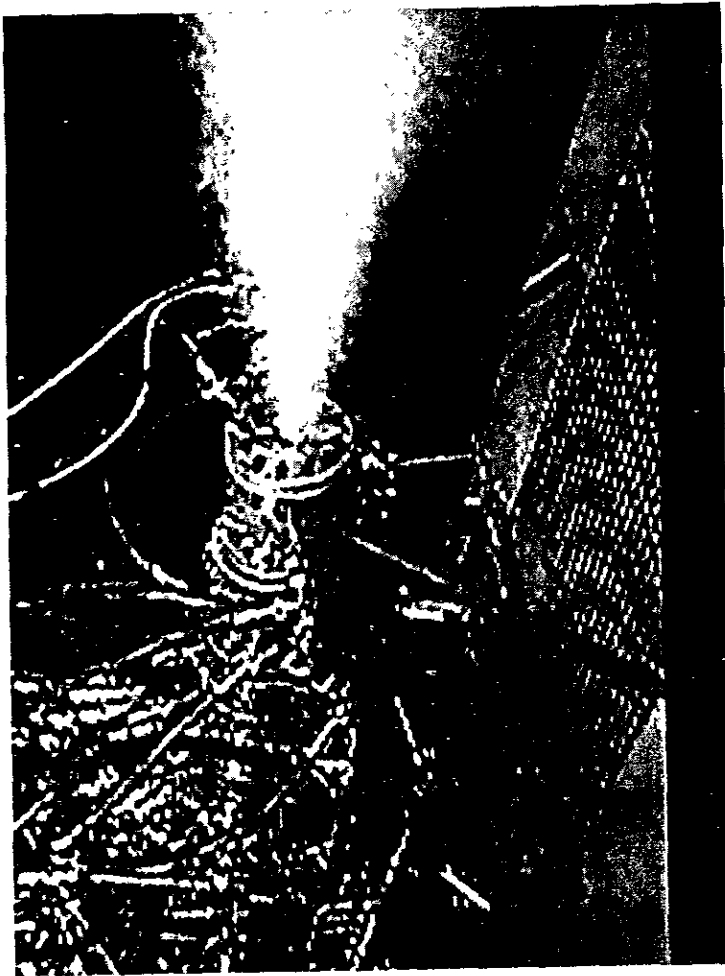
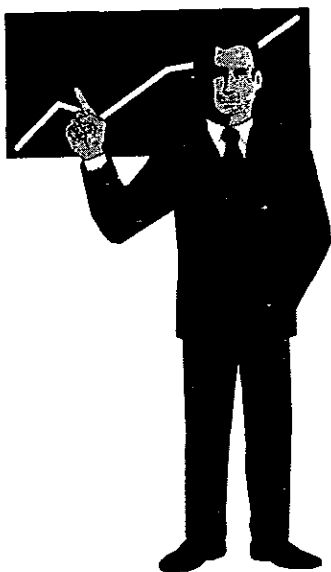


IMAGEN 11: Generador de vapor a partir de hidrógeno y oxígeno.



IMAGEN 12: Recipiente de almacenamiento de hidrógeno líquido que muestra las capas de aluminio tipo termoforrado; para un automóvil BMW de combustión interna a base de hidrógeno.

