

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ARAGON**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

150



**MANUAL DE LABORATORIO  
DE LA UNIDAD DE COMBUSTION**

Sist. 29236

**tesis**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
PRESENTAN**

**AGUSTIN FIGUEROA CARDENAS  
GUSTAVO MANZANARES HERNANDEZ**



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.

MANUAL DE LABORATORIO

DE LA UNIDAD DE

COMBUSTION CONTINUA

# C O N T E N I D O

Página Número

## CAPITULO 1

### INTRODUCCION

9

## CAPITULO 2

### LA COMBUSTION

2.1. Resumen histórico	13
2.2. Química de la combustión	14
2.3. Termodinámica de la combustión	21
2.4. Combustibles	31

## CAPITULO 3

### DESCRIPCION DEL EQUIPO

3.1. Suministro de aire	39
3.2. Suministro de combustible	42
3.3. Quemador, cámara de combustión y chimenea	45
3.4. Sistema eléctrico de arranque y protección	57
3.5. Sistema de agua de enfriamiento	57
3.6. Bastidor	59

## CAPITULO 4

### INSTALACION DEL EQUIPO

4.1. Características del local	63
4.2. Suministros	63
4.3. Ubicación del equipo en el laboratorio	68

## CAPITULO 5

### OPERACION DEL EQUIPO

5.1. Arranque del equipo con combustible gaseoso	73
5.2. Arranque del equipo con combustible líquido	75
5.3. Falla de flama durante la operación	77
5.4. Paro del equipo	77
5.5. Manejo del equipo accesorio	78

## CAPITULO 6

### PRACTICAS CON EL EQUIPO

6.1. Campo de regulación	92
6.2. La relación estequiométrica	99
6.3. Análisis de los productos de la combustión	101
6.4. Comparación de la combustión de combustibles líquidos	108
6.5. Comparación de la combustión de combustibles gaseosos	110
6.6. Balance térmico	113
6.7. Uso de aislamientos en la camisa de agua	117
6.8. Radiación de la flama y transferencia de calor	119
6.9. Medición de temperaturas	121

CAPITULO 7

MANTENIMIENTO

7.1. Mantenimiento del motoventilador	125
7.2. Manómetro diferencial para medición de flujo de aire	128
7.3. Quemador	129
7.4. Manómetro de presión de gas	140
7.5. Cámara de combustión	140
7.6. Misceláneos	141
7.7. Analizador de gases de Orsat	141

APENDICE

145

BIBLIOGRAFIA

155



# CAPITULO I

## 1. INTRODUCCION

Debido a la importancia que tiene el estudio de la combustión la Escuela - Nacional de Estudios Profesionales de Aragón adquirió un equipo de manufactura- inglesa con el propósito de enriquecer y ampliar los conocimientos teóricos ad- quiridos por el estudiante en relación a la combustión y a fenómenos ligados a- ésta tales como: la transferencia de calor, el análisis de los productos de - reacción, los efectos de la relación aire combustible entre los más importantes, incluyendo además el manejo de instrumentos como pirómetros, caudalímetros, a- nalizador de gases, etc.

La Unidad de Combustión Continua se halla localizada dentro del Laborato-- rio de Máquinas Térmicas perteneciente a la sección de Térmica y Fluidos de la- Escuela de Ingeniería. Su nombre se debe a que se trata de un sistema en el que se quema combustible en forma de flama mantenida en condiciones estables, a di- ferencia de los equipos en los que se prueba la combustión por explosión o deto- nación (como los calorímetros).

Con el objetivo de ayudar al instructor de laboratorio y al estudiante en- la utilización de la Unidad se concibió la idea de crear el " Manual de Labora- torio de la Unidad de Combustión Continua " en el cual se ha recabado la infor- mación necesaria para obtener de ella su máximo aprovechamiento así como las - condiciones de seguridad indispensables en su manejo.

A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de los ca- pítulos de este trabajo.

En el capítulo 2 se tratan temas tales como el desarrollo del aprovechamien- to de la energía calorífica derivada de la combustión a través de la historia; la química de la combustión entendiéndola ésta como una reacción química; la ter- modinámica de la combustión, sección en la cual se estudian formas de evalua--- ción de la energía calorífica generada a partir de la combustión; y, finalmente se resumen en forma tabulada algunos de los combustibles más comunes.

Una descripción de la Unidad de Combustión Continua (UCC) y de cada uno de sus sistemas componentes (suministro de aire, suministro de combustible, quemador, cámara de combustión, etc.) es presentada en el capítulo 3, a fin de te-- ner conocimiento del funcionamiento de la UCC y del arreglo de sus partes.

El capítulo 4 contiene recomendaciones especificadas por el fabricante pa- ra la instalación y la adecuada localización de la UCC dentro de un laboratorio, normas que han sido observadas para su ubicación en el laboratorio de Máquinas- Térmicas.

Por su importancia, al método de operación de la UCC se le ha dedicado el capítulo número 5 en el que se precisa paso a paso el procedimiento de operación (arranque y paro de servicio y arranque y paro por ausencia de flama o por sobrecalentamiento). Asimismo, el manejo de los equipos accesorios entre los que se encuentran el analizador de gases de Orsat, el pirómetro de succión y el pirómetro de filamento de contraste.

El capítulo 6 correspondiente a prácticas con el equipo es el de máxima importancia en este trabajo por ser el que comprende el desarrollo de experimentos destinados a la enseñanza e investigación en apoyo de los programas académicos de asignaturas en las que se imparte teoría relacionada con la combustión.

Para finalizar en el capítulo 7 se sugieren programas de mantenimiento de la UCC con el objeto de preservarla en óptimas condiciones de funcionamiento y de esta forma obtener resultados confiables de las prácticas experimentales.

## CAPITULO 2

## 2. LA COMBUSTION

El presente capítulo contiene una breve reseña histórica de la manera en que el hombre ha interpretado el fenómeno de la combustión y cómo lo ha hecho su fuente principal de energía. Se definen el concepto de la combustión y aquellos relacionados con ésta; la combustión y sus aspectos físicos y químicos más importantes y los combustibles como elementos esenciales en la combustión.

### 2.1. Resumen histórico

La combustión ha sido conocida desde los albores de la humanidad en sus principales manifestaciones. Este fenómeno fue descubierto por el hombre de las fuentes ígneas naturales y seguramente le causó temor, sin embargo, posteriormente aprendió a hacer uso del fuego. Es probable que el primer hogar fuera alimentado por tizones conseguidos de algún incendio natural y transcurriría mucho tiempo hasta que al hombre le revelara sus valiosas propiedades y posteriormente pudiera él mismo generarlo.

Se han hallado en algunos lugares (como Mentón y Cordoña) restos de carbones vegetales y de cenizas pertenecientes a la etapa más antigua de la Edad de Piedra. Las primeras utilizaciones de la combustión fueron proporcionar calor ambiental y como agente de cocción de los alimentos quemando madera, hojas o hierba.

Antes de que el hombre pudiera producir el fuego, es posible que tratara de conservarlo en un sitio apropiado al mismo tiempo que aprendía a distinguir de entre los materiales que lo rodeaban aquéllos que eran combustibles.

En la antigüedad el fuego y la flama fueron manifestaciones de la combustión que atrajeron el interés de muchas religiones como la del Zoroastro, que basaba su existencia en la interpretación oculta de los fenómenos ligados a la combustión.

Cinco siglos antes de cristo, Empédocles propuso al fuego como uno de los cuatro elementos constitutivos del Universo junto con el agua, el aire y la tierra. Esta teoría se respetó hasta mucho tiempo después, posiblemente hasta épocas del renacimiento. En los comienzos del siglo XVIII aparecen en algunas enciclopedias intentos por definir el fenómeno y aunque no eran del todo ciertas tampoco eran del todo falsas. Antonio Lavoisier (1743-1794), físico francés, fue el primer hombre que dio a conocer la verdadera naturaleza del fenómeno de la combustión. Demostró que nada puede quemarse por completo, es decir que la materia quemada no desaparece sino que tan solo cambia de forma, pues si se pesan los productos de la combustión (cenizas, humos, gases, líquidos) se descubre que toda la

substancia está aún allí y sólo cambió su forma.

Con una teoría materialista, Fourcroy en 1806, propuso el término de calórico con el que expresó el concepto de calor. De esta forma muchos investigadores de aquel tiempo manejaron la idea de calor como la de un fluido, lo cual los alejaba del concepto de energía. Posteriormente, Rumford y Davy, demostraron que el calor puede generarse por rozamiento, combatiendo de esta forma la idea materialista de Fourcroy.

James Prescott Joule (1818-1889), científico inglés, determinó un equivalente mecánico del calor. Con el trabajo que Joule prácticamente realizó, sus ideas se sobrepusieron a la teoría calórica del calor. En su trabajo publicado en una revista dijo: "cada vez que la fuerza vital queda aparentemente destruida, se produce un equivalente exacto de calor, y viceversa".

Las ideas que Joule aportó junto con otros grandes avances logrados por Kelvin, Carnot, Clausius, Rankine y otros, dieron fundamento a la creación de una nueva ciencia, La Termodinámica.

En esta misma época, Chapmann y Jouguet, hacen distinciones entre flamas, explosiones y detonaciones y demuestran que estos fenómenos pueden representarse mediante ecuaciones diferenciales.

En la actualidad se han logrado muchos avances en el estudio de la combustión debido a la gran cantidad de personas que se han dedicado a la experimentación, investigación y formulación de teorías profundas que expliquen el fenómeno de la combustión.

A lo largo de la historia de la humanidad, la combustión ha formado parte integral en el desarrollo del hombre, como generadora de calor y de trabajo, y es así por ejemplo, que sin el conocimiento del fenómeno no hubiera sido posible la construcción de la máquina de vapor, que fuera creada por Newcomen y perfeccionada por James Watt en 1778, y las grandes instalaciones termoeléctricas actuales tampoco serían posibles de no ser por la combustión, ni los automóviles, ni siquiera los usos más simples como lo es una estufa doméstica. Por todas estas razones es evidente que la importancia de la combustión en nuestra civilización es y seguirá siendo durante mucho tiempo fuente primordial de energía.

## 2.2. Química de la combustión

La combustión como oxidación.

La combustión es una reacción química exotérmica, es decir que libera energía calorífica. Se produce con la mezcla reactiva de un combustible y un combu-

rente que reaccionan bajo ciertas condiciones, aunque también a los materiales para fisión nuclear se les ha denominado combustibles, en este trabajo sólo se hace referencia a la combustión química.

La oxidación rápida conocida como combustión, es un proceso de transformación de energía química latente a energía molecular (manifestada en forma de calor), por tanto, de una elevación considerable de la temperatura de los productos. Se llaman productos a las sustancias resultantes de la combustión y reactivos a los constituyentes de la mezcla reaccionante.

La combustión no siempre es visible con efectos tales como flamas y radiaciones. Las llamas o flamas constituyen transportación o propagación de la reacción a través del espacio y conforman la zona de gases incandescentes visible alrededor de los reactivos que se hallan en combustión. Esta propagación es una de las principales diferencias de la combustión con respecto a otras reacciones químicas.

La sustancia oxidante o comburente más empleada es el oxígeno del aire, aunque existen otras sustancias capaces de reaccionar con el combustible. En una sección siguiente se hace referencia a los promotores e inhibidores de la combustión.

La velocidad del frente de flama es función particular de las características del combustible y de las condiciones en que se produce la combustión, como la relación comburente combustible, la temperatura y la presión de la mezcla.

A la combustión por flama se le puede llamar también combustión continua o combustión subsónica, por ser la velocidad de propagación de la reacción inferior a la velocidad del sonido en el aire. En tanto que la explosión es una combustión con velocidad de propagación supersónica con velocidades entre 1 y 8 km/s.

Tratándose la combustión como una reacción termoquímica de oxidación rápida no sólo el oxígeno es capaz de tomar parte como comburente. El hidrógeno, el fósforo y el arsénico arden desprendiendo luz y calor en presencia de cloro que actúa al igual que el oxígeno como fuerte oxidante.

#### Conceptos básicos en el estudio de la Combustión.

-Concepto de Mol. La masa molecular de una sustancia o un compuesto expresada en kilogramos (o en cualquiera otra unidad de masa) se define como kilogramo mol (o libra mol, o gramo mol, etc.). Por ejemplo, la masa molecular del carbono tiene un valor de 12, luego, 12 kilogramos (o 12 libras) constituyen una mol de carbono o, de otra manera, una mol de carbono tiene una masa de 12 kilogramos (o 12 libras). En el caso de los gases el volumen ocupado por un mol es--

llamado volumen molar y su valor es  $24.61 \text{ m}^3/\text{kgmol}$ . para cualquier gas a  $26.67^\circ\text{C}$  y  $1.013 \text{ bar}$  de presión. Si se tiene un mol de hidrógeno expresado en **kg**, esto es,  $32.00 \text{ kg}$  de hidrógeno, el volumen que ocupa es  $24.61 \text{ m}^3$ . Este concepto es de gran importancia en el estudio de la combustión puesto que relaciona la masa y el volumen de los reactivos.

-Ley de la conservación de la materia. La materia sólo puede sufrir cambios; no puede ser creada ni destruida. En todo proceso, en toda reacción, debe haber un balance en masa entre la suma de las masas que entran a un proceso y la suma de las masas que salen.  $A \text{ kg}$  de combustible combinados con  $B \text{ kg}$  de comburente, darán como resultado  $A + B \text{ kg}$  de productos.

-Ley de la conservación de la energía. La energía no puede ser creada ni destruida solamente es susceptible de transformarse. La suma de todas las energías (potencial, cinética, térmica, química y eléctrica), que entran a un proceso en estado estable debe ser igual a la suma de las energías que lo dejan, aunque, las proporciones entre ellas pueden cambiar. La combustión es un proceso en el cual la energía química, latente en el combustible, cambia a energía en forma de calor.

-Concepto de gas ideal. El volumen específico molar de un gas ideal es directamente proporcional a su temperatura absoluta e inversamente proporcional a su presión absoluta. La constante de proporcionalidad tiene un valor invariable sin importar el gas de que se trate y es conocida como constante universal de los gases ideales. De esta forma se puede expresar matemáticamente:

$$\bar{v} = R (T/p)$$

siendo:  $\bar{v}$  = volumen específico molar,  $\text{m}^3/\text{mol}$

$T$  = temperatura absoluta,  $\text{K}$

$p$  = presión absoluta,  $\text{N}/\text{m}^2$

$R$  = constante universal de los gases,  $8314.3 \text{ J}/\text{kgmol K}$

Esta ley establece que un  $\text{kg mol}$  de cualquier gas ideal ocupa el mismo volumen en las mismas condiciones de temperatura y presión ( $24.61 \text{ m}^3$  a  $1.013 \times 10^5 \text{ N}/\text{m}^2$  y  $26.67^\circ\text{C}$ ).

-Ley de Avogadro. Volúmenes iguales de diferentes gases a la misma presión y temperatura contienen el mismo número de moléculas\*. El concepto de mol dice que un gramo mol de cualquier sustancia contiene una masa en gramos igual

---

\* Al número de moléculas que posee un gramo mol de cualquier gas se le llama número de Avogadro y su valor es  $6.0235 \times 10^{23}$ .

al peso molecular de la sustancia. De esta forma la razón de masa mol a masa molecular es constante, y un mol de una sustancia químicamente pura tiene el mismo número de moléculas que otro de otra sustancia. Como un mol de cualquier gas ocupa el mismo volumen a una presión y temperatura dadas esto implica que iguales volúmenes de diferentes gases a la misma presión y temperatura contienen el mismo número de moléculas.

-Frente de flama. Es la frontera o límite externo de la zona de gases incandescentes visibles más alejada de la fuente o cuerpo en estado de combustión.

-Disociación. Es la separación o rompimiento de moléculas simples o átomos que forman moléculas complejas.

-Relación aire combustible. Es la proporción de masa de aire por unidad de masa de combustible con la cual se verifica la combustión.

Efectos de la presión y la temperatura sobre la combustión.

La explosión es una forma de combustión. Un material combustible mezclado con un comburente en ciertas proporciones y bajo condiciones especiales de presión y temperatura puede provocar una explosión. Algunas sustancias consideradas no explosivas tienen la propiedad de reaccionar en condiciones críticas de presión y temperatura provocando una explosión. Cuando se dan estas condiciones y los gases producidos no tienen tiempo o espacio para expandirse entonces se produce la explosión. Es decir se genera un sobrecalentamiento y una sobrepresión capaces de hacer estallar a un combustible que en otras condiciones no hubiera explotado. Enseguida se libera el calor y los gases o aire que rodean a la explosión inducen ondas de choque que producen efectos mecánicos sobre las proximidades.

Factores que intervienen en la combustión.

Se afirma que una combustión es buena si el combustible es totalmente oxidado y se libera toda la energía de que es capaz el combustible. La combustión es incompleta si el combustible es parcialmente oxidado; las razones por las cuales esto sucede, pueden ser: a) carencia de oxígeno, b) mala mezcla entre el combustible y el comburente y c) una temperatura demasiado baja para mantener la combustión.

La facilidad con la cual un combustible pueda o no arder puede ser afectada por otras sustancias adicionales capaces de acelerar o frenar la combustión. Substancias como el ozono, los peróxidos, el bióxido de nitrógeno se comportan como aceleradores de la combustión. Empero, otros compuestos retardan la detona-

ción de combustibles, tales como las benzinas, comportándose como inhibidores.

Los excitadores provocan disociación que acelera la reacción y modifica su -- proceso mientras que los inhibidores actúan impidiendo esa disociación. Como es el caso de los aditivos antidetonantes de las gasolinas, como tetraetilo de plomo, que reduce la posibilidad de detonación en los motores de combustión interna.

#### Composición del aire.

El oxígeno, activo como comburente en todo proceso práctico de combustión, - proviene del aire atmosférico. Sólo por motivos teóricos o en procesos industria les tales como soldadura, se realizan combustiones con oxígeno puro.

El aire atmosférico es una mezcla no reactiva de gases: nitrógeno, oxígeno, - vapor de agua y pequeñas cantidades de gases inertes como argón, neón y helio. - El vapor de agua contenido en el aire depende de la temperatura y del grado de - saturación de humedad del aire; y es necesario, en estudios rigurosos de combus- tión, estimar las pérdidas de calor debidas a la humedad del aire atmosférico.

La composición del aire se presenta en la tabla siguiente:

Composición del aire

Componente	% en volumen	% en masa
Oxígeno, O <sub>2</sub>	20.99	23.15
Nitrógeno, N <sub>2</sub>	78.03	76.85*
Gases inertes:		
Argón, Ar	0.92	-
Neón, Ne	0.0018	-
Helio, He	0.0005	-
Criptón, Cr	0.001	-
Anhídrido carbónico, CO <sub>2</sub>	0.06	-
Masa molecular del aire equivalente = 29.00 kg/kgmol		

El proceso químico de la combustión.

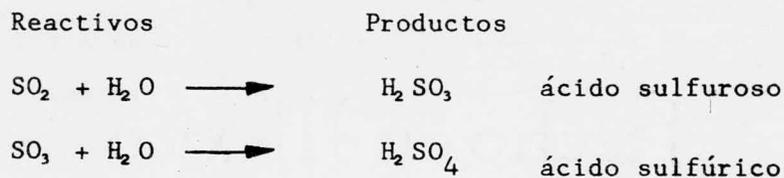
En todo equipo en el que se realice un proceso de combustión y se emplee - aire como comburente entrarán 3.76 moles (o m<sup>3</sup>) de N<sub>2</sub> por cada mol (o m<sup>3</sup>) de O<sub>2</sub>,

\* Es conveniente considerar a los gases inertes como equivalentes del nitrógeno; el porcentaje equivalente en masa 76.85% y la masa molecular 29.00 kg/kgmol - han sido corregidos por la masa extra de los gases inertes.

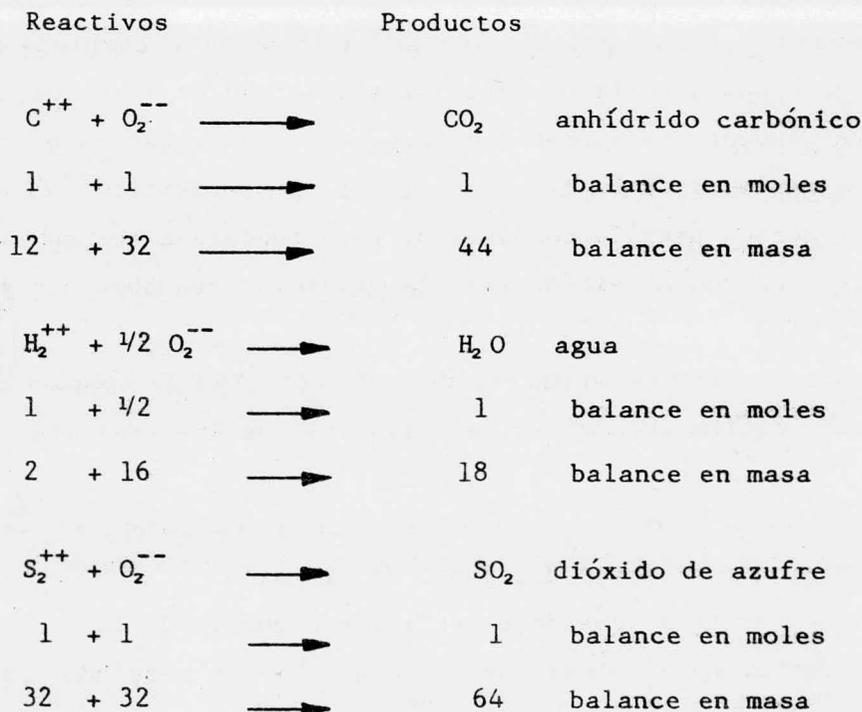
de acuerdo con lo siguiente:

$$\frac{\text{Moles de nitrógeno}}{\text{Moles de oxígeno}} = \frac{79.01}{20.99} = 3.76$$

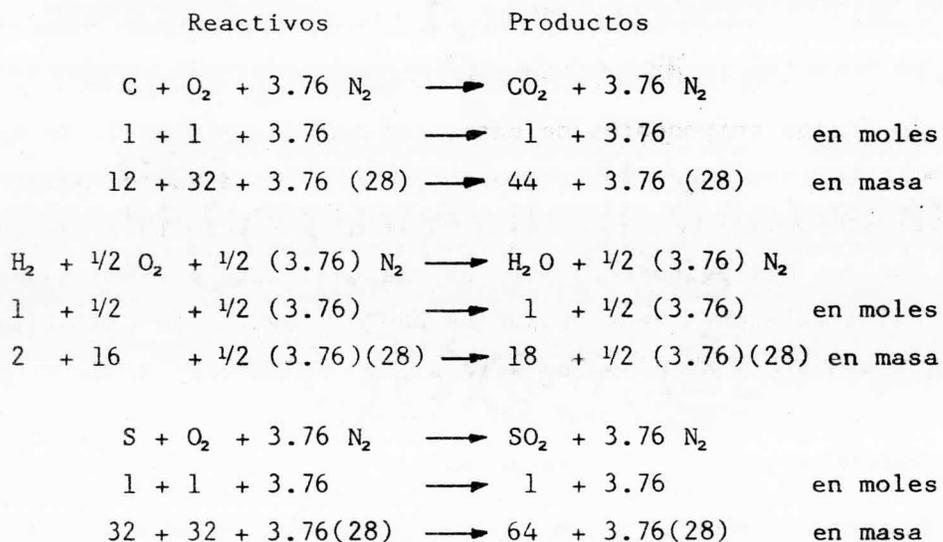
Como ya se afirmó la combustión es un proceso químico de oxidación rápida del combustible (o de los componentes de éste, capaces de oxidarse). Se intuye, entonces, que la combustión puede ser representada por una ecuación química. Los tres elementos primitivos existentes en los combustibles susceptibles de quemarse son: el carbono (C), el hidrógeno (H<sub>2</sub>) y el azufre (S). Este último, aunque buen combustible, es indeseable pues crea productos que al combinarse con el agua resultante o el agua atmosférica, producen ácidos muy corrosivos:



A continuación, se plantean las ecuaciones de combustión del carbono, el hidrógeno y el azufre con oxígeno aislado:



Si estas reacciones en vez de usar oxígeno libre como comburente usaran el oxígeno del aire, quedarán:



A la cantidad mínima de aire capaz de oxidar plenamente al o a los elementos combustibles se le denomina aire estequiométrico, teórico o ideal. En una combustión completa (u oxidación total), no deben existir en los productos: oxígeno libre (O<sub>2</sub>), ni monóxido de carbono (CO), ni hidrógeno libre (H<sub>2</sub>), ni hidrocarburos (CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, etc.), sin quemar.