# APÉNDICE D



## APÉNDICE D

## DATOS ESTADÍSTICOS DEL USO DE LA ESTUFA

Día del mes	Horas de uso por la mañana.	Horas de uso por la tarde.	Horas de uso por la noche.	Total de horas al día.
1	2.5	2	2	6.5
2	3	3	2.5	8.5
3	3	3	1	7
4	3	2	1.5	6.5
5	2	2	2.5	6.5
6	3.5	3.5	3	10
7	2	2	2	6
8	3	3	2.5	8.5
9	3.5	2.5	2.5	8.5
10	3	3.5	2.5	9
11	3.5	4	2	9.5
12	2.5	3	2	7.5
13	4	3	2	9
14	2	3	2.5	7.5
15	2.5	2	2	6.5
16	2	3	2.5	7.5
17	3	2	3	8
18	3	2	2	7
19	3	1.5	2	6.5
20	2	2.5	2	6.5
21	1.5	2	2	5.5
22	3.5	2.5	2	8
23	3	2	2	7
24	4.5	3	2	9.5
25	3	1	2	6
26	2	2	1.5	5.5
27	3	2	2.5	7.5
28	2	3.5	2.5	8
29	3	2.5	1	6.5
30	4	2	1.5	7.5
Suma total.				223.5
Horas promedio al día = (Suma total) / (30)				7.45

Tipo de residencia: Convencional de 1 planta.

Numero de personas que habitan la casa: 5

Capacidad del tanque de almacenamiento de gas L.P.: 300 Kg

Caudal másico de consumo mensual promedio 80 Kg

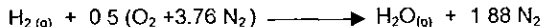
Forma de consumo: 40 Kg/mes (Servicio de agua caliente)

40 Kg/mes (Cocción de alimentos y Potabilización de agua)

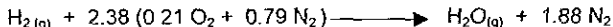
**TEMPERATURA DE FLAMA DEL HIDRÓGENO EN AIRE**

La siguiente secuencia de cálculo se realizó con base en las tablas de entalpías del Apéndice A (*Keenan Chao, Gas Tables*), ya que están fundamentadas en siete constantes experimentales para determinar el Cp, esto hace el cálculo más aproximado.

Partiendo de la ecuación de combustión hidrógeno-aire en cantidades estequiométricas



En por ciento mol.



Aplicando la ecuación 3.16, para una reacción de combustión en términos de entalpía total para cada componente:

$$\overline{H}^0_{H_2O} + \overline{H}^0_{H_2} + 1.88(\overline{H}^0_{N_2}) = \overline{H}^0_{H_2O} + 1.88(\overline{H}^0_{N_2}) + 2.38(\overline{H}^0_{O_2} + 0.79\overline{H}^0_{N_2})$$

Sustituyendo el valor de las entalpías a 25°C y 1 atm.

$$\{(-241\ 818\text{KJ/Kg mol} + \overline{H}(T) - \overline{H}^0(25^\circ\text{C}))\}_{H_2O} + \{1.88(\overline{H}(T) - \overline{H}^0(25^\circ\text{C}))\}_{N_2} = 0$$

Acomodando términos.

$$\overline{H}(T)_{H_2O} + 1.88 \overline{H}(T)_{N_2} = 241\ 818\ \text{KJ/Kg mol} + \overline{H}^0(25^\circ\text{C})_{H_2O} + 1.88 \overline{H}^0(25^\circ\text{C})_{N_2}$$

Sustituyendo los valores de las entalpías del agua y el nitrógeno a 25°C

$$\overline{H}(T)_{H_2O} + 1.88 \overline{H}(T)_{N_2} = 241\ 818\ \text{KJ/Kg mol} + 9903.94\ \text{KJ/Kg mol} + 1.88(8669\ \text{KJ/Kg mol})$$

$$\overline{H}(T)_{H_2O} + 1.88 \overline{H}(T)_{N_2} = 268\ 019.66\ \text{KJ/kg mol}$$

Para determinar la temperatura de flama se iteran valores de entalpías del agua y del nitrógeno en la ecuación de arriba, hasta que se cumpla la igualdad, esto reporta una cierta temperatura la cual es la temperatura de flama de la mezcla hidrógeno-aire. Estos valores de entalpías también se reportan en las tablas del apéndice A.

$$\overline{H}(2252^\circ\text{C})_{H_2O} = 110357.49\ \text{KJ/Kg mol}$$

$$\overline{H}(2252^\circ\text{C})_{N_2} = 83873.39\ \text{KJ/Kg mol}$$

$$110357.49\ \text{KJ/Kg mol} + 1.88(83873.39\ \text{KJ/Kg mol}) = 268\ 039.46\ \text{KJ/Kg mol}$$

$$268\ 019.66\ \text{KJ/Kg mol} \approx 268\ 039.46\ \text{KJ/Kg mol}$$

De esta igualdad se concluye que la temperatura de flama de una mezcla estequiométrica hidrógeno-aire es de 2252°C



## CAUDAL MÁSSICO DE AIRE A TRAVÉS DEL VÉNTURI

En flujo de gases, la descarga de fluidos compresibles en toberas puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

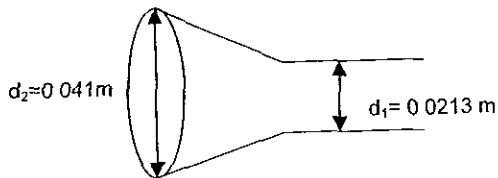
$$q = Y C A (2 \Delta P / \rho)^{1/2}$$

En donde el factor  $Y$  es el factor de expansión neto y es función de:

1. La relación de calores específicos  $K$ .
2. La relación ( $\beta$ ) entre el orificio o diámetro de la garganta y el diámetro de entrada.
3. Relación entre las presiones absolutas de salida y entrada.

El factor  $Y$  ha sido determinado experimentalmente por varios autores para el aire, que tiene una relación de calores específicos de  $Y=1.4$ .

El coeficiente de flujo  $C$  depende del  $NRe$  y de la relación de diámetros  $\beta$ :



$$\beta = d_1/d_2 = 0.0213 / 0.041 = 0.5195$$

$$NRe = D v \rho / \mu = (0.041)(0.5728)(1.18) / (1.56E-5) = 1776.41$$

$$C = 0.75$$

La presión diferencial  $\Delta P$  es igual a la presión manométrica a la entrada

$$\Delta P = 101302.2743 \text{ N/m}^2 \text{ viene de la ec. 4.7}$$

Area transversal al flujo

$$A = \pi r^2 = \pi(0.041/2)^2 = 1.320E-3 \text{ m}^2$$

Sustituyendo datos en la ecuación inicial para toberas:

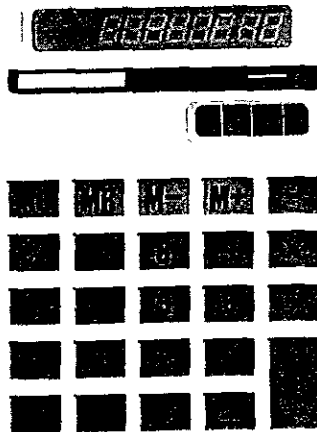
$$q = Y C A (2 \Delta P / \rho)^{1/2} = (1.4)(0.75)(1.320E-3) (2)(101302.2743/1.18)^{1/2} = 0.5743 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q = 0.667 \text{ Kg/s} \quad \text{Caudal de aire a través del Vénturi.}$$