Prácticamente, no es posible lograr la combustión completa de los combustibles, ni aun cuando se alimente una mayor cantidad de aire conocida como aire en exceso. Este concepto se expresa en porcentaje con relación al aire estequiométrico. Por ejemplo, 150% de aire estequiométrico, significa 50% más del aire estequiométrico teórico para la combustión. Esto conduce a que en la ecuación representativa teórica con exceso de aire la oxidación sea absoluta y además haya un excedente de aire.

El porcentaje de aire en exceso depende del tipo de combustible, de su estado físico, del equipo quemador y del principio de las tres T's de la buena combustión:

- 1) tiempo: el necesario para que los gases ascendentes se quemen antes de que se enfríen por debajo del punto de ignición.
- 2) temperatura: que debe ser muy por encima de la de ignición.
- 3) turbulencia: misma que provoca un mejor mezclado entre los reactivos

En suma si se tiene tiempo, temperatura elevada y buen mezclado, el exceso de aire requerido será inferior. Empero aun habiendo aire en exceso puede exis--

tir en los productos de la combustión monóxido de carbono e hidrógeno libre a causa de la baja turbulencia. Así, un caso particular es el de los motores de automóvil, en los que la eficiencia térmica se sacrifica por una mayor potencia; de esta forma hay mayor potencia con una combustión al 80% de aire teórico, teniendo la máxima eficiencia con 120% de aire teórico.

Es preciso que el principio de exceso de aire, como optimizador de la combustión, sea regulado con prudencia, pues una cantidad excesiva provocará que salga con los productos una mayor cantidad de energía.

La forma en que se determina el exceso de aire es: 1) se encuentra la ecuación teórica o estequiométrica de la combustión, 2) se determinan los coeficientes de la ecuación con exceso de aire (puede ser real o teórica) y 3) se obtiene la razón del número de moles de aire de la combustión con exceso de aire entre el número de moles de aire en la combustión estequiométrica:

$$\% \text{ Aire} = \frac{\text{N}^{\circ} \text{ de moles de aire de combustión real}}{\text{N}^{\circ} \text{ de moles de aire de combustión teórica}}$$

En el estudio de la razón entre comburente y combustible se manejan dos conceptos que, numéricamente, identifican el tipo del combustible y la calidad de la combustión. Estos son, la razón aire/combustible y su inverso combustible/aire. Ambos expresables en función molar (o volumétrica) o en función de masas.

### 2.3. Termodinámica de la combustión

En la sección anterior se hace un estudio de la combustión considerándola como un proceso químico sin profundizar en los aspectos termodinámicos o físicoquímicos de esta reacción exotérmica. En esta sección se evalúa la combustión como una de las fuentes primarias de energía útil y fácil de generar, sometiéndola a los criterios de la primera y segunda leyes de la termodinámica con el objeto de valorar la magnitud de energía liberada por esta reacción química.

Entalpía de formación.

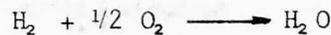
En los conceptos fundamentales de la Termodinámica se define a la entalpía como una propiedad puntual o de estado relacionada a la sustancia sin que en ella se considere un cambio de composición o estructura química; y se tabulan valores de entalpía a partir de una temperatura datum o de referencia en la que el valor de tal propiedad es nulo. En procesos en los que la actividad termodinámica

ca es sólo consecuencia y no causa del proceso, como es el caso de una reacción química, es preciso identificar en la entalpía un auxiliar en el estudio de tales procesos.

La entalpía de formación de un compuesto es el valor de esta propiedad en el denominado estado estándar:  $T^{\circ} = 25^{\circ}\text{C}$  y  $p^{\circ} = 1 \text{ atm} = 1.013 \text{ bar}$ . En este estado todo compuesto posee un valor de entalpía de formación, en tanto que, los elementos químicos fundamentales en estas condiciones, tienen un valor nulo. Supóngase el ejemplo de la formación del agua:

1. Un mol de hidrógeno molecular bajo condiciones estándar ( $T^{\circ} = 25^{\circ}\text{C}$  y  $p^{\circ} = 1 \text{ atm}$ ) reacciona con medio mol de oxígeno molecular en las mismas condiciones y constituyen un mol de agua. Si se supone que pasada la reacción, el producto ( $\text{H}_2\text{O}$ ) alcanza la temperatura y presión de los reactivos, y que, se verifica una transferencia exotérmica, este calor tendrá la magnitud de la entalpía de formación del agua.

Químicamente:



Termodinámicamente con la primera ley:

$$Q + H_R = H_P$$

donde:

$H_R$  = entalpía absoluta de los reactivos

$H_P$  = entalpía absoluta de los productos

como no siempre se ha de tratar de un solo reactivo y de un solo producto, es razonable escribir:

$$Q + \sum_R n_i \bar{h}_i = \sum_P n_e \bar{h}_e$$

Para ilustrar esto, se ha considerado la formación del agua por medio de la combustión. Como los reactivos están en el estado estándar, el valor de sus entalpías es cero; por tanto:

$$H_R = 0$$

luego:

$$Q = H_P = h_{f, \text{H}_2\text{O}}^{\circ} = -286,029 \text{ kJ/kgmol}$$

donde  $h_{f, \text{H}_2\text{O}}^{\circ}$  es la entalpía de formación del agua, de la tabla N° 1 del apéndice.

En este ejemplo el valor de la entalpía de formación del agua es negativo. -

Esto significa que la energía ha sido liberada por la reacción, es decir que la suma de energías del hidrógeno y del oxígeno antes de la reacción es mayor que la energía del agua formada.

Calor de reacción.

Al calor desprendido por la combustión se le llama calor de reacción (de manera extensiva para cualquier reacción), o calor de combustión, entalpía de reacción o entalpía de combustión. Como función del medio en que tiene lugar la combustión, la potencia calorífica cambia de valor; y de signo si se trata de una reacción endotérmica o exotérmica. La potencia calorífica es el calor de reacción y recibe este nombre cuando se trata de un combustible común.

Cuando los productos se enfrían por debajo de la temperatura de punto de rocío, gran parte del vapor de agua contenido en éstos se condensa, la cantidad de calor rechazada por la combustión toma el nombre de calor de reacción alto o potencia calorífica superior, como se conoce ordinariamente. Luego, la potencia calorífica superior menos el calor latente cedido en la condensación (véase sección precedente) da el valor de la potencia calorífica inferior. Si el combustible carece de hidrógeno sólo tendrá un valor de potencial calorífico. Si se conoce la potencia calorífica superior y la masa de agua formada por la combustión por unidad de masa de combustible ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{comb.}}$ ), se puede conocer la potencia calorífica inferior:

$$q^{\circ}_l = q^{\circ}_h - m h_{fg} = q^{\circ}_h - (2,442.4) m \quad (\text{kJ}/\text{kg}_{\text{comb.}})$$

ya que

$$h_{fg \ 25^{\circ}\text{C}} = 2,442.4 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{agua}}$$

donde:  $q^{\circ}_l$  = la potencia calorífica inferior, ( $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{comb.}}$ )

$q^{\circ}_h$  = la potencia calorífica superior, ( $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{comb.}}$ )

$m$  = masa de agua, ( $\text{kg}_{\text{agua}}/\text{kg}_{\text{comb.}}$ )

$h_{fg}$  = calor latente de vaporización del agua, ( $\text{kJ}/\text{kg}_{\text{agua}}$ )

Combustión a volumen constante y a presión constante.

Combustión a volumen constante. Si la combustión sucede en un sistema **cerrado**

como lo es una bomba calorimétrica, en la cual se coloca una cantidad de agua su ficiente para saturar los reactivos, con la finalidad de que el vapor de agua -- producido se condense, entonces, la potencia calorífica medida es la superior y a volumen constante.

La energía total almacenada en los reactivos en condiciones estándar (25°C),  $E_{t1}^*$ , es la suma de la energía interna de los reactivos,  $U_r^*$ , más la energía química  $E_q$ . Ocurrida la combustión y enfriados los productos a la temperatura estándar o de referencia, la energía total almacenada en el sistema es  $U_p^*$ ,  $E_{t2}^* = U_p^*$ , que es la energía interna de los productos. La única energía que traspasa la frontera es el calor de reacción representado por  $q_v^*$ , como se representa en la figura 2.1. A este calor se le llama energía interna de reacción o energía de re

Representación termodinámica de una bomba calorimétrica,  $V=cte.$ ,  $\Delta T=0$  y  $p=no$  constante.

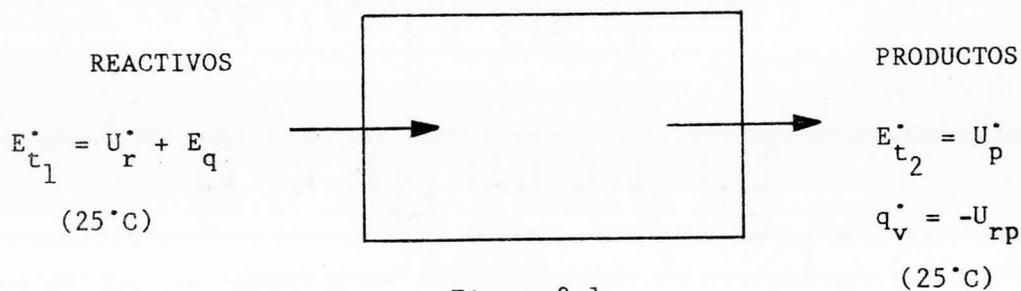


Figura 2.1

acción a volumen constante y se representa por  $U_{rp}^*$ . El decremento de energía interna en virtud de la energía que pierde el sistema es:

$$E_{t1}^* - E_{t2}^* = Q = q_v^* = -U_{rp}^*$$

$q_v^*$ , es el resultado de la prueba, pero también se puede hallar el valor de  $E_q$ , desconocido:

$$E_{t1}^* = U_r^* + E_q ; \quad E_{t2}^* = U_p^*$$

pero

$$q_v^* = E_{t1}^* - E_{t2}^* = U_r^* + E_q - U_p^*$$

luego

$$E_q = U_p^* - U_r^* + q_v^*$$

Combustión a presión constante. Cuando la reacción tiene lugar a presión constante no siendo restrictivo el volumen que la rodea, entonces el calor de reacción adopta el nombre de entalpía de reacción o de combustión; es decir que-

existe una variación de volumen que equivale a una variación del producto  $pV$ .

De manera análoga a la entalpía de formación y a la energía interna de reacción, la entalpía de combustión tiene su origen en el estado estándar ( $T^\circ = 25^\circ\text{C}$  y  $p^\circ = 1 \text{ atm}$ ).

La medición de la entalpía de combustión se puede efectuar, como ya se dijo, en un calorímetro de flujo estable en el que la combustión existe a presión constante. Un esquema termodinámico que representa su comportamiento aparece en la figura 2.2.

Representación termodinámica de calorímetro de sistema abierto,  $p=\text{cte.}$ ,  $\Delta T=0$  y  $V=\text{no cte.}$

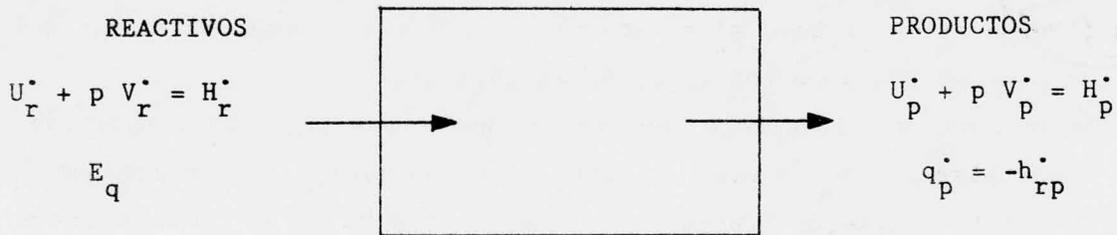


Figura 2.2

El aire que se encuentra en el calorímetro, como comburente, está saturado con  $\text{H}_2\text{O}$  y éste y el combustible se hallan en el estado normal; los productos resultantes del ensayo alcanzan el mismo estado. La energía que contienen los reactivos a la entrada se compone de la energía interna,  $U_r^\circ$ , y la energía química  $E_q$ . Además se presenta otra debida al trabajo de flujo o corriente,  $pV_r^\circ$ . A la salida los productos poseen energía interna,  $U_p^\circ$ , y el consecuente trabajo de flujo,  $pV_p^\circ$ , y el calor,  $Q$ , disipado por el sistema en reacción.

En la figura 2.2 se representa a  $Q$  con los símbolos  $q_p^\circ$  que es la potencia calorífica a presión constante o bien en entalpía específica como  $h_{rp}^\circ$ . Así  $q_p^\circ = -h_{rp}^\circ$ . La entalpía sensible función de una variación en la temperatura de los reactivos es:

$$H_r^\circ = U_r^\circ + pV_r^\circ$$

y la entalpía total de los reactivos a la que se añade la energía química,

$$H_R^\circ = H_r^\circ + E_q = U_r^\circ + pV_r^\circ + E_q$$

La entalpía de los productos es, con igual razonamiento:

$$H_p^* = U_p^* + pV_p^*$$

estableciendo la primera ley para su análisis:

$$H_R^* = H_p^* + (-h_{rp}^*)$$

o de mejor manera:

$$h_{rp}^* = H_p^* - H_R^*$$

lo que indica que  $h_{rp}^*$  es la variación de entalpía de reactivos a productos. Esta ecuación define matemáticamente el concepto de entalpía de reacción o de entalpía de combustión en base al estado normal (25°C y 1 atm). El valor de  $h_{rp}^*$  es negativo pues se trata de una reacción exotérmica.

Dependiendo de las condiciones en las que tiene lugar la combustión se pueden clasificar cuatro calores de combustión que son: calor de combustión a volumen constante a presión constante valores alto y bajo. Si cambian las condiciones también cambiarán los criterios para cuantificar la energía liberada.

Más adelante se tratará sólo la evaluación de sistemas en reacción abiertos con lo que se implica que al hablar de calor de reacción se denotará que es la entalpía de reacción,  $h_{rp}^*$  o bien  $h_{rp}$ , en condiciones no estándares.

Análisis de la combustión con la primera ley.

Puesto que las entalpías de formación se hallan en base al estado origen de referencia (25°C y 1 atm), ello facilita los balances energéticos de los sistemas en reacción, ya que se pueden sumar y restar sin ninguna restricción.

Haciendo uso de la primera ley en un sistema en reacción abierto, en estado y flujo estacionarios se tiene que:

$$Q_{vc} + H_R = W_{vc} + H_p$$

como se observa se desprecian las variaciones de energía cinética y potencial, si existieren; esta ecuación expresada de manera generalizada:

$$Q_{vc} + \sum_R n_i \bar{h}_i = W_{vc} + \sum_P n_e \bar{h}_e$$

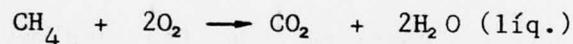
donde: R y P, se refieren, como ya se han usado, a reactivos y productos, respec

tivamente,

$i$  y  $e$ , son los subíndices variables de la sumatoria, y

$vc$  significa volumen de control o sistema abierto. La raya sobre el símbolo de la entalpía denota que es específica molar.

Para entender cómo la entalpía de formación y cómo la entalpía de reacción facilitan el balanceo termodinámico de un sistema en reacción se analiza la siguiente ecuación de combustión a presión constante:



Se quiere conocer la transmisión de calor por kgmol de combustible. Las condiciones de presión y temperatura son las de referencia en los reactivos y en los productos. Con la primera ley resulta:

$$Q_{vc} + \sum_R n_i \bar{h}_i = W_{vc} + \sum_P n_e \bar{h}_e$$

pero  $W_{vc} = 0$ ; de la tabla N° 1 de entalpías de formación en el apéndice,

$$\begin{aligned} \sum_R n_i \bar{h}_i &= \bar{h}_{f, \text{CH}_4} + \bar{h}_{f, \text{O}_2} = -4,274.72 \\ &= -4,274.72 \text{ kJ/kgmol}_{\text{comb.}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sum_P n_e \bar{h}_e &= \bar{h}_{f, \text{CO}_2} + 2(\bar{h}_{f, \text{H}_2\text{O (líq.)}}) \\ &= -22,467.98 + 2(-16,320.55) \\ &= -55,108.70 \text{ kJ/kgmol}_{\text{comb.}} \end{aligned}$$

finalmente el calor disipado es:

$$\begin{aligned} Q_{vc} = h_{rp} &= q_p = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i \\ &= -55,108.7 - (-4,274.72) \\ &= -50,833.97 \text{ kJ/kgmol}_{\text{comb.}} \end{aligned}$$

Hasta aquí se ha supuesto el que reactivos y productos se hallen en las condiciones estándares. En la realidad ni unos ni otros se presentarán en la reacción en condiciones estándares, en consecuencia la variación de energía interna (reacción a volumen constante) y la variación de entalpía (reacción a presión constante) entre el estado real y el estado de referencia deberá conocerse.

Como es de gran utilidad práctica el cambio de entalpía en la reacción, se describen dos métodos para calcular la diferencia entre el estado de referencia y el real. Estos métodos son los siguientes:

1) Si se asume que los gases se comportan idealmente entre los dos estados entonces la entalpía es sólo función de la temperatura, luego puede encontrarse con la ayuda de las ecuaciones  $\bar{C}_p$  dadas en la tabla N° 3 del apéndice, o bien en la tabla N° 4. Esta última tabla da el valor de  $\bar{h}^* - \bar{h}^*_{298}$ , es decir, la entalpía diferencial entre el estado real y el de referencia (25°C = 298°K). El índice superior \* indica que se trata de valores a una presión de una atmósfera. Es importante determinar que para tomar los valores de la tabla ( $\bar{h}^* - \bar{h}^*_{298}$ ), el comportamiento del gas no debe desviarse sustancialmente del ideal <sup>298</sup> pues con esto se incurriría en un error significativo.

2) Suponiendo que el comportamiento de las sustancias participantes no es ideal o, que siéndolo no se tienen a mano tablas termodinámicas, los valores ( $\bar{h}^* - \bar{h}^*_{298}$ ) se pueden obtener de los diagramas generalizados.

En general al analizar un sistema en reacción, en condiciones de estado y flujo estacionarios, en la que las variaciones de energía cinética y potencial son despreciables, la primera ley de la Termodinámica toma la forma:

$$Q_{vc} + \sum_R n_i (\bar{h}_f^* + (\bar{h} - \bar{h}^*_{298}))_i = \\ = W_{vc} + \sum_p n_e (\bar{h}_f^* + (\bar{h} - \bar{h}^*_{298}))_e$$

Con el siguiente ejemplo se describen los procedimientos para determinar el valor de la entalpía específica molar del agua a 34.45 bar y 588.65°K con respecto al estado de referencia 298°K y 1 atm.

a) Se supone que el vapor de agua es un gas ideal y se utiliza la fórmula del calor específico a presión constante dada en la tabla N° 3 del apéndice

b) Bajo el supuesto de que el vapor de agua es un gas ideal con el valor para ( $\bar{h}^* - \bar{h}^*_{298}$ ) que se tiene en la tabla N° 4 del apéndice.

c) Con la ayuda de las tablas de vapor.

Se debe establecer que:

$$\bar{h} = \bar{h}_f^\circ + (\bar{h}_T - \bar{h}_{298}^\circ)$$

entonces la diferencia entre los procedimientos radicará en cómo encontrar el valor de  $\bar{h}_T - \bar{h}_{298}^\circ$ .

De la tabla No 1 del apéndice se toma:

$$\bar{h}_{f_{H_2O(g)}}^\circ = - 241,917.31 \text{ kJ/kg mol}$$

a) Aplicando la ecuación para el  $\bar{C}_p$  del agua,

$$\bar{C}_p = 0.07987 - \frac{1.86}{\sqrt{T}} + \frac{17.44}{T} \quad (\text{kJ/Kg mol K})$$

donde: T = temperatura, °K

por esto  $T_{\text{real}} = 588.65^\circ\text{K}$  y  $T^\circ = 298^\circ\text{K}$ , de esta manera:

$$\begin{aligned} h &= \bar{C}_p \cdot dT \\ (\bar{h}_T - \bar{h}_{298}^\circ) &= \int_{298}^{588.65} \left( 0.07987 - \frac{1.86}{\sqrt{T}} + \frac{17.44}{T} \right) dT \\ &= 9,905.44 \text{ kJ/kg mol} \end{aligned}$$

por lo que la entalpía de vapor en el estado dado es:

$$\begin{aligned} \bar{h} &= \bar{h}_{f_{H_2O(g)}}^\circ + (\bar{h}_T - \bar{h}_{298}^\circ) \\ &= - 241,917.31 + 9,905.44 \\ &= - 232,011.87 \text{ kJ/kg mol} \end{aligned}$$

En el ejemplo anterior se asume como referencia al estado estándar,  $T^\circ$  y  $p^\circ$ ; a partir del cual se calculó la entalpía de reacción del agua en condiciones no-normales.