\* CRANE Flujo de fluidos. McGraw-Hill. México, 1989

# APÉNDICE E

---

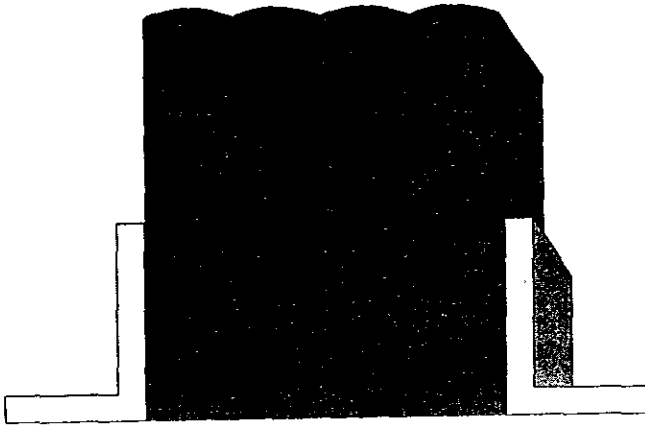


## FACTORES DE CONVERSIÓN

CANTIDAD	CONVERSIÓN
LONGITUD	$1\text{ m} = 100\text{ cm}$ $= 3.28084\text{ ft}$ $= 39.3701\text{ in}$
MASA	$1\text{ Kg} = 10^3\text{ g}$ $= 2.20462\text{ lb}_m$
FUERZA	$1\text{ N} = 1\text{ Kg m} / \text{s}^2$ $= 10^5\text{ dyne}$ $= 0.224809\text{ lb}_f$
PRESIÓN	$1\text{ bar} = 10^5\text{ N m}^{-2}$ $= 10^5\text{ Pa}$ $= 0.986923\text{ atm}$ $= 14.5038\text{ psi}$ $= 750.061\text{ torr}$ $1\text{ atm} = 14.70\text{ lb/in}^2$ $= 1.013 \cdot 10^5\text{ N/m}^2$
VOLUMEN	$1\text{ m}^3 = 10^6\text{ cm}^3$ $= 35.3147\text{ ft}^3$
DENSIDAD	$1\text{ g cm}^{-3} = 10^3\text{ Kg / m}^3$ $= 62.4278\text{ lb}_m / \text{ft}^3$
ENERGÍA	$1\text{ J} = 1\text{ N m}$ $= 9.86923\text{ cm}^3 (\text{atm})$ $= 0.239006\text{ cal}$ $= 5.12197 \cdot 10^{-3} (\text{ft})^3 (\text{psia})$ $= 0.737562 (\text{ft})(\text{lb}_f)$ $= 9.47831 \cdot 10^{-4}\text{ Btu}$ $1\text{ KW/hr} = 3.6 \cdot 10^6\text{ J}$
VISCOSIDAD	$1\text{ cp} = 2.089 \cdot 10^{-3}\text{ lb s / ft}^2$ $= 0.01\text{ poise}$ $= 10^{-3}\text{ Pa s}$ $= 10^{-3}\text{ N s / m}^2$
POTENCIA	$1\text{ KW} = 10^3\text{ J / s}$ $= 239.006\text{ cal/s}$ $= 737.562 (\text{ft})(\text{lb}_f)/\text{s}$ $= 0.94783\text{ Btu / s}$ $= 1.34102\text{ hp}$

\* Apéndice A de J. M. Smith Van Ness "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química", 4a. ed.  
 Edt. McGraw-Hill México, 1994

# *GLOSARIO*



## GLOSARIO

**Carga volumétrica o térmica:** Es el cociente entre la potencia térmica y el volumen de la cámara de combustión. Se mide en  $\text{Kcal / hm}^3$  (o en  $\text{Kw / m}^3$ ) Cuando la carga térmica es elevada se requiere un material refractario, capaz de resistir la mayor temperatura generada.

**Calor de combustión:** (*heat of combustion*). Calor liberado cuando una sustancia arde por completo en el oxígeno.

**Calor de reacción:** (*heat of reaction*). Cantidad de calor consumido o liberado en una reacción química, como el calor de combustión, el de neutralización, ó formación.

**Coefficiente de difusión:** La relación del flujo molecular de un componente en un fluido o flujo de mezcla hacia el gradiente de concentración del mismo componente en el fluido

**Emisividad:** (*emissivity*). Razón entre la energía radiante emitida por un cuerpo, y la emitida por un cuerpo perfectamente negro. Este último tiene una emisividad de 1; un reflector perfecto, y una emisividad igual a cero

**Impulsión:** Es la fuerza que se ejerce sobre el gas en su descarga y representa la suma de dos términos:

1 - La cantidad de movimiento del gas

2.- La presión estática del gas

La impulsión tiene influencia en la geometría de la llama

**Inflamar:** (*ignite*) Calentamiento de una mezcla gaseosa hasta la temperatura a la que se produce la combustión

**Límites explosivos:** (*explosive limits*) Las concentraciones más baja y más alta de un determinado gas o vapor en mezcla con el aire, y que puede ser encendida a la temperatura y presión ordinarias de la mezcla.

**Límite de flamabilidad:** (Detonabilidad en aire) Indica el rango de mezcla del combustible en el aire a la cual deberá mantenerse encendida.

**Luminiscencia:** (*luminescence*) Emisión de luz producida bajo la acción de procesos biológicos o químicas, o por radiación, o por cualquiera otra causa excepto la alta temperatura a (la que produce incandescencia)

**Mínima energía de ignición:** Es la mínima cantidad de energía necesaria para producir flama en combustible, por ejemplo chispas eléctricas, flama abierta, o superficies calientes

**Modulación de un quemador:** Es la relación entre la potencia térmica máxima y la mínima que un quemador es capaz de proporcionar con un funcionamiento correcto ( llama estable,

combustión completa, etc ) Aunque en ciertos casos puede alcanzar valores muy elevados (50 veces o más) Usualmente no sobrepasa el valor de 5 a 10 veces

**Poder Calorífico:** (*calorific power*). Cantidad de calor liberado cuando un peso unitario o un volumen unitario de combustible se quema completamente

La mayoría de los combustibles comunes contienen hidrógeno que al quemarse, forman agua en los productos y puede aparecer como líquido, el poder calorífico recibe el nombre de Poder Calorífico Superior (PCS) del combustible. Si el agua aparece en fase gaseosa, el poder calorífico se llama Poder Calorífico Inferior (PCI) del combustible La diferencia entre el PCS y el PCI es simplemente la energía asociada a la vaporización del agua que se forma durante la combinación, de esta manera se tiene

$$PCS = PCI + m_{\text{agua}} + h_{\text{lg}}$$

Donde.

$m_{\text{agua}}$  = Cantidad de agua formada durante la combustión (Kg de agua / Kg de combustible)

$h_{\text{lg}}$  = Entalpia de vaporización del agua, (KJ / Kg de agua)

PCS, PCI = (KJ / Kg de combustible)

**Potencia específica:** Es el cociente entre la cantidad de calor suministrada por el quemador (o potencia térmica) y la sección de los orificios de salida del mismo

**Potencia térmica:** Es la cantidad de calor que puede proporcionar un quemador También se denomina caudal térmico o gasto calorífico.

**Punto de ignición:** (*ignition point*) En los sólidos y los líquidos es la temperatura mínima a la que puede producirse la combustión, pero no en forma continua, en los gases combustibles, el punto de explosión.

**Punto de ebullición:** (*boiling point*). Temperatura a la que una sustancia cambia del estado líquido al gaseoso El punto de ebullición del agua es de 100°C Esta expresión se refiere también a la temperatura a la que el petróleo crudo al ser calentado comienza a desprender distintos destilados

**Punto de inflamación :** (*flash point*). La temperatura más baja a la que los vapores procedentes de una superficie líquida pueden ser encendidos por llama abierta

**Temperatura de ignición:** (*ignition temperature*). Temperatura a la que una sustancia tal como un gas se enciende y continúa ardiendo con un adecuado suministro de aire

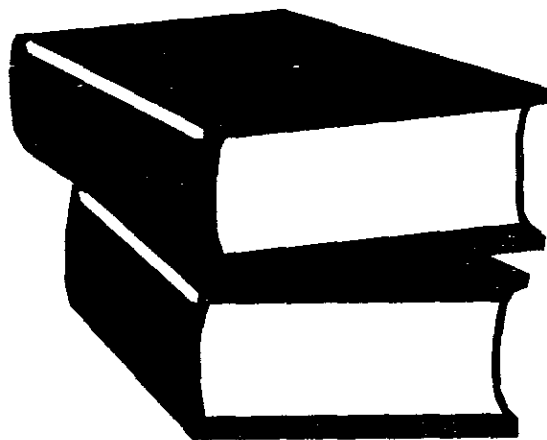
**Tiempo de combustión:** Es el tiempo transcurrido entre el instante en que un volumen infinitesimal de mezcla llega al frente de llama y el momento en que ese mismo volumen se ha quemado totalmente

**Velocidad de difusión:** Se refiere a la velocidad a la cual el combustible se eleva en el aire, y a la cual se difunde a través del mismo. Ambas cantidades reflejan que tan rápido los vapores del combustible se dispersan después de una fuga.