En la figura 2.3, se ilustra un diagrama temperatura entalpía (T-h) en el cual se presenta la variación de la entalpía de reacción cuando ni reactivos ni productos están en el estado de referencia. Para esto se considera que un punto a sobre una

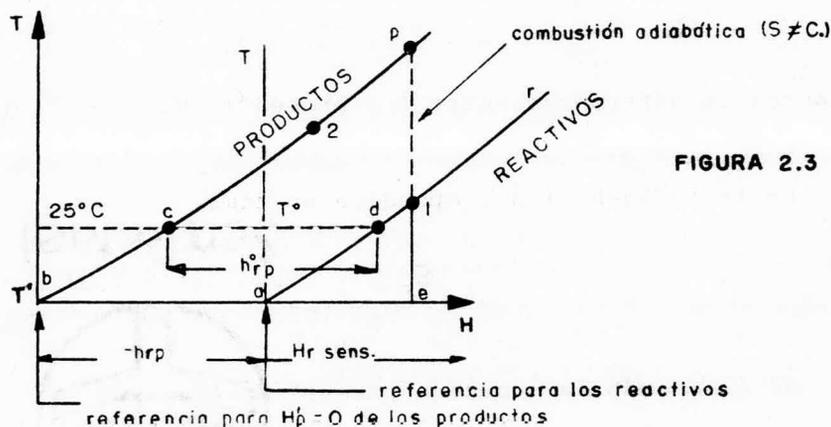


FIGURA 2.3

isobara,  $adr$ , es un estado arbitrario en  $T'$  para los reactivos; la entalpía  $h'_p$  está en  $b$  a una distancia  $-h'_{rp} = h'_r - h'_p$ , ya que para la combustión siempre  $h'_r > h'_p$ . La entalpía de los reactivos en el estado  $1$  vale:

$$h'_p + (-h'_{rp}) + ae.$$

siendo  $ae$  la parte de la entalpía que es  $h = \int C_p dT$ , para un gas ideal. La curva  $bcp$  es una isobara que contiene el estado de los productos. Esta curva no siempre es paralela a la de los reactivos lo que entraña que  $-h_{rp}$  a cualquier otra temperatura por ejemplo  $T^\circ$  no sea igual a  $T'$ .

Si se pretende un cambio de entalpía desde el estado  $1$  de los reactivos hasta el  $2$  de los productos, su valor se puede calcular con relación a un estado en el cual se conoce la entalpía de reacción. Este estado es el estándar  $d$  ( $T^\circ = 25^\circ C$ ) el cual comprende los puntos  $c$  y  $d$ . El primer cambio es de  $h_1$  a  $h_d^\circ$ ; después se puede conocer el cambio de entalpía de  $h_d^\circ$  a  $h_c^\circ$  que es  $h_{rp}^\circ$ , resultado de una prueba calorimétrica. Por último, se buscará el cambio  $h_c^\circ$  a  $h_2$ . Esto matemáticamente se expresa como sigue:

$$h_2 - h_1 = (h_2 - h_c^\circ)_p + (h_c^\circ - h_d^\circ) + (h_d^\circ - h_1)_r$$

y como se consideran comportamientos ideales:

$$\begin{aligned} h_2 - h_c &= \int C_p dT, \text{ para los productos} \\ h_c^\circ - h_d^\circ &= -h_{rp}^\circ, \text{ del combustible} \\ h_d^\circ - h_1 &= \int C_p dT, \text{ para los reactivos} \end{aligned}$$

Los valores de  $h_2 - h_c^\circ$  y  $h_d^\circ - h_1$  se pueden encontrar en la tabla N° 4.

## 2.4. Combustibles

Un combustible es toda aquella sustancia que tiene la capacidad de reaccionar con el oxígeno (reacción de oxidación) generando una cierta cantidad de energía en forma de calor. Para que pueda lograrse la combustión es necesaria la participación de dos elementos, uno es el combustible y el otro es el comburente. En la mayoría de los procesos de combustión se usa el oxígeno como comburente.

Los combustibles más usados comúnmente son los de origen fósil los cuales se clasifican según su estado físico en sólidos, líquidos y gaseosos.

El más importante de los combustibles sólidos es el carbón mineral, producto compuesto en su mayor parte por carbono, y del cual existen diversas variedades en función de su grado de carbonización. Otros combustibles sólidos son la madera y el coque.

Los combustibles líquidos presentan particulares ventajas sobre los combustibles sólidos debido a que pueden fluir por los oleoductos y pueden fácilmente ser transportados y utilizados. Los combustibles líquidos más utilizados e importantes son aquellos derivados del petróleo y en menor escala algunos alcoholes.

El petróleo bruto tal como se halla en el subsuelo, ha de someterse a una serie de procesos de refinamiento con el propósito de obtener un gran número de productos derivados. Este líquido tan apreciado en nuestros días, es una mezcla de muchos compuestos diferentes cuyas moléculas están formadas por carbono e hidrógeno, razón por la cual a todos estos compuestos se les denomina hidrocarburos.

Los diferentes tipos de hidrocarburos se obtienen por el método de destilación del petróleo crudo, es así como se consiguen una gran cantidad de productos derivados cada uno con aplicaciones especiales. Ejemplos de estos productos son los asfaltos, parafinas lubricantes, aceites combustibles, diesel, gasolinas, etc.

En la tabla siguiente se señalan algunos de los combustibles sólidos más comunes:

Combustible	Masa molecular	COMBUSTIBLES SOLIDOS	
		Poder calorífico (kJ/kg)	
		Inf.	Sup.
Antracita	_____	31,000	31,493
Carbón bituminoso	_____	30,471	31,631

Continúa la tabla de la página anterior:

Carbón grafitico	12.01	32,791	
Carbón grafitico	12.01	9,211	
Coque de horno	-----	28,960	29,144
Lignito	-----	15,583	17,094
Azufre	32.02	9,257	
Madera de robles	-----	18,606	

En la siguiente tabla se presentan algunos de los combustibles líquidos más importantes, incluyendo otros cuyo origen no es el petróleo:

COMBUSTIBLES LIQUIDOS				
Combustible	Fórmula	Peso molecular	Poder calorífico (kJ/kg)	
			Inf.	Sup.
Benceno	$C_6 H_6$	78.108	40,143	41,834
n-Decano	$C_{10} H_{22}$	142.276	44,241	47,641
n-Dodecano(Diesel)	$C_{12} H_{26}$	170.328	44,116	47,474
Alcohol etílico	$C_2 H_6 O$	46.068	27,746	30,614
Aceite Combustible (Fuel Oil)			43,032	45,820
Gasolina			43,727	46,984
n-Heptano	$C_7 H_{16}$	100.198	44,560	48,073
n-Hexadecano	$C_{16} H_{34}$	226.432	43,957	47,260
Queroseno			43,032	46,285
Alcohol metílico	$CH_4 O$	32.042	21,114	23,860
Nonano	$C_9 H_{20}$	128.250	44,326	47,754
n-Octano	$C_8 H_{18}$	114.224	44,426	47,893
Octeno	$C_8 H_{16}$	112.208	44,192	47,332
n-Pentano	$C_5 H_{12}$	72.146	44,983	48,646

Entre los combustibles los gaseosos se caracterizan por ser los más limpios, de intensidad y velocidad de combustión fácilmente regulables y se puede obtener una combustión completa con poco exceso de aire. Los combustibles gaseosos pueden ser naturales o fabricados. Naturales como el gas natural, el propano y el butano; y fabricados como el gas de gasógeno, la hulla, etc. que son gene-

rados a partir de combustibles primarios. En la siguiente tabla aparecen algunos de los combustibles gaseosos más utilizados.

COMBUSTIBLES GASEOSOS

Principales combustibles gaseosos fabricados	Gas de Hulla	Gas de Agua	Gas de Alto horno	Gas de gasógeno	Gas LP
Composición química, porcentajes en volumen.					
Hidrógeno	54.5	40.5	1.0	14.0	
Oxido de carbono	10.9	34.0	27.0	27.5	
Metano	24.2	10.2		3.0	
Etano					
Etileno	1.5	6.1			
Benceno	1.3	2.8			
Oxígeno	0.2	0.5		0.6	
Nitrógeno	4.4	2.9	60.0	50.9	
Bióxido de carbono	3.0	3.0	11.5	4.5	
Butano					61.0
Propano					39.0

CAPITULO 3

# UNIDAD DE COMBUSTION CONTINUA DIAGRAMA ESQUEMATICO

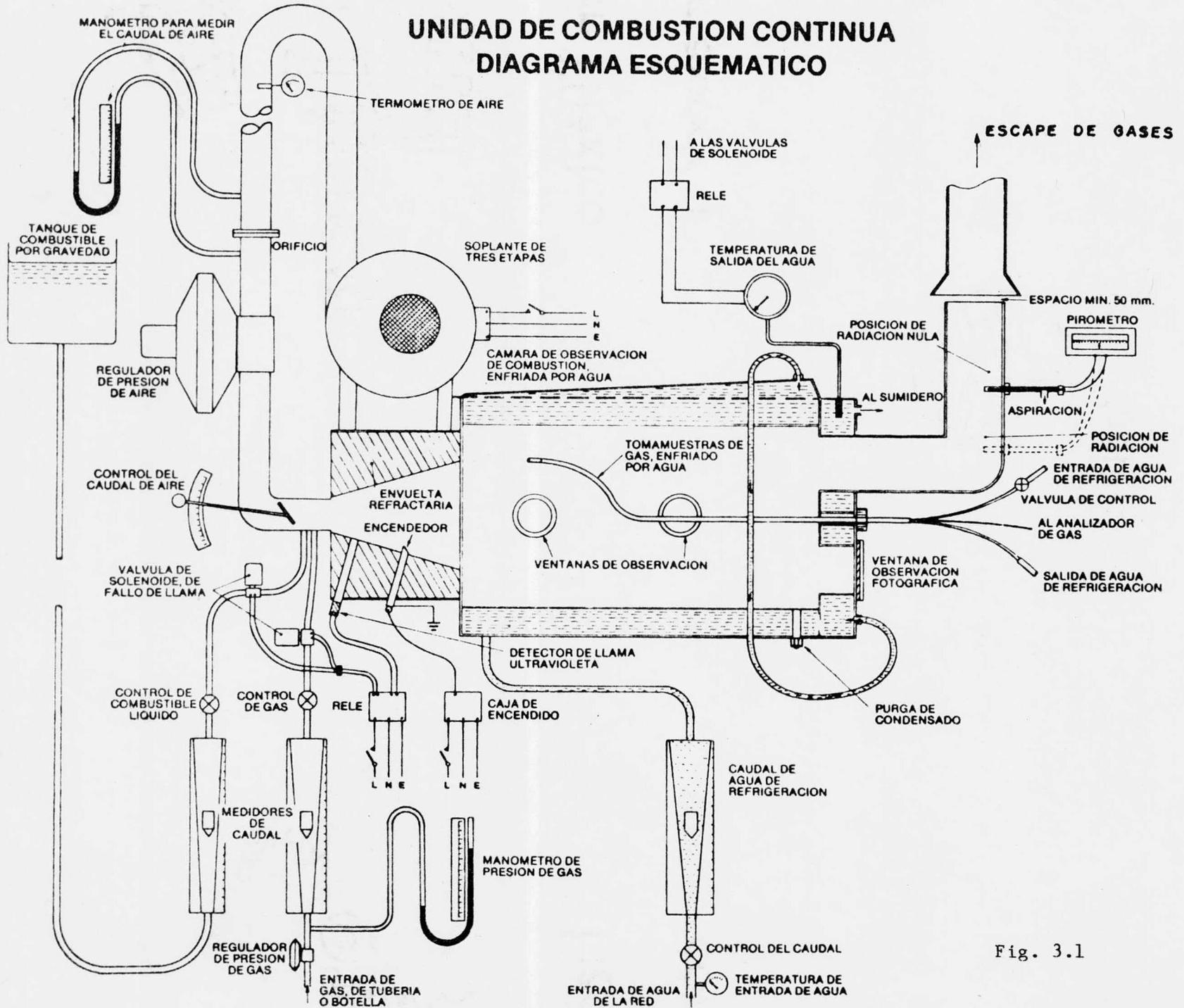


Fig. 3.1

### 3. DESCRIPCION DEL EQUIPO

En esta sección se describen cada uno de los sistemas que forman a la Unidad de Combustión Continua (UCC), y sus partes integrantes. La descripción considera las características de funcionamiento, dibujos y especificaciones. Los aparatos o dispositivos se agrupan en seis sistemas principales que son:

- 1) Sistema de suministro de aire
- 2) Sistema de suministro de combustible
- 3) Quemador, cámara de combustión y chimenea
- 4) Sistemas eléctricos de arranque y protección
- 5) Sistema de enfriamiento por agua y aislamientos térmicos
- 6) Bastidor

#### 3.1. Suministro de aire

Las partes que componen el sistema que introduce aire comburente al quemador son (Ver figura 3.1):

- motoventilador
- tubería de descarga del ventilador
- termómetro para medir la temperatura de entrada del aire
- placa de orificio y manómetro en U con los que se mide el flujo de aire
- regulador de presión del aire; y
- válvula cónica en el quemador para regular el flujo de aire.

El ventilador es de tipo centrífugo de tres etapas de impulsión que toma el aire ambiente y lo impele hacia el quemador. Opera con un motor eléctrico de 110 V, 15 A y 60 Hz. Su capacidad máxima de flujo es de 160 kg/h y la presión de entrada al quemador es mantenida en aproximadamente 0.024 bar (250 mm c.a.)- por el regulador de presión del aire.

La coraza de aluminio envuelve a los tres impulsores montados sobre un eje de acero soportado a su vez por cojinetes de rodamiento. La transmisión de potencia se hace por banda desde un motor eléctrico de inducción monofásico. El motor está montado sobre el soplador en un soporte que pivotea para ajustar la banda a la tensión precisa. La unidad sopladora está provista de los botones de arranque y paro (unidades termomagnéticas) dispuestas en el tablero de control de la UCC. En la figura 3.2 aparecen las vistas ortogonales del ventilador con la descripción de sus partes principales.

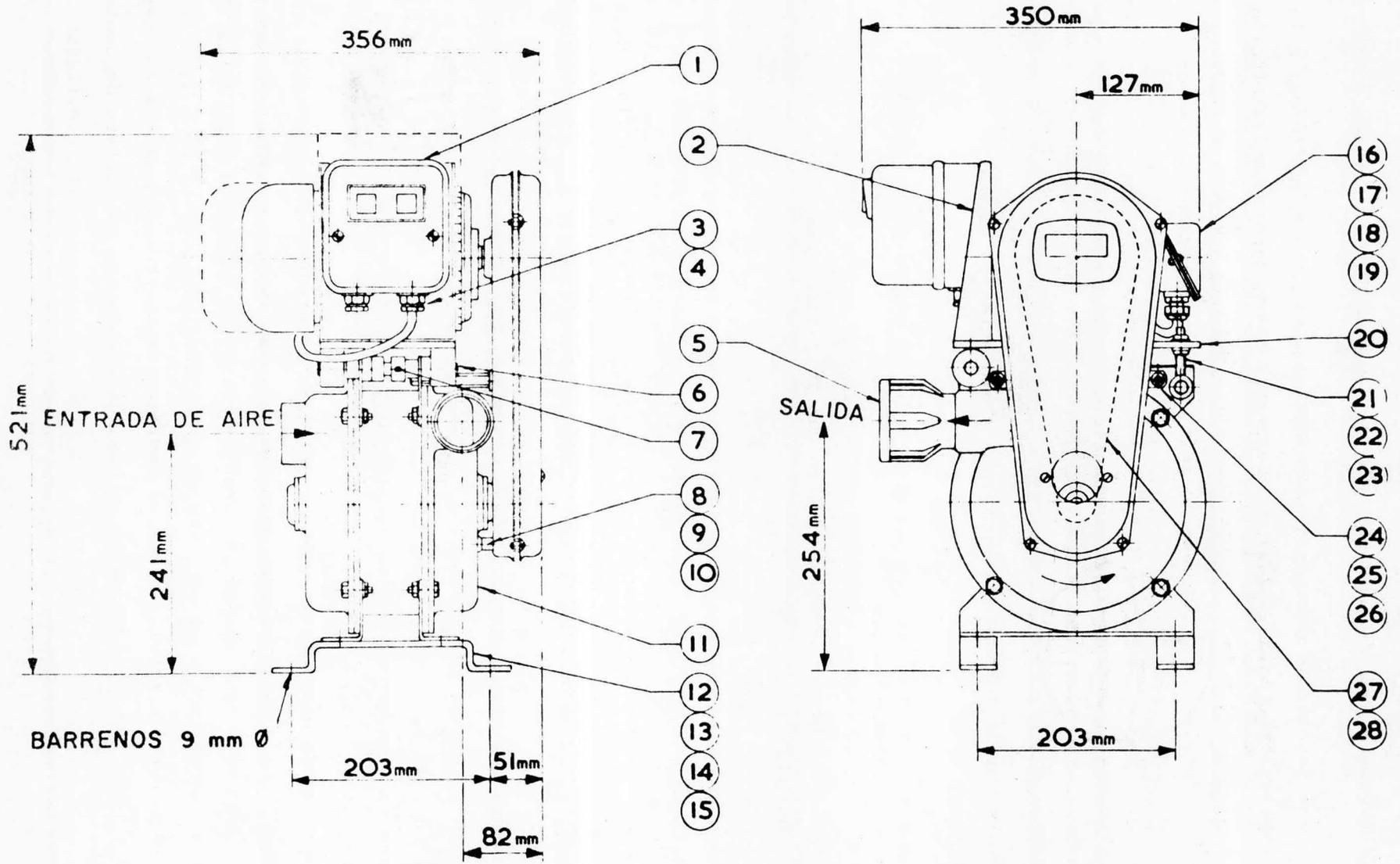


Fig. 3.2 MOTOVENTILADOR

LISTA DE PARTES DEL MOTOVENTILADOR TIPO Y3 B.V.C.

ARTICULO	CANTIDAD	DESCRIPCION
1	1	Arrancador para motor de 3 fases Y3/115
2	1	Soporte del arrancador
	4	Tornillos de fijación
	4	Arandelas de presión
3	3	Conexión para el cable
4	0.91 m	Cable
5	1	Abertura de salida del difusor
6	2	Perno soporte del cuerpo
7	2	Cuello separador
8	1	Separador (del soporte guardabanda)
9	1	Tornillo
10	1	Arandela de presión
11	1	Ventilador Y3
12	2	Base soporte
13	4	Tornillo
14	4	Tuerca
15	4	Arandela de presión
16	1	Motor de 1.5 H.P. Y3/115
17	4	Tornillo
18	4	Tuerca
19	4	Arandela de presión
20	1	Plataforma del motor
21	2	Tornillo de ajuste
22	2	Tuerca
23	2	Tuerca de presión
24	2	Sostén separador
25	4	Tuerca
26	4	Arandela de presión
27	1	Banda conductora Y3/115
28	1	Polea del motor

El conducto de descarga del ventilador es de manguera plástica flexible - con un refuerzo metálico que evita se pliegue totalmente y se estrangule.

El termómetro a la entrada del aire está montado sobre la tubería a la descarga del ventilador. Se trata de un termómetro con elemento sensor bimetálico- con carátula cuya graduación en °C va de -30 a 60.

La placa de orificio y el piezómetro en U, forman el dispositivo para me-- dir el caudal de aire introducido al quemador. El manómetro o piezómetro en U - está constituido por un tubo de vidrio con la escala graduada colocada en el pa- nel del tablero. El nivel del líquido medidor se ajusta a cero con una tuerca - que eleva o baja una ramificación del manómetro. La escala del tubo está cali-- brada en kg/h como resultado de una equivalencia entre la caída de presión en - la placa de orificio y el flujo másico que la provoca; va de 0 a 175 kg/h para- un estado de referencia del aire de  $1.29 \text{ kg/m}^3$  de densidad a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

Con el regulador de presión del aire se uniformiza su flujo y presión de - entrada al quemador. Se encuentra instalado sobre el quemador en la parte fron- tal del panel como se observa en la figura 3.3 (al final de esta sección). El - caudal máximo que maneja es de 160 kg/h (mismo caudal del ventilador) con una - presión de salida casi constante de 0.024 bar (250 mm c.a.). Su presión máxima- de admisión es de 0.35 bar y el rango de presión de descarga de 0.0225 a 0.037- bar según sea calibrado.

### 3.2. Suministro de combustible

#### Suministro de combustible líquido.

El flujo de combustible se controla con una válvula manual localizada so-- bre el panel en el caudalímetro. Esta válvula regula la apertura y cierre para- arranque y paro normales o de trabajo. Si se presenta alguna alteración, inesta- bilidad o interrupción de la flama, se provocará el accionamiento de la válvula de actuador de solenoide por medio del detector de flama ultravioleta. Si la -- flama se extingue la válvula de solenoide cierra inmediatamente evitando se de- rrame el combustible y se ahogue el quemador y la cámara de combustión. Si no - cierra obligará al operador a actuar cerrando la válvula de regulación para des- pués purgar el quemador y la cámara de los residuos de combustible no quemado.

Para medir el flujo másico de combustible líquido la UCC tiene un caudalí- metro o rotámetro consistente de un flotador que se mueve en el interior de un- tubo cónico. La posición del flotador cambia por la acción de la corriente as--

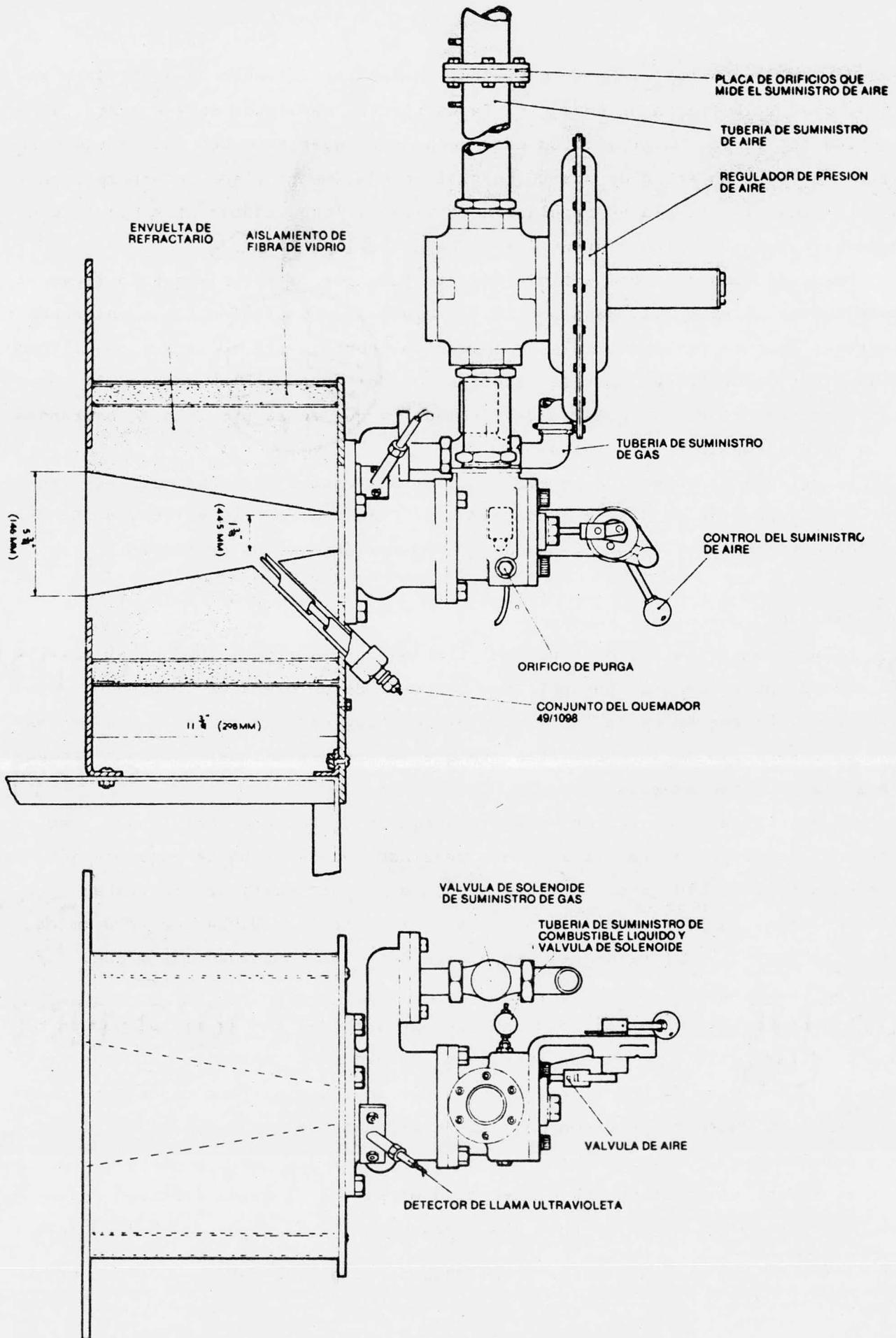


Fig. 3.3 UNIDAD DE DEMOSTRACION DE COMBUSTION  
CONJUNTO DEL QUEMADOR Y SU ENVUELTA

cedente del combustible. En su movimiento encuentra un punto de equilibrio entre su peso y la fuerza de empuje de la corriente, señalando en ese punto la magnitud del flujo. La graduación está hecha para queroseno con una densidad relativa de 0.8 y un flujo de 3 a 20 kg/h. El caudalímetro tiene incorporada en su parte baja la válvula de regulación ya citada. Tiene además otra escala con graduación para petróleo diáfano 2 a 16 kg/h.

Desde el tanque el combustible líquido pasa por la tubería que lo lleva al caudalímetro, figura 3.1. Pasa por la válvula de regulación de flujo, el caudalímetro y después por la válvula de solenoide, normalmente abierta y por último al quemador donde tiene lugar la vaporización del combustible mediante la energía almacenada en el refractario del quemador y que fuera producto del arranque de la unidad con combustible gaseoso.

La válvula de solenoide permanece abierta y cierra accionada por el electroimán. Su presión de diseño es de 5.2 bar. Funciona con 110 volts y 60 Hz de corriente eléctrica y está alambrada al sistema eléctrico de protección.

Suministro de combustible gaseoso.

El gas combustible idóneo para el tipo de quemador de la UCC es el gas LP\* (licuado de petróleo). Es por esto que se trata de un quemador combinado o dual y múltiple. El gas LP es de fácil adquisición, por esta razón es el que se usa para el desarrollo de las prácticas, ya que se puede abastecer mediante tanques portátiles o estacionarios.

El gas LP se encuentra en estado líquido en el interior del tanque y se vaporiza al pasar por el regulador. Este regulador es del tipo de baja presión, se encuentra instalado sobre el larguero inferior del bastidor. Su trabajo consiste en bajar la presión de más de 1 bar a la entrada a 0.024 bar (250 mm ca.) que es la presión de llegada del gas al quemador. La capacidad máxima del regulador es de 25 kg/h.

Después de pasar por el regulador, la presión del gas es medida por un manómetro diferencial antes de su entrada al quemador. El manómetro debe estar lleno de agua antes de que el gas circule por la tubería. Este manómetro consiste en un tubo en forma de U con una escala graduada de 0 a 0.7 m.c.a., es decir de 0 a 0.068 bar.

El tercer dispositivo por el que pasa el gas es el caudalímetro o rotámetro; su escala está graduada para gas propano con un flujo de 2.5 a 18.5 kg/h -

---

\* Los componentes del gas LP son aproximadamente: 61% de butano y 39% de propano.

en condiciones de 15°C y de 0.125 m c.a. a 0.012 bar es decir una densidad de 1.44 kg/m<sup>3</sup>. Tiene además otra graduación para gas LP que va de 2.5 a 18.0 kg/h.

En el quemador el gas es introducido a una sección troncocónica divergente en estado de vapor y listo para ser mezclado con la corriente de aire para que después de la envoltura refractaria inicie su combustión.

### 3.3. Quemador, cámara de combustión y chimenea

#### Quemador

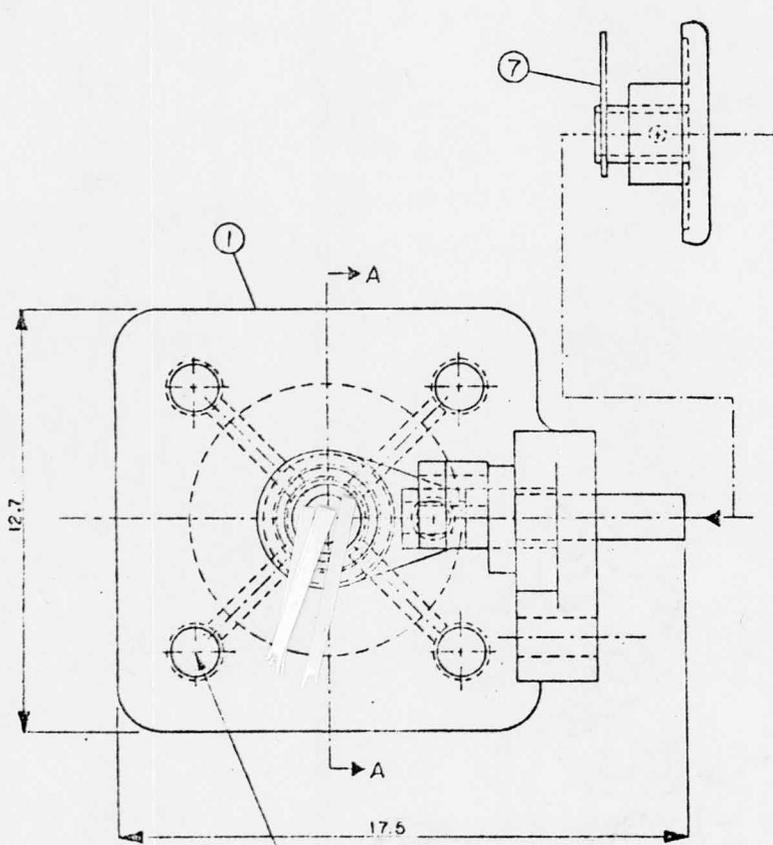
El quemador de la UCC es un quemador dual-múltiple por quemar varios tipos de combustibles gaseosos y varios tipos de combustibles líquidos. Está formado por cuatro partes principales que son la coraza, conductos, lumbreras y la válvula de regulación de aire. Están fabricadas con fundición de hierro maquinado sólo en las partes de acoplamiento y ajuste. Todas sus partes son estáticas excepto el obturador que cierra el paso del aire por sobre la boquilla atomizadora del combustible. El movimiento de este obturador es transmitido por una extensión guiada que se une con la perilla de regulación.

El obturador de cierre está unido por cuatro pernos a la caja de entrada del aire. Esta caja provoca turbulencia ciclónica debida a los ocho barrenos (dos por cada cara libre de la caja) laterales, que están dispuestos adyacentemente a la pared contigua, ver plano 2. Esta posición de los agujeros de entrada del aire inducen un movimiento tangencial que favorece el mezclado del combustible con el aire.

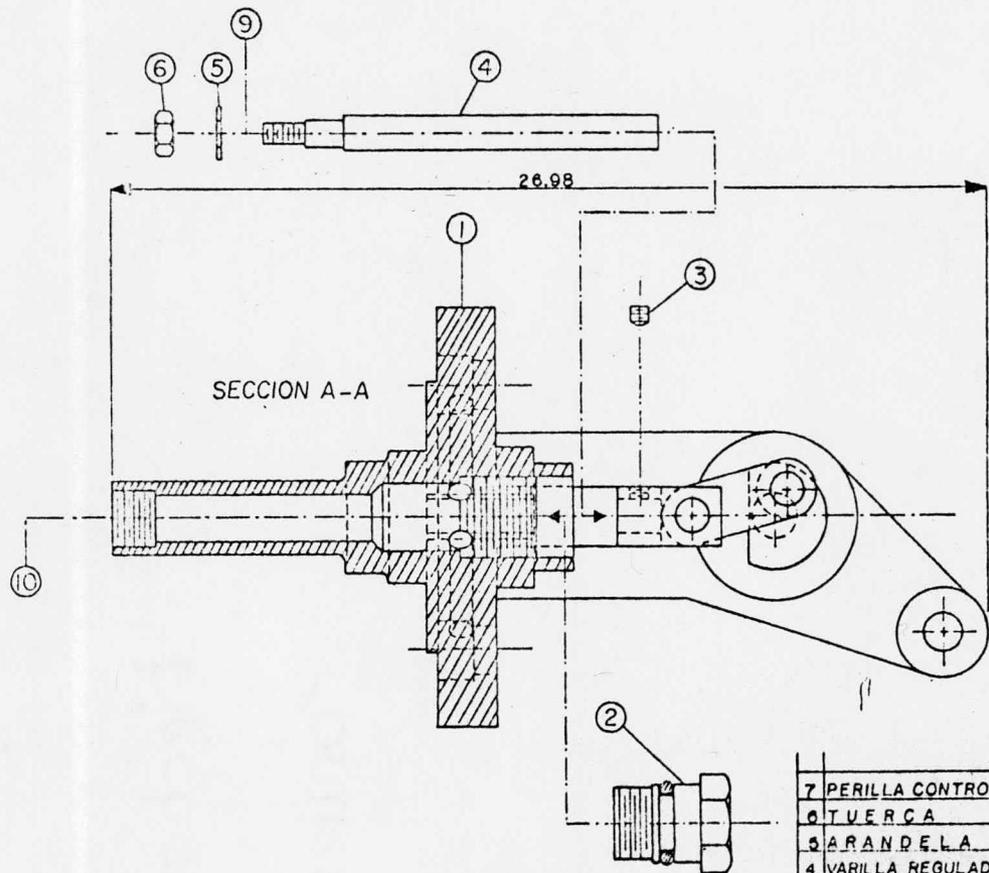
El conducto de llegada del combustible gaseoso se conecta mediante una brida a una caja de sección divergente (ver plano 4) que concluye con una cavidad anular coaxial al flujo de aire. Esta cavidad se halla situada antes de que el cuerpo del quemador se una a la envoltura refractaria. Es decir, que la entrada de combustible líquido se realiza en un punto anterior a la del combustible gaseoso y por medio de una boquilla atomizadora.

El combustible líquido entra al quemador a través de los pernos de sujeción del mecanismo de regulación y distribución (ver los plano 1 y 3). A este mecanismo de regulación y distribución de halla acoplada la boquilla atomizadora (ver plano 2).

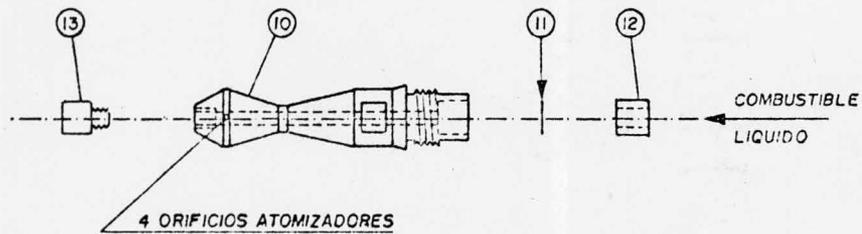
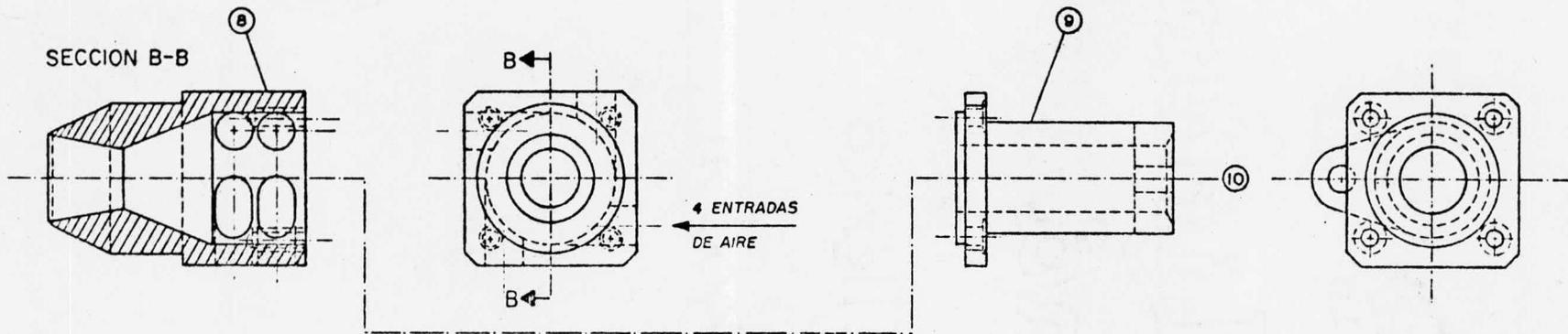
La boquilla de atomización es la única parte del quemador cuyo material es acero totalmente maquinado. Su sección interna es cilíndrica a través de la cual pasa el combustible líquido que es filtrado por una pequeña malla. Su salida se hace por entre cuatro orificios de 1 mm de diámetro los que atomizan el



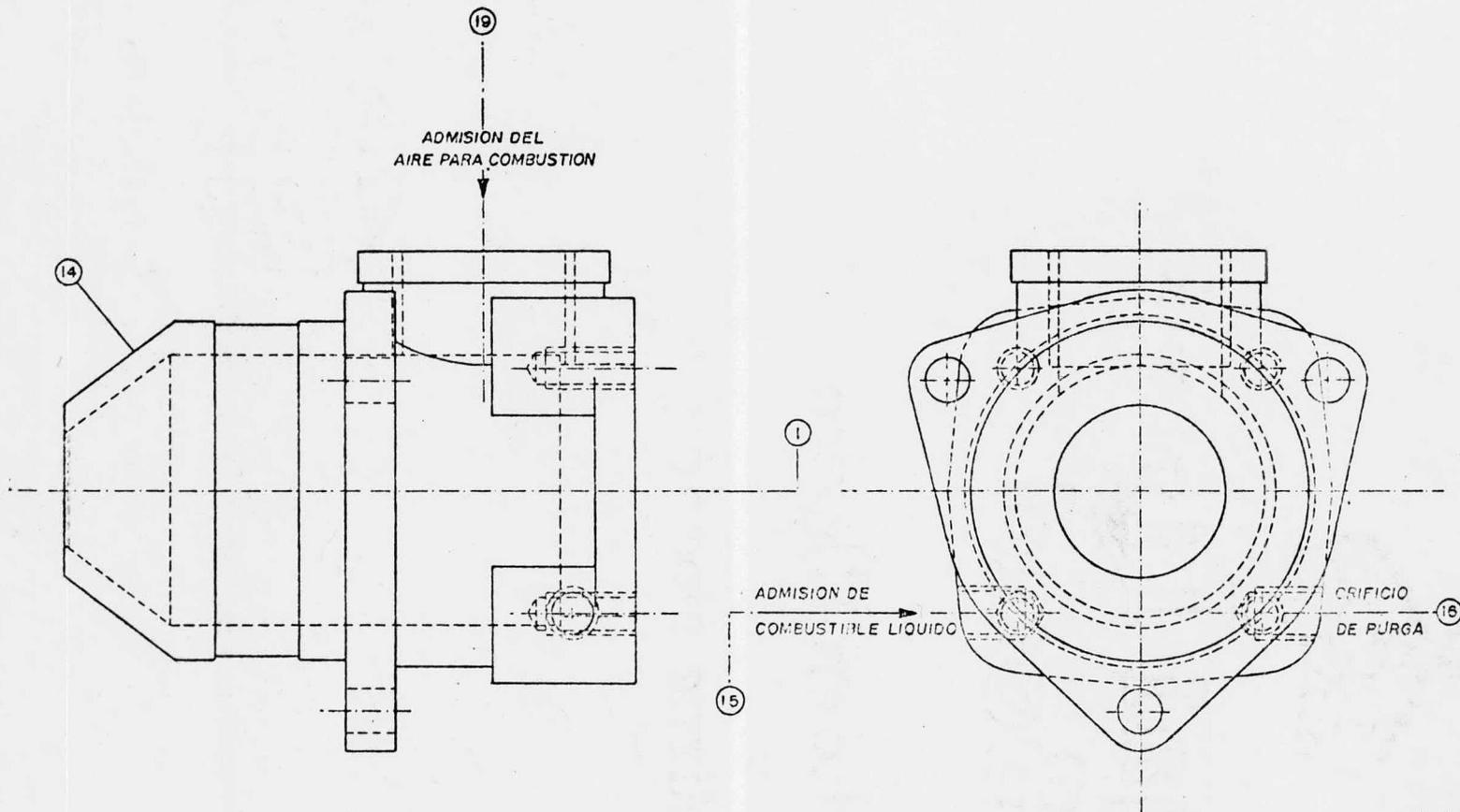
CONDUCTO DE LLEGADA  
DEL COMBUSTIBLE LIQUIDO



7	PERILLA CONTROL DE AIRE
6	TUERCA
5	ARANDELA
4	VARILLA REGULADORA
3	TORNILLO PRISIONERO
2	TAPON CON ROSCA Y SELLO
1	MECANISMO REG. Y DIST.
PZA	NOMBRE
REGULADOR DE AIRE Y DISTRIBUIDOR DE LIQUIDO	
ACOT.: cm	
ESC. 1:2	

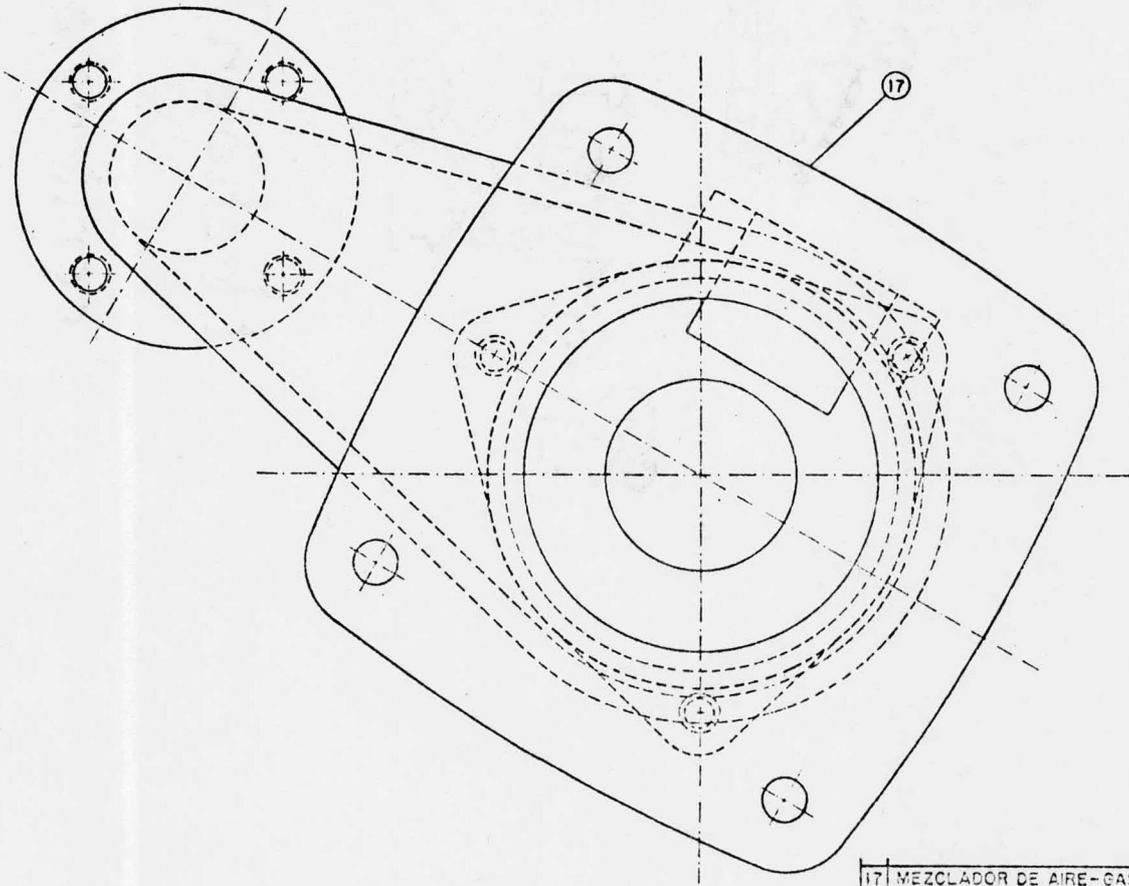
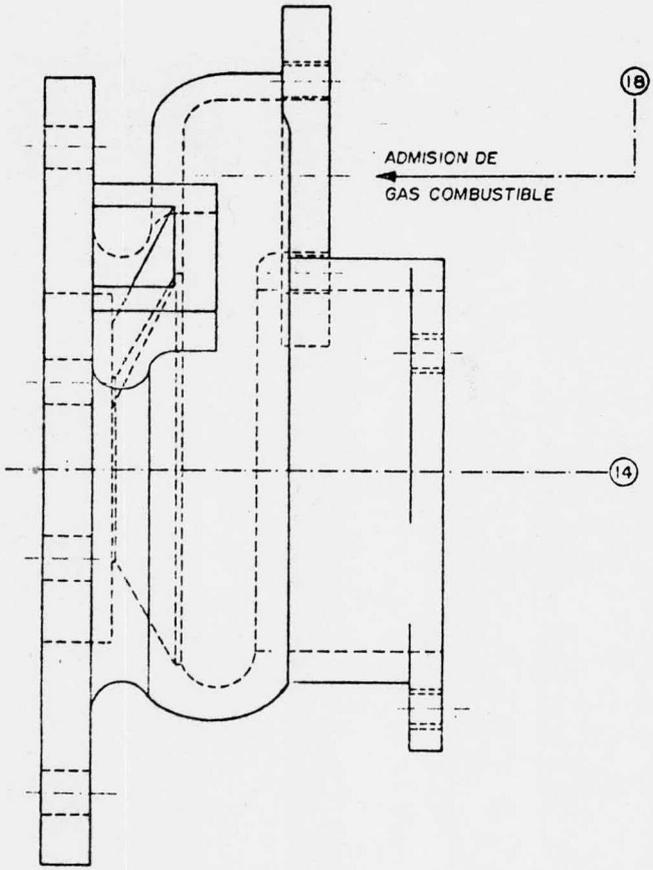


13	TAPON - TORNILLO
12	RETEH DEL FILTRO
11	MALLA METALICA - FILTRO
10	ATOMIZADOR
9	PARTE TRASERA DEL CONO
8	CONO OBTURADOR
A N P.	NOMBRE
CONO OBTURADOR Y ATOMIZADOR	
ACOT: cm	2
ESC: 12	



16	TAPON ROSCADO
15	VALVULA SOLENCIDE
14	CAMARA DE SUMINISTRO-AIRE
PZA	NOMBRE
	CAMARA DE SUMINISTRO DE AIRE
ACOT.:cm	3
ESC. 1:2	

18 VALVULA SOLENOIDE



17	MEZCLADOR DE AIRE-GAS	
PZA	NOMBRE	
	MEZCLADOR DE AIRE-GAS	
	ACOT. cm	4
	ESC. 1:2	

combustible hacia la corriente de aire.