**Velocidad de flama:** (*flame velocity*). Velocidad a la que avanza una flama a lo largo de una mezcla de combustible-aire.

**Velocidad de propagación de flama:** Es la velocidad con la que el límite de la flama (o frente de flama) avanza hacia la mezcla aire-gas que aún no se ha quemado

# REFERENCIAS





## REFERENCIAS DEL CAPITULO 1

- (1) T Nejat Veziroglu, "Hydrogen technology for energy needs of human settlements". *Int J Hydrogen Energy*, Vol. 12, No. 7, 1987, pp. 99-129
- (2) Ruiz-Schwarzer Miguel y Lozano Vicente, "Hidrógeno la fuerza del agua" *Muy Interesante Especial No 8*, 1993.
- (3) M Marschoff Carlos "Las fuentes de energía en el siglo XXI" *Ciencia Hoy Fondo de Cultura Económica* 1a. ed Buenos Aires, Argentina, pp. 93-112, 1992.
- (4) "Tecnologías energéticas del futuro" Foros de Consulta Permanente del Programa Universitario de Energía. UNAM, 2 de Marzo de 1983, pp. 61-68.
- (5) The Merck Index Merck & Co , Inc 11a ed Rahway, N J, USA, p 759, 1989
- (6) Joan M. Ogden and Robert H. Williams "Solar hydrogen moving beyond fossil fuels" World Resources Institute.

## REFERENCIAS DEL CAPITULO 2

- (1) Carlos M Marschoff "Las fuentes de energía en el siglo XXI" Edit Fondo de Cultura Económica México, 1992
- (2) Bonne. "Hydrogen fuel for space conditioning of buildings". *Int J Hydrogen Energy* Vol 8, No 4, 1983, pp. 295-299
- (3) THE MERCK INDEX 11a ed. Edit Merck & Co. Inc Rahway, N J, USA, 1989
- (4) Nejat Veziroglu "Hydrogen technology for energy needs of human settlements" *Int J Hydrogen Energy*. vol 12, No 2, 1987, pp. 99-129.
- (5) M. Goodger. "Chemical Energy Resources Alternative fuels". Edit The Mac Millan Press L.T.D. 1980
- (6) Nejat Verizoglu. "Hydrogen . the wonder fuel". *Int J Hydrogen Energy*. Vol 17, No 6, 1987, pp 391-404, 1992
- (7) John A. Dean "Flame Photometry". Edit McGraw-Hill N Y , 1960.
- (8) Barnard and J.N. Brandlely. "Flame and Combustion"
- (9) Joan M Ogden, Rober H Williams "Solar Hydrogen moving beyond fossil fuels" World Resources Institute.
- (10) Hutny and G.K Lee "Improved radiative heat transfer form hydrogen flames" *Int J Hydrogen energy* Vol 16, No 1, pp 47-53., 1991
- (11) Tokio Ohta. "Solar - Hydrogen energy Systems". Edit Pergamon Press 1979
- (12) Robert H Perry "Biblioteca del Ingeniero Químico" 5a ed. Volumen III, Edit McGraw Hill, México, 1986.
- (13) Sastri "Hydrogen - Energy a prophesy come true". *Int J. Hydrogen Energy* Vol 5 , No 4 , 1980
- (14) O M Bockris "Energy the solar-hydrogen alternative" Edit John Wiley & Sons U.S.A 1975
- (15) "Enciclopedia de Energía , Tecnología" Tomo 5 Tecnología de las energías solar, hidráulica, geotérmica y combustibles químicos Publicaciones Marcombo, S.A México, 1989