### Cámara de combustión

La cámara de combustión constituye el espacio donde se produce la flama, - la confina y hace posible su observación visual, aislando y absorbiendo la energía calorífica liberada por la combustión mediante el agua de enfriamiento que circula por la caja de agua. La caja de agua es el espacio que se encuentra entre dos cilindros, el interno que forma propiamente la cámara y el externo de mayor diámetro que es la parte visible. En torno a ella se hallan cinco mirillas de observación, cuatro de ellas radiales a la cámara y una más de mayor tamaño localizada en su parte posterior debajo de la chimenea. Con ellas se puede observar las condiciones y características de la combustión.

La envoltura refractaria se encuentra alojada en la sección de menor diámetro de la cámara de combustión. Está formada por un aglomerado refractario que diverge en el sentido de la proyección de la flama con el fin de reducir la velocidad de salida de la mezcla combustible.

El frente de la cámara que se une a la envolvente refractaria carece de enfriamiento con la finalidad de que se almacene energía que facilite la evaporación del combustible líquido.

La cara posterior de la cámara tiene un compartimiento en el que circula agua de enfriamiento siendo la última sección del circuito de agua por el que pasa ésta. El agua de enfriamiento entra por la parte baja anterior de la cámara (ver la figura 3.1), y pasa al espacio entre cilindros, enseguida sale por la cresta rectangular localizada en la parte superior de ahí se conduce al compartimiento de la tapa posterior de la cámara para después salir al drenaje. A la salida se halla un termopar con el que se mide la temperatura de salida del agua. También en la tapa posterior se encuentran: la chimenea, el orificio toma muestras de los gases de escape y la mirilla ya citada. En la chimenea se encuentra el termopar de gases de escape aislado de la radiación de la flama.

La cámara de combustión (los dos cilindros, las bridas y la tapa posterior) está fabricada con lámina de acero inoxidable de 1.6 mm de espesor, rolada y soldada.

### Chimenea

Indicador de temperatura de gases de escape. Este indicador de temperaturas está construido para recibir la señal eléctrica en milivolts originada en -

el termopar insertado en la chimenea. Tiene un sistema de amplificación eléctrica de alta ganancia. Algunas de sus especificaciones son: escala de 0° a 1000°C, legibilidad 20°C, precisión  $\pm 5.0\%$  de la escala, tiempo de respuesta 95.0% de la lectura total a un segundo, temperatura máxima y mínima de operación de 55° a 0°C, humedad relativa de operación de 0 a 90%, suministro eléctrico 110 V a 60 Hz y potencia eléctrica 10 VA. Su conexión al suministro eléctrico está hecha a la toma general de la UCC. La señal enviada por el termopar es amplificada suficientemente para que accione el servomotor de la aguja indicadora.

En la chimenea se encuentra el termopar protegido de la radiación de la flama lo que hace que mida solamente la temperatura de los gases de escape.

Este instrumento por su rango de temperaturas puede denominarse pirómetro. Finalmente sus dimensiones son de 196 mm de largo por 102 mm de ancho localizándose en la parte superior izquierda del tablero.

Varilla tomamuestras de gases y orificio para pirómetro de succión. En la tapa posterior de la cámara se encuentra el orificio para el tubo tomamuestras de los gases de escape. Por éste salen los gases para ser conducidos al analizador de Orsat. El tomamuestras consiste de tres tubos: el del centro por el que salen los gases de escape y dos más que sirven de entrada y salida para el agua de enfriamiento del tomamuestras. Este se ajusta a la tapa posterior con una tuerca que permite girar el tomamuestras para absorber gases de diferentes zonas de la cámara de combustión, ver la figura 3.1.

Para el pirómetro de succión (instrumento termométrico auxiliar detallado en la sección 5.5.B), se utiliza el mismo orificio que para el tubo tomamuestras es decir, es preciso extraer el tubo tomamuestras para introducir el tubo del pirómetro de succión.

Chimenea, termopozos y pantalla anticalor. Los gases producidos por la combustión se descargan por un tubo acodado comunicado a la tapa posterior de la cámara de combustión. En el se encuentran los agujeros o termopozos para el pirómetro del indicador de gases de escape, uno de los agujeros está expuesto a la radiación y otro aislado de ella. Sobre la chimenea existe una pantalla anticalor que la aísla térmicamente protegiendo a los operadores de la radiación y del contacto directo.

### 3.4. Sistema eléctrico de arranque y protección

Localizados en el tablero de control se hallan los interruptores y conmutadores eléctricos: botones de arranque y paro del ventilador, botón de encendido o de chispa de ignición, conmutador del relevador, y botón de restitución o rearmado del relevador. La función de cada uno de estos elementos se detalla en la sección 5.1 (Arranque y paro del equipo). En la figura 3.4 se muestra el diagrama de conexiones de la UCC.

#### Electrodo de ignición

Consiste en una bujía cuyas terminales están conectadas a las de un transformador elevador. Por su entrehierro salta la chispa de encendido de la mezcla aire-combustible. La bujía se encuentra debajo del quemador y su entrehierro traspasa el refractario hasta la corriente de la mezcla. En la figura 3.3 se puede observar la localización del electrodo de ignición.

#### Detector de flama ultravioleta, indicador de temperatura de salida del agua y válvulas de solenoide

El detector de radiaciones ultravioletas de flama está construido para operar entre  $-40^{\circ}$  a  $110^{\circ}\text{C}$  su presión máxima de operación es de 0.35 bar manométrica. En el equipo el detector está instalado sobre una mirilla localizada en la envoltura refractaria del quemador y es enfriado por aire que proviene del ventilador. Su rejilla de detección de radiaciones está orientada hacia la flama principal y protegida de las radiaciones de la chispa de ignición. El detector está conectado al sistema eléctrico como se ve en la figura 3.4 y, al igual que el indicador de temperatura de agua de salida controla el cierre automático de las válvulas de solenoide.

El indicador de temperatura de agua de salida está conectado a un relevador que envía una señal de cierre a las válvulas de solenoide cuando la temperatura del agua de enfriamiento excede un valor prefijado en su carátula indicadora.

### 3.5. Sistema de agua de enfriamiento

Este sistema tiene como función absorber parte de la energía producida por la combustión, está compuesto por la caja de agua anular que forman los cilindros de la cámara, los termómetros de entrada y salida del agua, el rotámetro y el orificio de agua de enfriamiento en el tomamuestras.

DIAGRAMA DE CONEXIONES PARA LA UNIDAD DE COMBUSTION CONTINUA HILTON 112/115V  
 MONOFASICO  
 60 HZ

— ACTIVO ROJO O MARRON  
 - - - NEUTRO NEGRO O AZUL  
 - - - TIERRA VERDE O VERDE Y AMARILLO

TODOS LOS CABLES DE 10 A EXCEPTO DONDE SE INDICA 40 CIRCUITO DE TIERRA COMPLETO 30 A

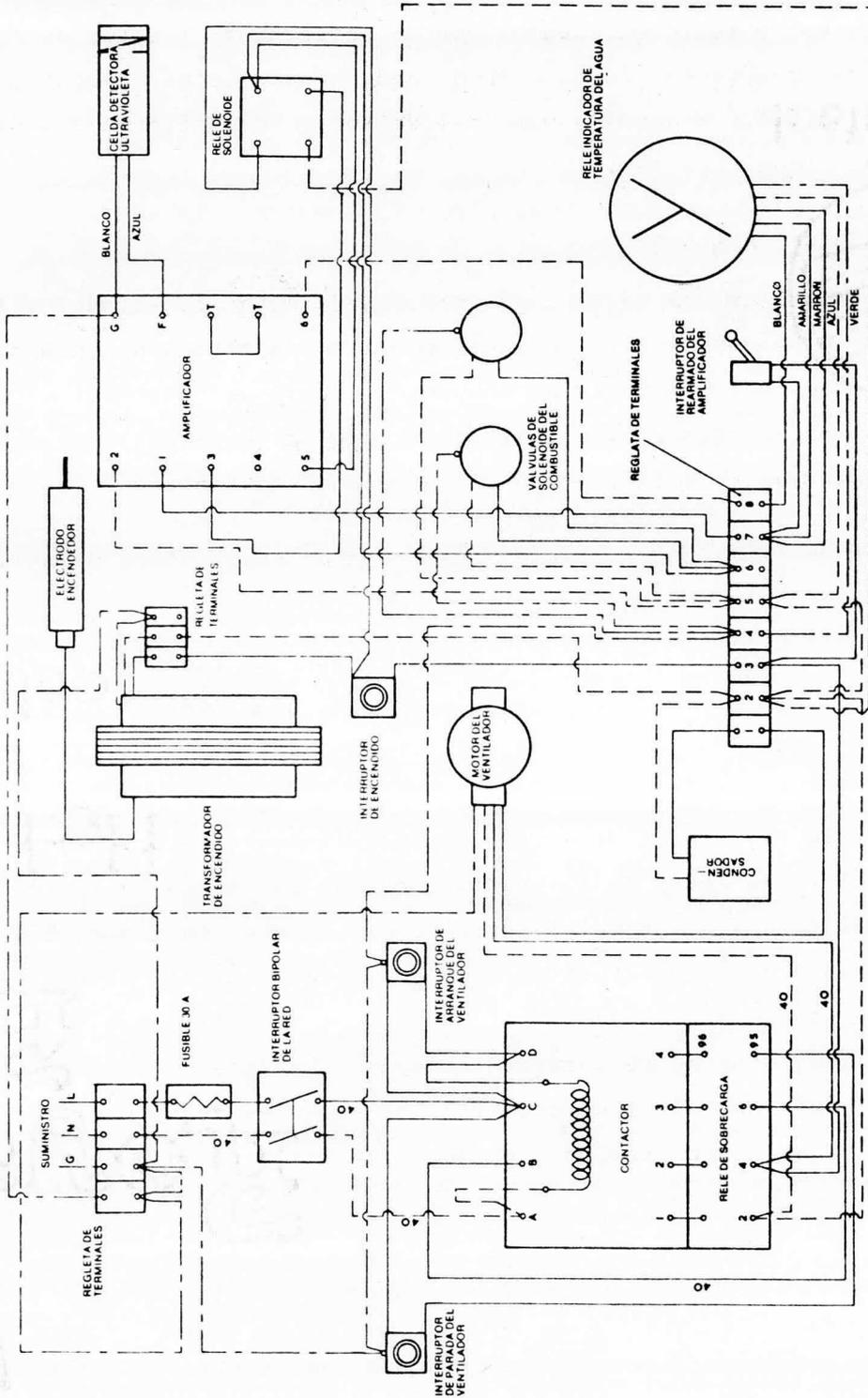


Fig. 3.4

El espacio entre cilindros para la camisa del agua de enfriamiento es de 50 mm. Esto se puede observar en la figura 3.1. Para la medición de las temperaturas de entrada y salida del agua de enfriamiento, la UCC tiene dos termómetros: uno de sensor bimetálico a la entrada cuyo rango es de  $-30^{\circ}$  a  $60^{\circ}\text{C}$  y una legibilidad de  $1^{\circ}\text{C}$ ; y el termómetro de salida también de elemento sensor bimetálico que tiene la doble función de indicar la temperatura y de controlar el cierre de las válvulas de solenoide con la ayuda de un relevador cuando el agua excede la temperatura prefijada en la carátula, su escala va de  $0^{\circ}$  a  $100^{\circ}\text{C}$  con una legibilidad de  $2^{\circ}\text{C}$ .

Para medir el flujo másico del agua de enfriamiento el equipo cuenta con un rotámetro de graduación en kg/h y un rango de 200 a 1800 y su legibilidad es de 50 kg/h.

### 3.6. Bastidor

El bastidor o soporte de la UCC está construido con ángulo estructural de 31.75 mm por 6 mm de espesor y sostiene a la cámara a una altura de 940 mm del piso. El gabinete que forma el tablero de control está elaborado con lámina de 1.6 mm de espesor. (Ver figura 3.5)

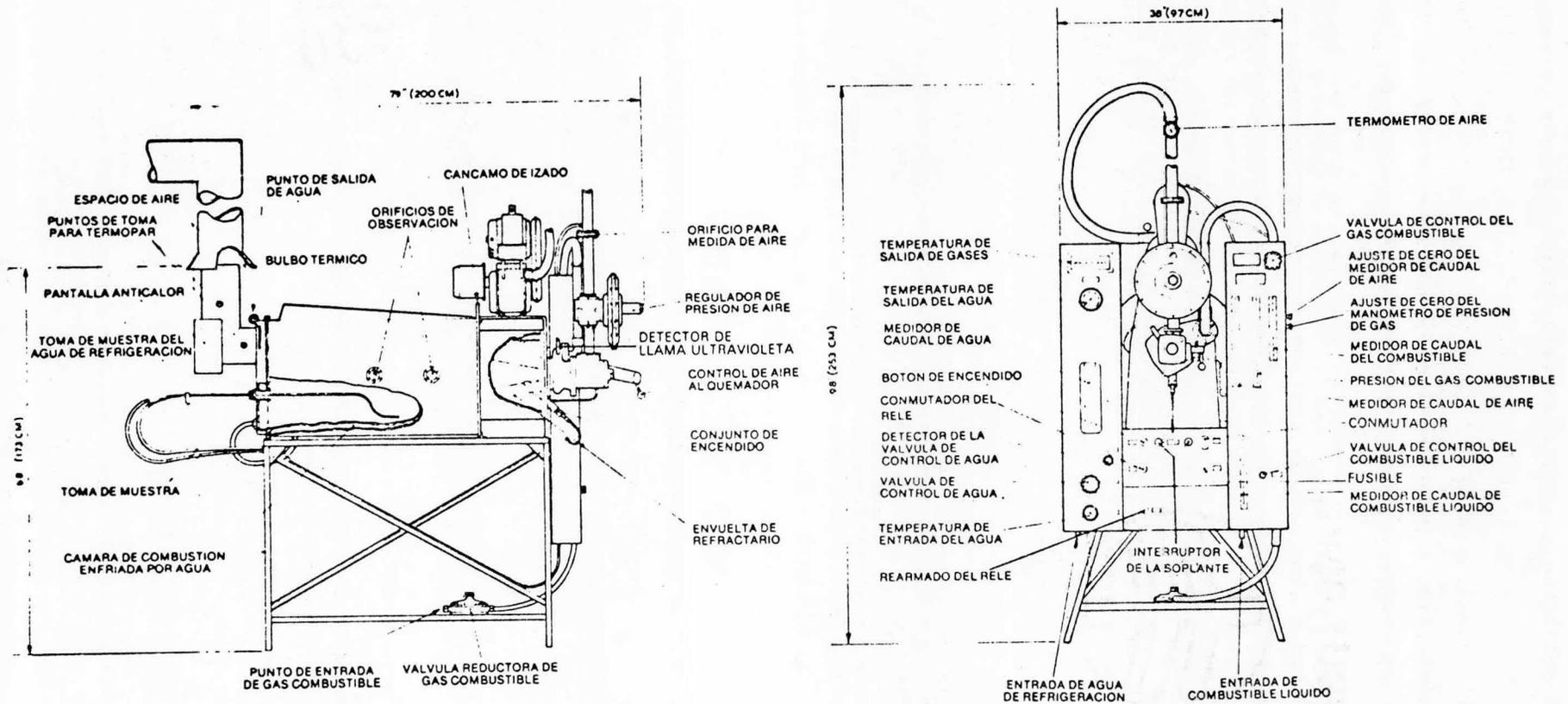


Fig. 3.5 UNIDAD DE DEMOSTRACION DE COMBUSTION

UNIVERSITY OF MICHIGAN



UNIVERSITY OF MICHIGAN

UNIVERSITY OF MICHIGAN

UNIVERSITY OF MICHIGAN

UNIVERSITY OF MICHIGAN

CAPITULO 4

## 4. INSTALACION DEL EQUIPO

### 4.1. Características del local

Debido a las características de operación de la UCC es necesario observar ciertas condiciones con las que debe cumplir el local donde se halle instalada. Una de éstas es la ventilación que tiene que ser la adecuada para evitar concentraciones de gases en el lugar y reducir los riesgos de intoxicación. Otra condición con la que se debe cumplir es concerniente al acceso a la unidad procurando que sea lo suficientemente grande el espacio a su alrededor para permitir que pueda llegarse a cualquier parte del equipo sin ningún obstáculo.

La UCC del Laboratorio de Máquinas Térmicas cumple en buena forma con estas condiciones (ver figura 4.1) de ventilación y espacio lo que beneficia directamente al usuario y a la misma instalación.

### 4.2. Suministros

La UCC necesita para su funcionamiento de cuatro suministros indispensables que son:

a) Suministro de combustible líquido y gaseoso. El suministro de combustible líquido necesita de un tanque que se halle a una altura mínima de 2 m por encima de la línea media del quemador con el objeto de que descienda con suficiente presión estática. La viscosidad cinemática del combustible no debe ser mayor a  $2.42 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. La capacidad del tanque debe ser acorde con la duración de la práctica por lo cual se puede recomendar uno de un volumen de 25 l.

El combustible gaseoso (Gas LP) es alimentado como se ve en la figura 4.1, por tubería desde el tanque estacionario hasta la UCC. El tanque estacionario está situado en el espacio exterior próximo a la nave del laboratorio y su capacidad es de 1,000 l. El regulador de presión es de primera etapa y reduce la presión a 0.69 bar. El regulador del equipo es de segunda etapa y baja la presión a aproximadamente 0.024 bar que es la presión de operación del quemador. La capacidad de flujo de estos reguladores es de 25 kg/h como máximo.

b) Suministro de energía eléctrica. La energía requerida para el funcionamiento del sistema eléctrico (ignición, motoventilador, válvulas solenoides, indicadores de temperatura, etc.) es monofásica con una tensión de 110/115 volts y 60 Hz. Todos los dispositivos en el diagrama eléctrico de la figura 4.2 están conectados a la fuente.



DIAGRAMA DE CIRCUITOS PARA UNIDAD DE COMBUSTION CONTINUA HILTON

110/115V  
MONOFASICO  
60 HZ

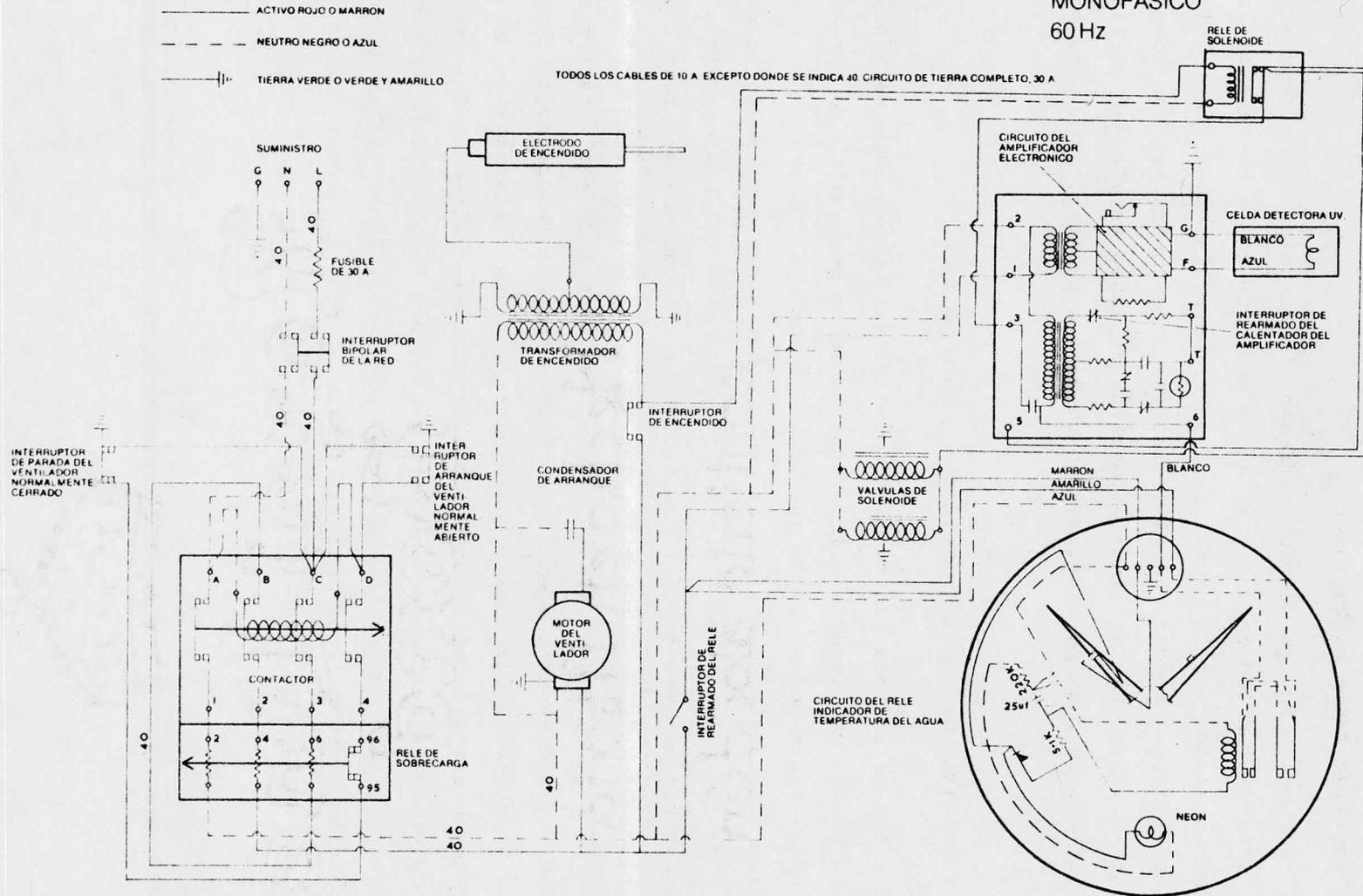


Fig. 4.2

c) Suministro de aire comburente. El suministro de aire al quemador se realiza mediante el motoventilador. El aire es tomado libremente de la atmósfera - sin cambiar sus condiciones y su flujo y temperatura son medidos después de que ha sido impelido hacia el quemador.

d) Suministro de agua de enfriamiento. La circulación de agua de enfriamiento tiene la función de auxiliar en la medición de la energía de la combustión, además de enfriar la cámara para poder hacer las mediciones y las observaciones precisadas. La doble pared de la cámara de combustión funciona como camisa de enfriamiento. La varilla tomamuestras de gases también es enfriada por agua. El flujo de agua de enfriamiento no debe ser inferior en masa a 1,800 kg/h.

#### 4.3. Ubicación del equipo en el laboratorio

El sitio de instalación de la UCC dentro del Laboratorio de Máquinas Térmicas se ha hecho cumpliendo con los requerimientos necesarios de seguridad y espacio. En el plano de ubicación que se halla en la figura 4.1 puede observarse que la UCC cuenta con el espacio necesario para poder hacer observaciones y permitir la salida libre del tomamuestras. En la misma vista de planta del Laboratorio se muestra la localización de los equipos que también forman parte del mismo y de aquellos otros que son parte del funcionamiento de la UCC, como son el tanque de combustible líquido, el tanque de gas y la torre de enfriamiento que se encuentra en la parte exterior del laboratorio. Como la UCC es capaz de quemar diferentes combustibles líquidos y gaseosos se le ha provisto de un pequeño depósito para combustible líquido el cual se puede apreciar en el dibujo de vista de perfil de la UCC (figura 4.3). También tiene una conexión para suministrar otro combustible gaseoso que no sea el del tanque principal. En el mismo dibujo de la figura 4.3 se ilustra el perfil y frente de la UCC y sus necesidades mínimas de espacio.

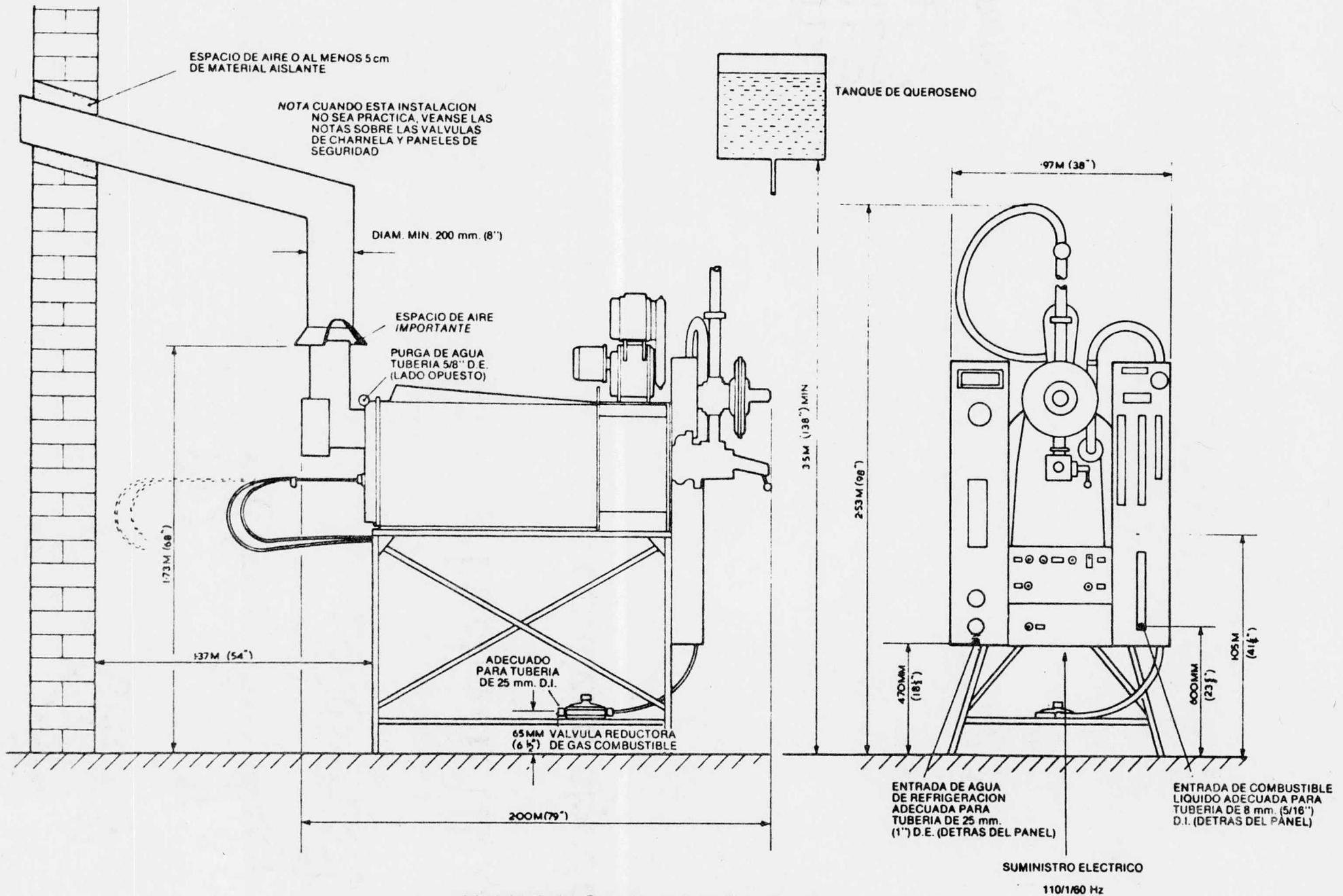


Fig. 4.3 Unidad de Combustion Continua  
DIAGRAMA DE INSTALACION

UNIVERSITY OF TORONTO



CAPITULO 5

## 5. OPERACION DEL EQUIPO

### 5.1. Arranque del equipo con combustible gaseoso

Para seguir el proceso de arranque es necesario consultar la figura 5.1 para identificar los mandos y controles que se referencian. El encendido con combustible gaseoso se realiza en proporciones estequiométricas de combustión con objeto de estabilizar rápidamente el proceso en el equipo. La secuencia de encendido es la siguiente:

1) Verificar que exista suficiente combustible para el programa de la práctica, así como también la calibración del manómetro para el combustible gaseoso y del medidor de caudal de aire.

2) El flujo de combustible (líquido o gaseoso) se regula desde las válvulas localizadas sobre el tablero de instrumentos. El caudal de aire puede regularse con la válvula del quemador.

3) Verificar que la válvula de control del combustible líquido esté cerrada.

4) Quitar el tapón de purga localizado en la parte baja de la cámara de combustión, dejando derramar todo el condensado, posteriormente se tapa el orificio.

5) El regulador de presión para el gas combustible de la UCC debe estar calibrado a 0.024 bar (125 mm c.a.). La calibración se hace con ayuda del manómetro para gas estando abierta la válvula del tanque abastecedor.

6) Comprobar que haya suministro de agua de enfriamiento hacia la cámara y que fluya libremente.

7) Establecer el flujo de agua en un régimen de 1,600 kg/h.

8) Apagar el interruptor de restitución.

9) Oprimir el botón de restitución.

10) Conectar el interruptor de energía eléctrica. Con el control de flujo de aire del quemador en la posición de mínima apertura arrancar el ventilador. Cuando haya alcanzado la velocidad de máxima operación abrir la válvula de flujo de aire en su máxima posición y medir el caudal. Este debe ser aproximadamente de 170 kg/h y el mínimo flujo no debe ser menor a 50 kg/h.

11) Dejar que con la válvula totalmente abierta el ventilador purgue durante 2 minutos el quemador y la cámara de combustión. No debe haber combustible no quemado ni en la cámara ni en el conducto de gases de escape.

12) Girar el control de la válvula de aire a la posición de mínima apertura

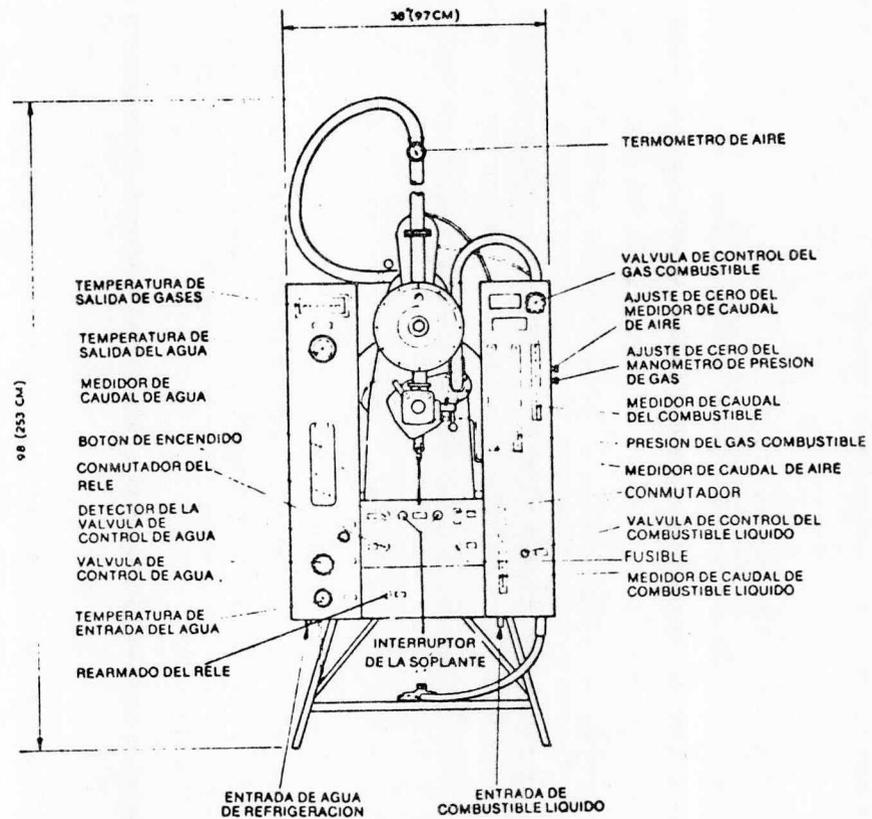
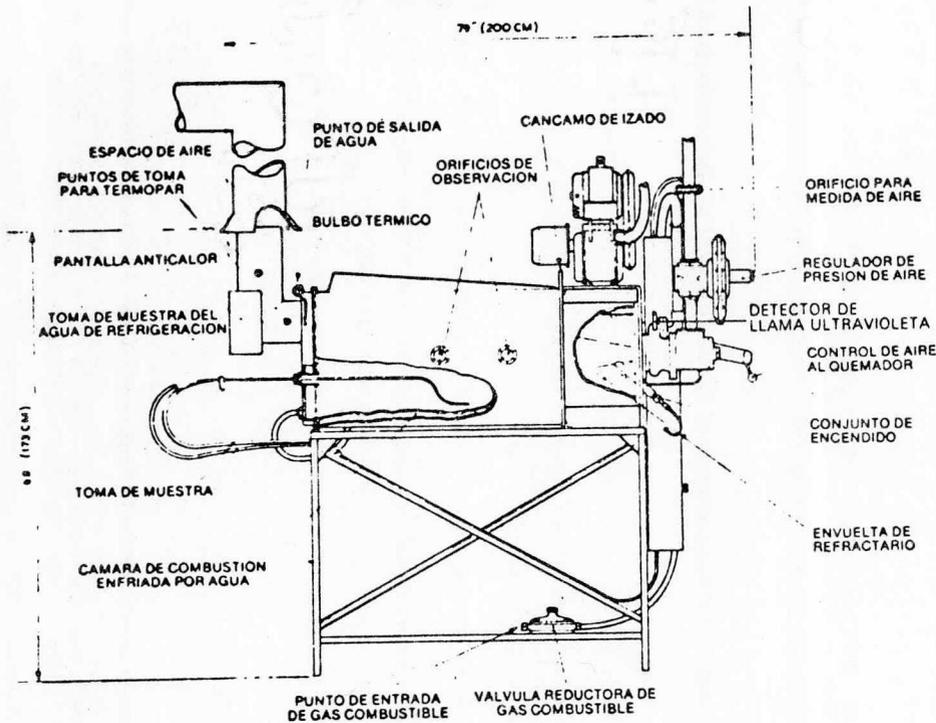


Fig. 5.1 UNIDAD DE DEMOSTRACION DE COMBUSTION

13) Ajustar el control de aire del quemador para un caudal másico de 120 kg/h.

14) Verificar que el agua de enfriamiento haya llenado la cámara y que salga de ella libremente.

15) Verificar el ajuste del indicador de temperatura de agua a la salida en 80°C.

16) Fijar un flujo de 7.8 kg/h de combustible gaseoso LP; para propano de 9.0 kg/h; para gas natural 11.5 kg/h. Esto sin variar el flujo de aire establecido en 120 kg/h.

17) Encender el interruptor restablecedor y verificar que la luz roja del termómetro de salida del agua esté encendida. Cinco segundos después la luz roja del interruptor restablecedor se encenderá y las válvulas de solenoide se abrirán. Presionar el botón de encendido y abrir la válvula de control de combustible gaseoso, cuando la flama se haya establecido se libera el botón.

Nota 1. El botón de chispa debe ser presionado sostenidamente durante el procedimiento de encendido, si se suelta antes de que la flama se establezca -- las válvulas de solenoide se cerrarán automáticamente. Durante la secuencia de encendido las válvulas de solenoide estarán abiertas por 15 segundos y se cerrarán si no se ha establecido una buena combustión. Si esto ocurre el procedimiento a seguir es el de la sección 5.3.

Nota 2. Si por cualquier razón la flama se extingue las válvulas de solenoide se cerrarán por orden del sistema de falla de flama 2 segundos después de que ésta se pierda. Si se desea arrancar nuevamente el equipo consultar la sección 5.3.

Nota 3. La luz de alarma del interruptor restablecedor indica que el sistema automático contra falla de flama entró en operación.

18) A partir de aquí seguir el programa del experimento.

## 5.2. Arranque del equipo con combustible líquido

En el proceso de arranque se recomienda seguir la figura 5.1 para localizar mandos y controles. Para arrancar el equipo con combustible líquido antes es preciso arrancarlo con gas. El encendido con combustible gaseoso debe hacerse en condiciones estequiométricas, de acuerdo con el procedimiento siguiente:

1) Verificar que exista suficiente combustible para el programa de la práctica, así como también la calibración del manómetro para el combustible gaseoso y del medidor de caudal de aire.

2) El flujo de combustible líquido o gaseoso se regula desde las válvulas localizadas sobre el tablero de instrumentos. El caudal de aire puede regularse con la válvula del quemador.

3) Verificar que la válvula de control del combustible líquido esté cerrada.

4) Quitar el tapón de purga localizado en la parte baja de la cámara de combustión dejando derramar todo el condensado, posteriormente se tapa el orificio.

5) El regulador de presión para el gas combustible de la UCC debe estar calibrado a 0.024 bar (125 mm c.a.). La calibración se hace con la ayuda del manómetro para gas estando abierta la válvula del tanque abastecedor.

6) Comprobar que haya suministro de agua de enfriamiento hacia la cámara y que fluya libremente.

7) Establecer el flujo de agua en un régimen de 1,600 kg/h.

8) Apagar el interruptor de restitución.

9) Oprimir el botón de restitución.

10) Conectar el interruptor de energía eléctrica. Con el control de flujo de aire del quemador en la posición de mínima apertura arrancar el ventilador. Cuando haya alcanzado la velocidad de máxima operación abrir la válvula de flujo de aire en su máxima posición y medir el caudal. Este debe ser aproximadamente de 170 kg/h y el mínimo flujo no debe ser menor a 50 kg/h.

11) Dejar que con la válvula totalmente abierta el ventilador purgue durante 2 minutos el quemador y la cámara de combustión. No debe haber combustible no quemado ni en la cámara ni en el conducto de gases de escape.

12) Girar el control de la válvula de aire a la posición de mínima apertura.

13) Ajustar el control de aire del quemador para un caudal másico de 120 kg/h.

14) Verificar que el agua de enfriamiento haya llenado la cámara y que salga de ella libremente.

15) Verificar el ajuste del indicador de temperatura del agua a la salida en 80°C.

16) Fijar un flujo de 7.8 kg/h de combustible gaseoso LP; para propano de 9.0 kg/h; para gas natural de 11.5 kg/h. Esto sin variar el flujo de aire esta-

blecido en 120 kg/h.

17) Encender el interruptor restablecedor y verificar que la luz roja del - termómetro de salida del agua esté encendida. Cinco segundos después la luz roja del interruptor restablecedor se encenderá v las válvulas de solenoide se abrirán. Presionar el botón de encendido v abrir la válvula de control de combustible gaseoso, cuando la flama se haya establecido se libera el botón.

18) Abrir gradualmente la válvula de control de combustible líquido mientras se cierra la válvula de control del combustible gaseoso. Durante el cambio es conveniente mantener la relación aire-combustible.

19) Teniendo cerrada la válvula de combustible gaseoso v habiendo establecido la flama con combustible líquido, entonces se prosigue con el programa del - experimento.

### 5.3. Falla de flama durante la operación

Si el sistema automático de falla de flama actúa durante el desarrollo de un experimento es porque la flama se volvió inestable o se extinguió. Para restablecer el funcionamiento normal se debe seguir el procedimiento de falla de flama que se detalla a continuación:

1) Cerrar las válvulas de control de flujo de combustibles localizadas en el panel de instrumentos.

2) Apagar el interruptor de restablecimiento y dejar enfriar 60 segundos - el sistema automático de interrupción.

3) Oprimir el botón de restablecimiento.

4) Ajustar el flujo de aire a 120 kg/h.

5) Repetir el procedimiento de arranque del equipo.

### 5.4. Paro del equipo

Para realizar el paro en condiciones normales se debe seguir el procedimiento siguiente consultando la figura 5.1 :

1) Cerrar la válvula de los tanques de combustibles. Con esto se permite - que la tubería de suministro se descargue.

2) Cerrar la válvula de combustible del tablero de instrumentos.

3) Apagar el interruptor de restablecimiento del panel de instrumentos.

4) Ajustar la válvula de aire del quemador en su posición de máxima apertura

ra para purgar la cámara de combustión durante 2 minutos.

5) Apagar el motoventilador.

6) Desconectar el suministro eléctrico.

7) Cerrar la válvula de aire del quemador.

8) Dejar circular el agua de enfriamiento durante 5 minutos después de que se haya apagado la flama. Finalmente se cierra esta válvula.

## 5.5. Manejo del equipo accesorio

### A. Analizador de gases de Orsat.

En esta sección se describe el método para el analizador de gases de escape de Orsat. Este analizador es como se muestra en la figura 5.2 en la cual se notan 4 tubos de vidrio los que contienen soluciones cuyas propiedades las hacen absorber cierta fracción de los gases de escape. El primer tubo de derecha es una camisa de agua de enfriamiento para la bureta medidora alojada en su interior. El segundo tubo es la pipeta que contiene hidróxido de potasio (o potasa cáustica) capaz de absorber el anhídrido carbónico; se halla en la misma pipeta viruta de hierro para regenerar su capacidad de absorción. La pipeta del centro aloja ácido pirogálico que actúa absorbiendo el oxígeno puro que no reaccionó en la combustión; también contiene viruta de hierro con el mismo objeto. Finalmente la pipeta de la izquierda que contiene cloruro cuproso para absorber monóxido de carbono; esta pipeta contiene viruta de cobre como regenerador.

Nota. Hay que advertir que la medición debe hacerse en ese orden: primero anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), segundo oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y tercero monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). Ya que el ácido pirogálico puede retener no sólo el oxígeno sino también el anhídrido carbónico y el cloruro cuproso puede absorber los 3 gases.