- (16) Daniel Hunt. "Enciclopedia de Energía, tecnología" Tomo 7 Diccionario de Energía Publicaciones Marcombo, S A México-Barcelona, México, 1984
- (17) Huang Francis. "Ingeniería Termodinámica" Edit Co Editorial Continental, 2a De México, 1994
- (18) B Maxwell "Data Book on Hydrocarbons". 9a De Edit Robert E Krieger Publishing Co Huntington, 1968
- (19) J O' M Bockris "Energy the solar-hydrogen alternative" Edit John Wiley & Sons U S A 1975
- (20) López Cajun, Carlos S. Investigador del IMT "Boletín del IMT en línea" INTERNET Página principal del IMT [www.cre.gob.mx/marco](http://www.cre.gob.mx/marco)
- (21) Smith J M "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química" 4a ed Edit McGraw-Hill. México, 1998.
- (22) Thomas E Dubert "Chemical Engineering Thermodynamics" Edit McGraw-Hill 1985

### REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 3

- (1) Smith J M "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química" 4a ed Edit McGraw-Hill México, 1998
- (2) Keenan, Chao Koye "Gas Tables S I units". Edit Kriger 1992
- (3) Thomas E. Dubert "Chemical Engineering Thermodynamics" Edit McGraw-Hill 1985
- (4) Huang F. Francis "Ingeniería Termodinámica Fundamentos y Aplicaciones" 2 ed Edit CECSA México, 1994.
- (5) T Nejat Veziroglu "Hydrogen technology for energy needs of human settlements" *Int J. Hydrogen Energy*. vol 12, No 2, 1987, pp 99-129.
- (6) Joan M. Ogden, Rober H. Williams "Solar Hydrogen moving beyond fossil fuels" World Resources Institute.
- (7) Handbook of Compressed Gases". Compressed Gas Association Arlington Virginia 3a. ed Edit Van Nostrand Reinhold, New York, 1990
- (8) A F Williams W L Lom "LIQUEFIED PETROLEUM GASES. Guide to Properties Applications and Uses" 2nd. ed Edit Jhon Wiley & Sons N Y U S A 1982
- (9) 'Manual de gas y sus aplicaciones' 2a ed. Edit. SEDIGAS, Barcelona, 1995

## REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 4

- (1) D H France. "Combustion Characteristics of Hydrogen" *Int J Hydrogen Energy* vol 5, 1980, pp 369-374
- (2) "Tecnología de los combustibles" Apéndice A pag 5-393 a la 5-398
- (3) Irving Granet "Fluid Mechanics". 4a. ed Edit. Prentice Hall, U S A, 1989
- (4) Robert L. Mott "Mecánica de Fluidos Aplicada" 4a. ed Edot Prentice Hall, México, 1996
- (5) "Handbook of Compressed Gases" Compressed Gas Association Arlington Virginia 3a ed. Edit Van Nostrand Reinhold, New York, 1990
- (6) "Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías" CRANE Edit McGraw-Hill, México, 1989
- (7) Robert L. Perry "Manual del Ingeniero Químico" Tomo VI, 2a ed Edit. MacGraw-Hill, México, 1985

## REFERENCIAS DEL CAPÍTULO 5

- (1) J. O' M Bockris "Energy the solar-hydrogen alternative" Edit. John Wiley & Sons U S A 1975
- (2) Joan M. Ogden and Robert H. Williams "Solar hydrogen moving beyond fossil fuels" World Resources Institute
- (3) "Handbook of Compressed Gases" Compressed Gas Association Arlington Virginia 3a ed. Edit Van Nostrand Reinhold, New York, 1990
- (4) A F Williams, W L Lom "LIQUEFIED PETROLEUM GASES. Guide to Properties Applications and Uses." 2nd ed. Edit Jhon Wiley & Sons. N Y. U S A, 1982
- (5) Sastri "Hydrogen - Energy a prophesy come true". *Int J. Hydrogen Energy* Vol. 5 , No 4 , 1980