En seguida se detalla el procedimiento de uso del Orsat:

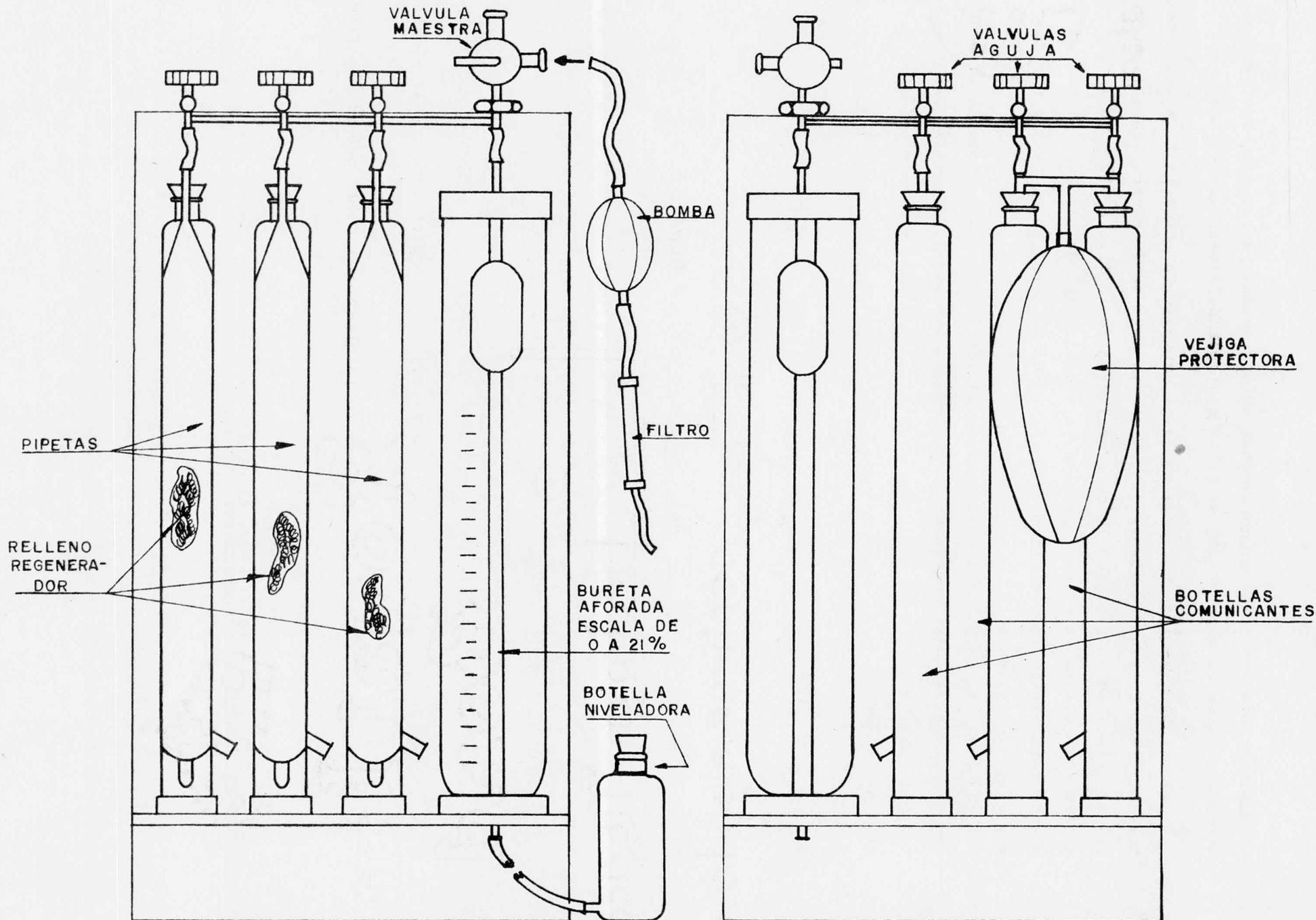
Abrir las puertas y colocar el equipo de manera que se pueda leer con facilidad la escala de la bureta. Se puede situar sobre una mesa o colgarlo sobre una pared. Retirar la botella niveladora y llenarla con agua sin desconectar la manguera que la comunica a la bureta medidora. Con el gancho de la botella se cuelga a la parte baja de la caja del analizador. Llenar con agua la camisa de enfriamiento de la bureta.

Cuando el analizador esté siendo preparado para su utilización prever que el nivel de los químicos sea el apropiado antes de quitar los tapones de las botellas conectadas a las pipetas en la parte posterior.

ORSAT  
VISTA ANTERIOR

Fig. 5.2

ORSAT  
VISTA POSTERIOR



Nota. Estas botellas siempre deben estar tapadas ya que los reactivos no deben exponerse al aire y sólo se deben destapar para realizar el análisis.

Si el nivel de los reactivos no es el conveniente entonces la válvula maestra del Orsat (o sea la válvula de cuatro vías que se encuentra sobre la bureta) se coloca en la posición 1, como se indica en la figura 5.3., en la que resultan comunicadas la botella niveladora y el cabezal de pipetas. El procedimiento para elevar los reactivos a su nivel en la marca en el cuello de las pipetas es el siguiente:

1) Poner la válvula maestra en la posición 4 y elevar la botella niveladora para purgar el aire confinado en la bureta. Sin bajar la botella pasar la válvula maestra (VM) a la posición 1 y abrir la válvula de aguja (VA) de la pipeta que no tenga el nivel de reactivo en la marca.

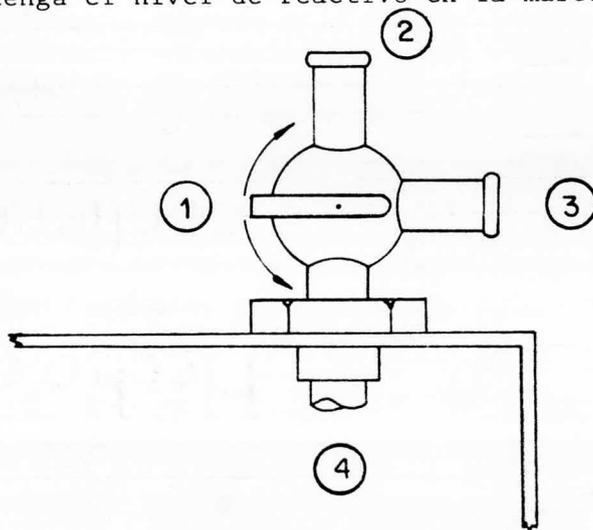


FIGURA 5.3

2) Quitar el tapón a la botella conectada a la pipeta para elevar el reactivo sin que se forme un vacío.

3) Bajar entonces lentamente la botella niveladora hasta que el reactivo se eleve señalando la marca.

Nota. El descenso de la botella niveladora debe ser lento vigilando que el reactivo no rebase la marca en el cuello de la pipeta y menos aun que alcance el cabezal.

4) La VA se cierra en cuanto el menisco del reactivo esté a nivel con la marca. Enseguida poner el tapón a la botella de la pipeta.

5) Girar la VM a la posición 4 y purgar nuevamente el aire de la bureta elevando la botella niveladora hasta que el agua alcance la ampolla de seguri--

dad de la bureta.

6) Repetir este proceso para otra pipeta si es preciso.

Toma de la muestra. Para realizar la medición tomar la muestra de gases bombeándola y haciéndola pasar por la bureta y botella niveladora. Para esto conectar la manguera de hule de aspiración de gases a la entrada 3 de la VM. Esta manguera debe tener a la mitad la bomba de succión y una ampolla de vidrio con filtro para detener las partículas sólidas de la combustión.

Nota. La bomba de succión tiene incorporada una válvula de retención que abre cuando los gases de escape se dirigen al Orsat y cierra evitando su regreso. Comprobar que la posición de la válvula sea correcta.

Verificar que las tres VA estén firmemente cerradas para enseguida retirar de las tres pipetas los tapones de sus respectivas botellas. La botella con hidróxido de potasio se deja abierta a la atmósfera. Las botellas cuyas pipetas contienen ácido pirogálico y cloruro cuproso se comunican con una vejiga (que forma parte del equipo) que tiene por objeto el servir de respiradero evitando que los reactivos entren en contacto con la atmósfera.

Colocar la manija de la VM, verificando que:

- a) Los químicos lleguen a la marca en el cuello de cada pipeta.
- b) La primera pipeta esté abierta al aire y la central e izquierda estén comunicadas entre sí.
- c) La "camisa de agua" de enfriamiento de la bureta esté llena.
- d) La botella niveladora tenga suficiente agua y esté colgada con el gancho en la parte baja del Orsat.

Tomar, entonces, la muestra bombeando lenta pero firmemente entre ocho y diez veces de manera que se produzca burbujeo en la botella niveladora.

Hecho lo anterior, elevar lentamente la botella niveladora a fin de comprobar que no haya burbujas en la manguera atrapadas por el agua. Si las hay eliminarlas por la VM a través de la bureta.

Bajar nuevamente la botella niveladora por debajo de la caja del Orsat. Girar ahora la VM a la posición 4 y entonces elevar lentamente la botella niveladora hasta que coincida el nivel de agua en la bureta, en la botella niveladora y el cero de la bureta (esto purga a la atmósfera el exceso de gases de la muestra y la deja en cero por ciento); ahora girar la VM a la posición 1 con la cual se conectan la bureta y el cabezal de las pipetas.

La siguiente etapa consiste en introducir la muestra de gases sucesivamen-

te a las tres pipetas. Para esto abrir la VA de la primera pipeta (hidróxido de potasio) y observar cómo desciende el químico tratando de equilibrar el nivel con el de la bureta. Lentamente elevar la botella de manera que el agua en la bureta ascienda empujando la muestra hacia la primera pipeta con la finalidad de que el bióxido de carbono de la muestra sea absorbido por el hidróxido de potasio.

Nota. Debe vigilarse que el agua en la bureta no se pase al cabezal y que el químico tampoco lo alcance. Estos movimientos ascendentes-descendentes, deben repetirse 4 o 5 veces manteniendo 10 a 20 segundos los gases en contacto con la solución de hidróxido de potasio.

Se baja la botella niveladora para hacer que en la primera pipeta suba la solución hasta la marca en el cuello. Hecho esto cerrar la VA y hacer la lectura sobre la graduación en porcentaje de la bureta, haciendo coincidir el nivel del agua en la bureta con el de la botella; en esa línea visual se realiza la lectura.

Para el análisis del  $O_2$  y del  $CO$  se procede de igual manera que para el análisis del dióxido de carbono.

La función de la bolsa de hule con la que se comunican las botellas de ácido pirogálico y cloruro cuproso es para impedir que el aire atmosférico sea absorbido por estas sustancias, perdiendo sus propiedades.

Nota. Es importante repetir esta advertencia: el ácido pirogálico es capaz de absorber el anhídrido carbónico además del oxígeno (para el que se ha dispuesto) y el cloruro cuproso puede absorber el anhídrido carbónico, el oxígeno y además el monóxido de carbono. Por estas razones es necesario ejecutar las mediciones en este orden: primero para el dióxido de carbono, segundo para el oxígeno y tercero para el monóxido de carbono.

Después de realizada la medición del dióxido de carbono se procede a introducir la muestra a la segunda pipeta con ácido pirogálico. Luego se regresa la muestra a la bureta para tomar la medición correspondiente al  $O_2$ . Se actúa de igual manera para la absorción del  $CO$  con la pipeta de la izquierda. Regresar la muestra a la bureta y hacer la medición.

Habiendo registrado las tres lecturas los porcentajes resultan de la siguiente forma, supóngase que:

la primera lectura sea del 16%, para el  $CO_2$

la segunda sea 20% para el  $O_2$

y la tercera sea 20.6% para el CO.

Entonces los porcentajes son:

16% para el CO<sub>2</sub>

4% para el O<sub>2</sub> (20% - 16%) y

0.6% para el CO (20.6% - 20.0%)

Instrucciones para después del análisis.

Las soluciones deben mantenerse al nivel de la marca en el cuello de las pipetas. Asegurarse que cuando el analizador vaya a trasladarse las botellas de las pipetas se encuentren perfectamente tapadas. Asimismo cerrar perfectamente las VA, vaciar el agua de la botella niveladora y colocar ésta en la pinza sujetadora del gabinete. También, desconectar la bomba y el filtro de la manguera tomamuestras. La VM debe quedar en la posición 4; finalmente cerrar las puertas y enganchar la asa de piel.

#### B. Pirómetro de succión.

La medición de temperatura de un fluido en movimiento depende entre otras cosas de la velocidad con la que el fluido pasa por el bulbo sensor. El pirómetro de succión es un instrumento que preve este efecto absorbiendo cierta cantidad del fluido dentro de una cavidad donde se encuentra el bulbo, en consecuencia la medición de temperaturas así logradas resulta más precisa. La unidad cuenta con un pirómetro que de manera muy sencilla puede convertirse en pirómetro de succión, sólo es necesario un tubo de cobre de 5 a 6 mm de diámetro en forma de serpentín, el cual va sumergido en un tanque de agua de enfriamiento. En un extremo del tubo se conecta el pirómetro y en el otro una válvula para regular el paso del fluido.

Para efectuar las mediciones con el pirómetro de succión se coloca en el sitio donde se instaló el termopar y se fija firmemente. Deben establecerse condiciones estables de combustión. El tubo de aspiración se conecta al pirómetro, controlándose el caudal aspirado por medio de la válvula de regulación. Los valores de temperatura se anotan a medida que la válvula permite una mayor aspiración desde que está cerrada. En la figura 5.4 se presentan los datos en una gráfica en la que se puede observar que a medida que la aspiración se hace máxima se acerca asintóticamente la temperatura a un valor que es mucho mayor al que se obtiene y que representa un valor muy cercano al valor real de la temperatura de los gases. Es así como se demuestran dos conceptos: primero, que el fluido al pasar sobre el bulbo desplaza la capa límite que la rodea y segundo, que-

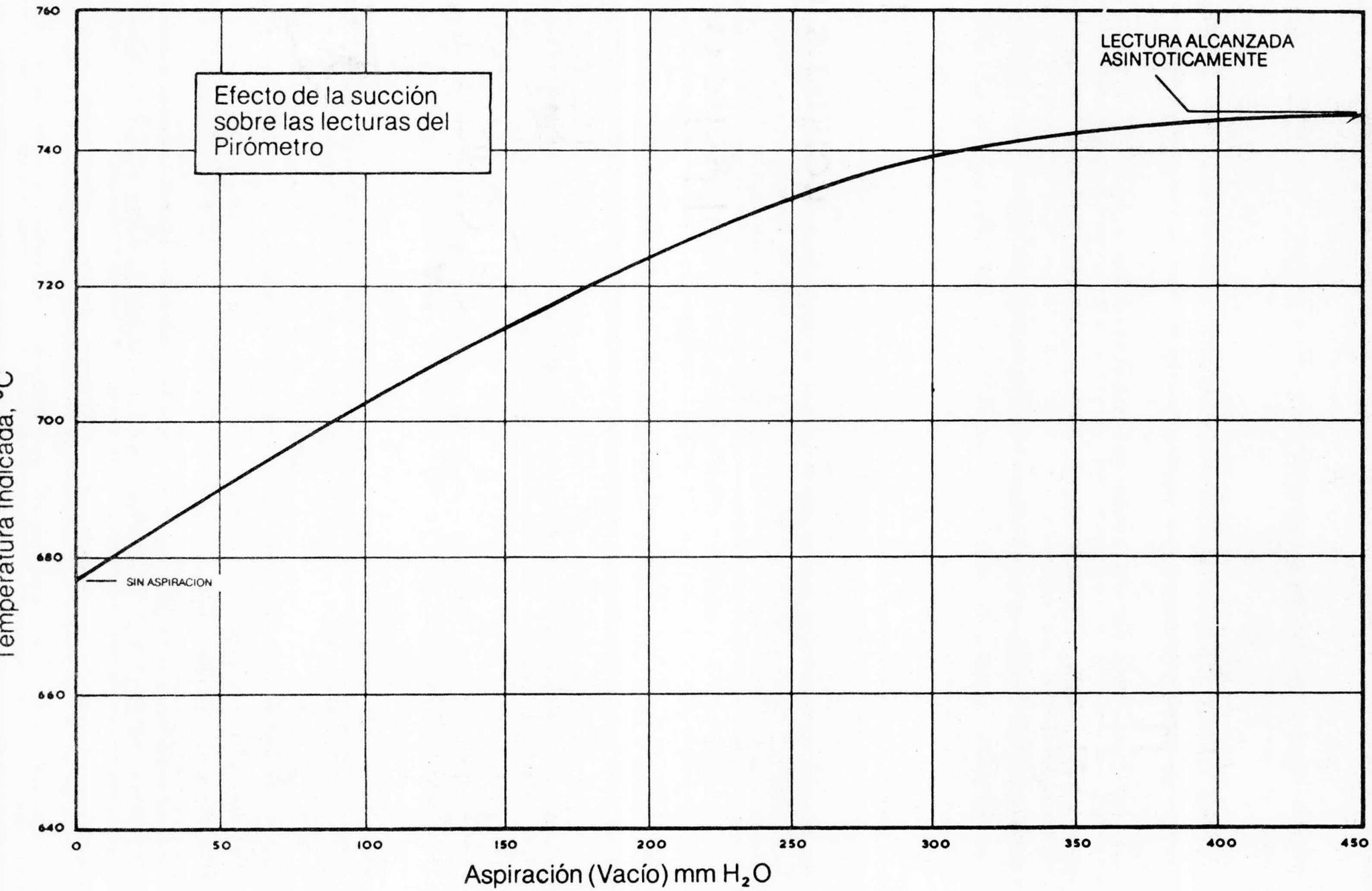


Fig. 5.4

la temperatura indicada por el pirómetro de succión es función del caudal o succión aplicada y por tanto existe un caudal óptimo.

### C. Pirómetro de filamento de contraste.

Además de los métodos descritos para determinar la temperatura de un fluido en movimiento, existe otro basado en la medición de radiación térmica que emite un cuerpo. En la figura 5.5 se muestra un esquema de un pirómetro de filamento de contraste el cual determina la temperatura del cuerpo caliente comparándolo con el color de un filamento calentado eléctricamente.

Para realizar un experimento con el pirómetro óptico es necesario tener una fuente de calor estacionaria, siendo la más apropiada la envuelta caliente del mechero de la UCC (envuelta o boca refractaria). El procedimiento consiste inicialmente en mantener la UCC en condiciones estables. El pirómetro puede ser colocado frente al orificio de 25 mm de diámetro donde está insertado el tomamuestras de gases en la parte trasera de la UCC. La circulación de gases a través de este orificio es casi nula lo que permite trabajar con el pirómetro y además deducir algunos principios con respecto a la circulación de los gases en el interior de la cámara.

También es posible realizar las mediciones a través de la mirilla posterior, aunque esto implicaría hacer algunas consideraciones ya que la absorción de radiación por el material de la mirilla produciría ciertos errores en las lecturas de la temperatura. En este caso puede admitirse la hipótesis de que la absorción de radiación sea inversamente proporcional al espesor de la mirilla, por ejemplo,

$$\frac{dR}{dx} = \frac{k}{x} \quad \therefore \quad R = k \ln x$$

donde R es la cantidad de radiación absorbida, x es el espesor del vidrio y k es una constante.

El estudio puede extenderse midiendo los cambios de temperatura para diferentes relaciones aire-combustible y aún más si se emplean diferentes combustibles. Los resultados se pueden representar en una gráfica como se ilustra en la figura 5.6.

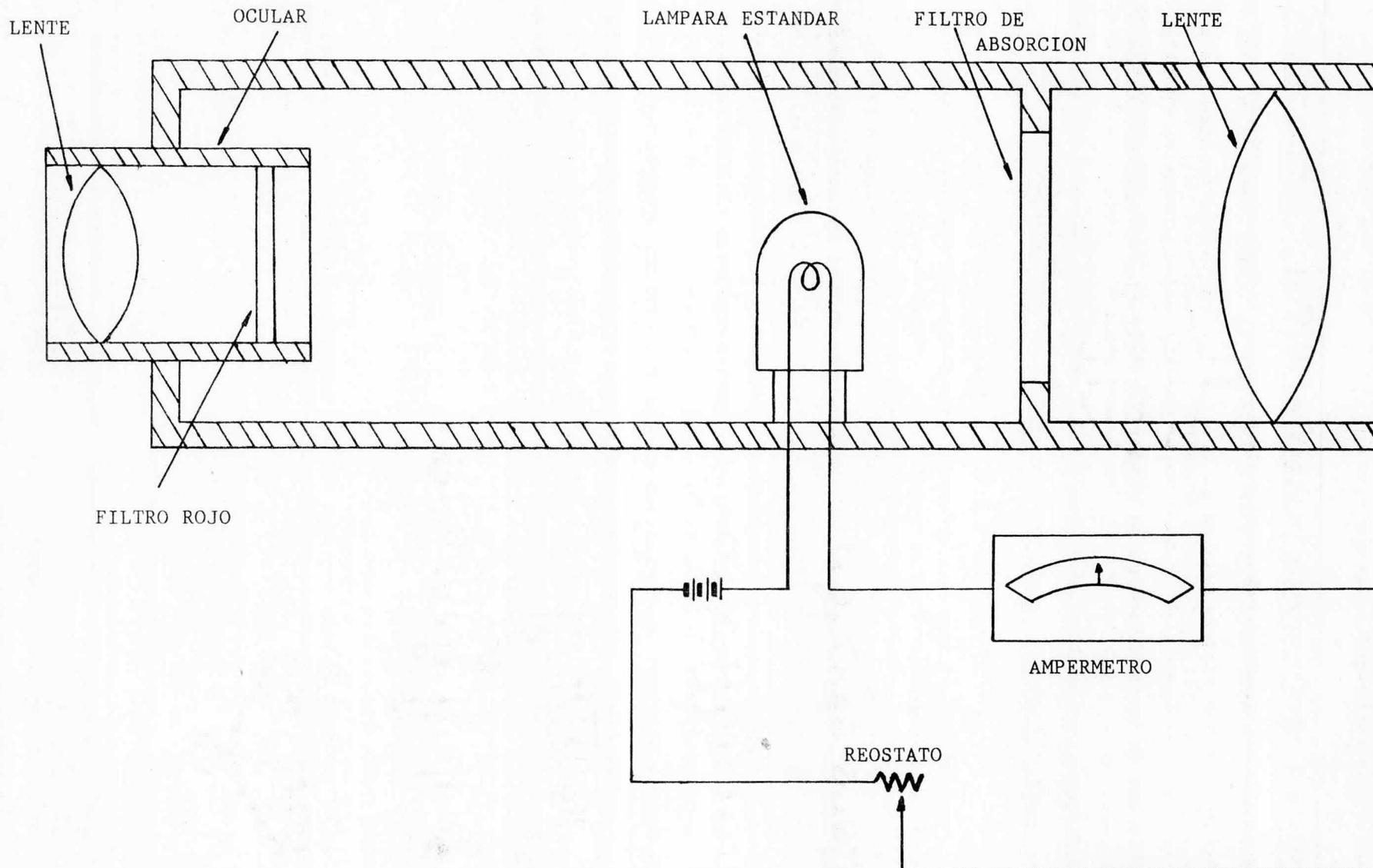


FIG. 5.5 DIAGRAMA DE UN PIROMETRO OPTICO DE FILAMENTO DE CONTRASTE.

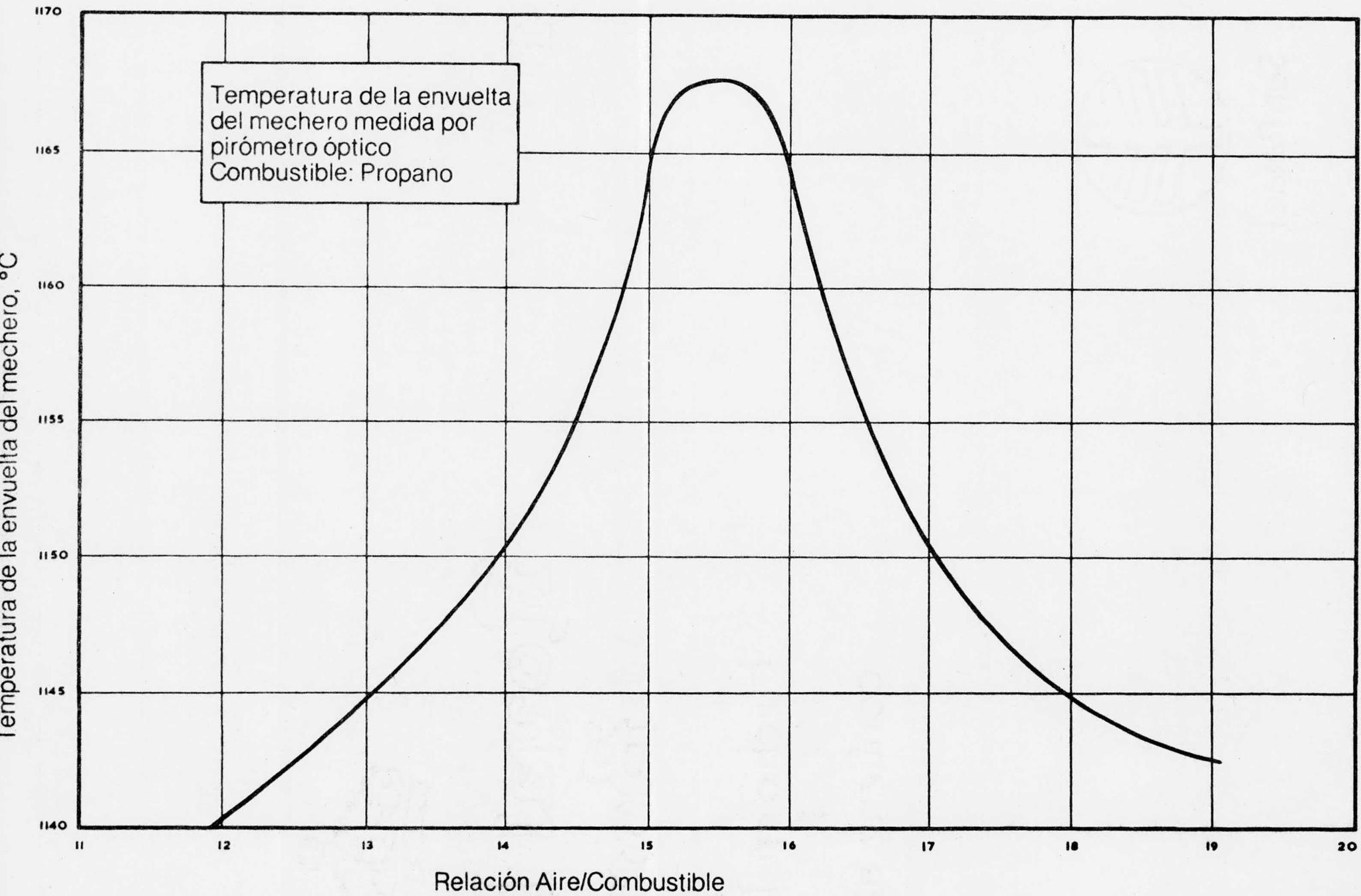


Fig. 5.6



## CAPITULO 6

## 6. PRACTICAS CON EL EQUIPO

### NOMENCLATURA DE PARAMETROS DE MEDICION

PARAMETRO	SIMBOLO	UNIDADES
1. Temperatura de entrada del agua de enfriamiento	$T_1$	$^{\circ}\text{C}$
2. Temperatura de salida del agua de enfriamiento	$T_2$	$^{\circ}\text{C}$
3. Caudal másico del agua de enfriamiento	$\dot{m}_w$	kg/h
4. Temperatura del aire para la combustión	$T_3$	$^{\circ}\text{C}$
5. Caudal másico de aire	$\dot{m}_A$	kg/h
6. Temperatura de los gases con radiación	$T_4$	$^{\circ}\text{C}$
7. Temperatura de los gases (sólo convección)	$T_5$	$^{\circ}\text{C}$
8. Caudal másico de combustible	$\dot{m}_c$	kg/h
9. Temperatura de entrada del combustible líquido	$T_6$	$^{\circ}\text{C}$
10. Presión de admisión del combustible gaseoso	$P_g$	mm c.a.
11. Presión de admisión del aire	$P_A$	mm c.a.
12. Relación aire-combustible	A/C	$\text{kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb.}}$
13. Relación aire-combustible estequiométrica	*A/C	$\text{kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb.}}$
14. Entalpía de combustión (poder calorífico)	$-h_{rp}^{\circ}$	$\text{kJ}/\text{kg}_{\text{comb.}}$
15. Peso molecular	M	kg/kg mol
16. Constante particular	R	$\text{J}/\text{kg}^{\circ}\text{K}$

## 6.1. EL CAMPO DE REGULACION.

El campo de regulación (C.R.) es una propiedad del quemador que es indispensable conocer antes de efectuar cualquier otro experimento, pues de ello depende el grado de confianza de los resultados que se consigan.

El método para obtener esta relación es determinar los caudales máximo y mínimo que sean capaces de mantener una flama estable y con una combustión estequiométrica. Los fabricantes de quemadores hablan de un C.R. de 1:5 para quemadores industriales, lo que significa que si el quemador puede manejar un flujo de 14 kg/h de combustible como máximo, entonces el flujo mínimo de combustible es de 2.8 kg/h.

Los flujos de aire y combustible pueden ser medidos directamente por los instrumentos medidores de flujo que se localizan en la parte frontal de la UCC; en el caso del aire si éste no se encontrara en las condiciones que especifica la graduación del manómetro de la placa de orificio, será necesario calcular el flujo mediante la fórmula:  $Q = 1,305 \sqrt{h/\rho}$  m<sup>3</sup>/h

donde: h = presión diferencial en mm c.a.

$\rho$  = densidad del aire antes de la placa en kg/m<sup>3</sup>

### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

La primera práctica con la UCC tiene el propósito de establecer el C.R. a partir de la obtención del mínimo caudal de combustible. El máximo caudal queda establecido por la capacidad del ventilador el cual puede proporcionar un máximo de 160 kg/h de aire lo que significa que sólo puede obtenerse un máximo flujo de gas LP quemándose en condiciones estequiométricas de 10.66 kg/h (\*A/C<sub>gas LP</sub> = 15 kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>). Por otra parte el caudal mínimo que es capaz de manejar el quemador depende mucho más de factores tales como la velocidad del chorro, la atomización del combustible, la turbulencia, etc.

### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

El quemador de la UCC tiene la facultad de operar con combustibles líquidos y gaseosos. El C.R. se ha de obtener primeramente para un combustible gaseoso (gas LP) e inmediatamente para un combustible líquido.

El procedimiento para obtener los datos necesarios y conseguir el C.R. es prácticamente el mismo para ambos combustibles siendo la diferencia el encendido del quemador que debe ser siempre realizado con un combustible gaseoso. El uso de un gas combustible para iniciar la operación de la UCC se debe a que el

combustible líquido necesita primeramente evaporarse antes de realizarse el proceso de combustión. La evaporación del líquido se debe en gran parte a la energía calorífica proveniente de la envuelta refractaria que evapora las gotitas del líquido que se crean en el atomizador. De tal manera que sería difícil tratar de quemar el combustible líquido estando el refractario frío.

El procedimiento de obtención del C.R. para combustible gaseoso es:

1) Arrancar la UCC de acuerdo a la sección 5.1.

2) Establecer un caudal de combustible (gas LP) en aproximadamente 6 kg/h. Verificar que el caudalímetro esté graduado para gas propano, sin embargo al final de la práctica se señala el método para calcular una escala para gas LP. Se incluyen los cálculos necesarios para determinar la relación estequiométrica del gas LP. A este flujo de combustible (6 kg/h) le corresponde un flujo de 90 kg/h de aire para una combustión ideal. Mantener estas condiciones hasta alcanzar un estado de equilibrio, condición que se observará cuando exista poca variación en la temperatura del agua de enfriamiento.

3) Considerando que el máximo flujo de gas LP es de 10.6 kg/h, modificar el caudal hasta 5 kg/h con su respectivo aire estequiométrico, y en condiciones estables anotar en la tabla siguiente los aspectos que caractericen a la flama.

4) Después hacer pequeñas reducciones en el flujo del gas combustible como se indica en la tabla ya referida.

Tabla de datos para obtener el mínimo caudal de combustible gaseoso

Combustible empleado: gas LP		*A/C = 15.0 kg <sub>aire</sub> /kg <sub>comb.</sub>			
$\dot{m}_C$	$\dot{m}_A$	A S P E C T O D E L A F L A M A			
		Forma:	Color:	Ruido:	Estabilidad:
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

5) Obtener el valor de flujo mínimo con la lectura última de la relación aire combustible antes de desaparecer la flama, relación que se caracteriza por una gran inestabilidad de ésta.

6) Cerrar la válvula de admisión del combustible una vez que se extinga la flama e inmediatamente purgar la flama durante dos o tres minutos. El valor del C.R. se ha de obtener dividiendo el valor del flujo de combustible mínimo entre el valor del flujo máximo del mismo.

7) Apagar la UCC como se indica en la sección 5.4. referente al paro de ésta.

La práctica puede extenderse modificando la cantidad de aire suministrado al valor mínimo de combustible conseguido haciendo una serie de observaciones y conclusiones en relación a los fenómenos observados.

8) Finalmente hacer las conclusiones apropiadas a toda la práctica.

El procedimiento de obtención del C.R. para combustible líquido es el siguiente:

1) Arrancar la UCC de acuerdo con la sección 5.2.

2) Establecer un caudal de combustible líquido en un valor estequiométrico determinado. Observar que la escala del medidor de caudal de combustible esté calibrada para el combustible líquido que se vaya a emplear, de no ser así consultar el método de calibración descrito al final de la práctica.

3) Habiéndose establecido un caudal de combustible con su respectivo aire estequiométrico anotar en la tabla siguiente los aspectos que se refieran a la flama.

4) De aquí en adelante hacer pequeñas reducciones en el flujo de combustible líquido como se indica en la tabla antes referida.

Tabla de datos para obtener el mínimo caudal de combustible líquido

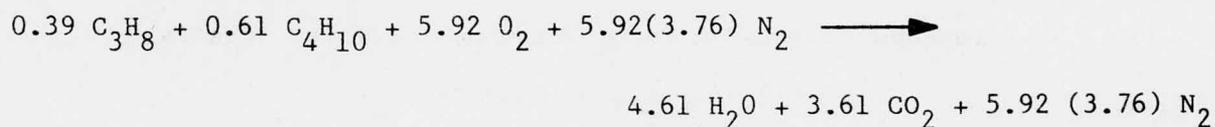
Combustible empleado: _____		*A/C = _____ kg <sub>aire</sub> /kg <sub>comb.</sub>	
$\dot{m}_C$	$\dot{m}_A$	A S P E C T O D E L A F L A M A	
		Forma:	Color:
		Ruido:	Estabilidad:
1			
2			
3			
4			
5			

- Cálculo del aire estequiométrico para el gas LP.

El gas LP o gas licuado de petróleo tiene en general el siguiente análisis volumétrico, 39 % de gas propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) y 61 % de gas butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>). La relación aire combustible para el gas LP a partir de su ecuación de combustión se obtiene de la manera siguiente:

Constituyentes	Análisis volumétrico %	M
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	39	44
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	61	58

La ecuación de la combustión del gas LP es,



la relación estequiométrica se obtiene como sigue:

$$*A/C = \frac{(5.92 + 22.24) 28}{0.39(44) + 0.61(58)} = 15 \text{ kg}_{\text{aire}} / \text{kg}_{\text{comb.}}$$

- Cálculo de la relación de escalas para el gas LP.

La UCC tiene un medidor de flujo para gas propano en condiciones de 15 °C y 125 mm c.a. por lo que será necesario hallar un factor de corrección para la escala cuando el gas combustible sea otro diferente al propano.

Para hallar ese factor primero calcular la densidad del gas LP en función de sus elementos constituyentes.

G A S L P					
Constituyentes	Análisis volumétrico	Peso molecular	$x_i M_i (100)$	Análisis gravimétrico	R
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	61	58	3,538	67.34	143.13
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	39	44	1,716	32.66	188.65

La densidad del gas LP a partir de la ecuación de los gases ideales es:

$$\rho = P / R T$$

donde: P = presión media absoluta a la salida del regulador de gas = 0.01225 + 0.78 = 0.792 bar (0.78 bar es la presión atmosférica en la Cd. de México).

T = temperatura media de 15°C, y  
R = constante particular de la mezcla.

R se obtiene a partir de:

$$\xi R = w_i R_i$$

donde:  $w_i$  = fracción de masa de cada componente  
 $R_i$  = constante particular de cada componente.

sustituyendo valores,

$$R = (0.6734) (143.13) + (0.3266) (188.65) \\ = 158.0 \text{ J/kg}^\circ\text{K}$$

por lo tanto, sustituyendo valores en la ecuación de los gases ideales,

$$= 0.792 \times 10^5 / 158.0 (15+273) \\ = 1.74 \text{ kg/m}^3$$

que es la densidad del gas LP a 15°C y a la presión de la Cd. de México.

De manera semejante para el gas propano se tiene,

$$= 0.792 \times 10^5 / 188.6 (15+273) \\ = 1.46 \text{ kg/m}^3$$

que es la densidad del gas propano.

La siguiente ecuación proporciona el gasto volumétrico en un rotámetro cuando el flotador está en una determinada posición del tubo,

$$Q = C (A_T - A_F) (2g V_F / \rho V_F) (\rho_F - \rho)^{1/2} \dots\dots\dots(1)$$

donde:  $A_T$  = Area de la sección del tubo (en la posición del flotador).

$A_F$  = Area efectiva del flotador.

$V_F$  = Volumen del flotador.

$\rho_F$  = Densidad del flotador.

$\rho$  = Densidad del fluido.

C = Coeficiente del rotámetro.

Para el caso del flotador de la UCC se tiene que,

$$A_F = 4.768 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$V_F = 3.078 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$m_F = 9.1 \times 10^{-3} \text{ kg}$$

$$\rho_F = 2956.5 \text{ kg/m}^3$$

Suponiendo que el valor de C para el rotámetro de propano sea de 0.7, entonces para un caudal másico de 18 kg/h de propano se tiene el siguiente valor de área de sección del tubo ( $A_T$ ),

$$A_T = Q/CP + A_F \dots\dots\dots (2)$$

donde:  $P = (2g V_F / \rho A_F (\rho_F - \rho))^{1/2} \dots\dots\dots (3)$

sustituyendo valores en la ecuación (3),

$$P = \left( \frac{2 \times 9.81 \times 3.078 \times 10^{-6}}{1.46 \times 4.768 \times 10^{-4}} (2956.5 - 1.46) \right)^{1/2}$$

$$= 16.01 \text{ kg/m}^2$$

sustituyendo valores en la ecuación (2),

$$A_T = \frac{3.425 \times 10^{-5}}{0.7 \times 16.01} + 4.768 \times 10^{-4} =$$

$$= 7.824 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

El gasto volumétrico equivalente de gas LP con la escala de propano cuando el flotador marca 18 kg/h de gas propano, siendo el área de sección de  $7.824 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  y un coeficiente para el rotámetro de 0.7 es, sustituyendo valores en la ecuación (1),

$$Q = 0.7(7.824 \times 10^{-4} - 4.768 \times 10^{-4}) \left[ \frac{2 \times 9.81 \times 3.078 \times 10^{-6}}{1.74 \times 4.768 \times 10^{-4}} (2956.5 - 1.74) \right]^{1/2}$$

$$= 3.137 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \text{ o } 19.65 \text{ kg/h de gas LP.}$$

De los cálculos anteriores se concluye que para el nivel en que el flotador marca 18 kg/h de gas propano, en las mismas condiciones de presión y temperatura, le corresponde un valor de flujo de gas LP de 19.65 kg/h. La relación entre las dos escalas es,

$$19.65/18 = 1.092$$

Con el valor obtenido del factor de corrección es posible encontrar una serie de valores de flujo de gas LP equivalentes a un cierto valor de flujo de propano, de acuerdo a la escala proporcionada por el fabricante de la UCC.

Tabla con valores de caudal (Propano-Gas LP) para una misma sección de área

Sección de área	Caudal volumétrico de propano	Caudal volumétrico de Gas LP
$\text{m}^2 \times 10^{-4}$	$\text{m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$ kg/h	$\text{m}^3/\text{s} \times 10^{-3}$ kg/h

7.824	3.425	18	3.137	19.65
7.484	3.044	16	2.789	17.47
7.145	2.664	14	2.441	15.29
6.805	2.283	12	2.092	13.10
6.466	1.903	10	1.744	10.92
6.126	1.522	8	1.395	8.74
5.787	1.142	6	1.046	6.55
5.447	0.761	4	0.697	4.37
5.192	0.476	2.5	0.435	2.73

- Cálculo del aire estequiométrico para cualquier combustible a partir de datos proporcionados por un analizador Orsat.

Para encontrar la relación estequiométrica del gas LP en el inciso anterior se partió de sus constituyentes generales y en forma teórica, mediante la ecuación de combustión, se halló la relación ideal para este combustible gaseoso, sin embargo para conseguir la relación estequiométrica para cualquier combustible cuyo valor fuera desconocido puede partirse del análisis de los productos de la combustión obtenidos con el aparato de Orsat.

La tabla que a continuación se muestra señala los datos que son necesarios para el cálculo de la relación ideal de un combustible.

Lectura	$\dot{m}_C$	$\dot{m}_A$	A/C	Datos del analizador		
				%CO <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%CO
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

## 6.2. LA RELACION ESTEQUIOMETRICA.

La relación estequiométrica es de los parámetros más importantes que están ligados a la combustión. La UCC permite realizar una serie de pruebas para observar y comprobar los efectos que tiene la relación estequiométrica sobre la transferencia de calor y las pérdidas de energía en los gases producto de la combustión.

El aire estequiométrico o aire ideal es la cantidad de aire que suministre el oxígeno preciso para que se realice una combustión teórica completa, sin embargo, en la práctica esa cantidad de aire resulta ser un poco mayor que la estequiométrica y depende entre otros factores del combustible, el mezclado, el tipo de quemador, de la configuración de la cámara, atomizador, etc.

### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

El propósito de esta práctica es hacer una serie de observaciones y conclusiones en relación a los efectos que se producen en la transferencia de calor y en las pérdidas de energía en los gases producto de la combustión cuando se quemara el combustible con cantidades de aire que van desde la deficiencia hasta el exceso, pasando por las condiciones ideales.

### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

1) Arrancar la UCC de acuerdo a la sección 5.1.

2) Fijar un valor de caudal de combustible, por ejemplo 6kg/h, de gas LP para en condiciones ideales permitir que el sistema llegue a su estado de equilibrio manteniendo la temperatura de salida del agua entre los 60 y 80°C.

Nota. La relación estequiométrica del combustible empleado puede determinarse a partir de su composición química (ver la sección 2.2) u obtenerla de la tabla de relaciones o necesidades de aire de combustibles (tabla N° 2 del apéndice).

3) Ya en condiciones estables (temperaturas y flujos constantes tanto de combustible como del agua de enfriamiento) proceder a tomar una serie de lecturas de temperaturas con diferentes caudales de aire suministrado correspondientes a relaciones aire-combustible desde 13:1 a 19:1 para el Gas LP.

4) Los datos obtenidos (siempre en condiciones estables) se anotan en la tabla que se muestra enseguida.

Combustible empleado: Gas LP

$$*A/C = 15 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb.}}$$

A/C	$T_1$	$T_2$	$T_4$	$T_5$	$\dot{m}_w$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_c$
12							
13							
14							
*15							
16							
17							
18							
19							

5) Después de conseguir los datos anteriores se procede a parar la UCC como lo señala la sección 5.4 referente al procedimiento de paro sin olvidar purgar la cámara de 2 a 3 minutos.

6) Con los datos obtenidos trazar 2 gráficas, una de ellas en la que se involucren valores de transferencia de calor para cada relación aire-combustible y la otra con las pérdidas de energía en los gases producto de la combustión también para cada relación aire-combustible.

7) Finalmente hacer las conclusiones a la práctica.

### 6.3. ANALISIS DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION.

La UCC ofrece condiciones de combustión controlables de bastante exactitud, es decir, la regulación de los caudales tanto del comburente como del combustible que participan en la reacción. Estas características de la unidad, -- que se asemejan a las unidades industriales, permiten efectuar análisis de productos con diferentes relaciones aire-combustible y de su conocimiento se establecen las necesidades de aire para la combustión y se evalúa el rendimiento de la combustión.

El análisis de los gases puede realizarse, si se dispone del tiempo y personal necesario, junto con los experimentos sobre la relación estequiométrica, o bien, puede formar parte de una nueva serie de experimentos.

El análisis de los gases con exceso de aire de combustión resulta ser bastante normal pero los cálculos con deficiencia de aire requiere de establecer ciertas suposiciones. Una de ellas consiste en considerar que el hidrógeno contenido en el combustible se quema con preferencia, luego el carbono reacciona y se convierte en monóxido de carbono y el oxígeno restante se usa para convertir ese monóxido en dióxido de carbono.

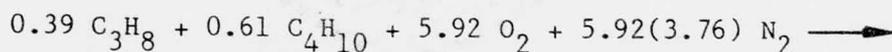
#### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

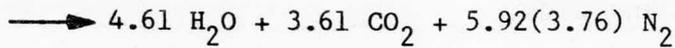
La finalidad de esta práctica es el análisis de los productos de la combustión en condiciones que vayan desde la deficiencia de aire hasta el exceso de éste, incluyendo condiciones ideales. Además se han de comparar los resultados reales obtenidos con aquellos proporcionados por un análisis teórico basado en la composición del combustible.

#### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

a) La primera parte de la práctica consiste en determinar mediante la ecuación de combustión la cantidad de aire ideal para el combustible que se ha de usar. Enseguida se hallará la ecuación de combustión para diferentes cantidades de aire teórico haciendo también un análisis volumétrico de los productos. Finalmente, se hará una comparación entre los datos proporcionados por el análisis teórico con aquellos logrados con el analizador de gases.

La ecuación de combustión para el gas LP es,





la relación ideal se obtiene como sigue,

$$\begin{aligned} A/C &= \frac{(5.92 + 22.24) 28}{0.39(44) + 0.61(58)} \\ &= 15 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb.}} \end{aligned}$$

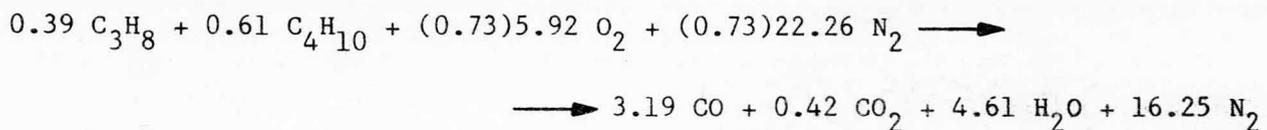
Si la ecuación de combustión se analiza a partir de una relación aire-combustible igual a 11 significa entonces que la cantidad de aire teórico puede conseguirse a partir de la relación siguiente,

$$\begin{aligned} A/C &= \frac{(X(5.92) + X(22.24)) 28}{0.39(44) + 0.61(58)} \\ &= 11 \end{aligned}$$

de la ecuación anterior X representa el porcentaje de aire teórico equivalente a una relación A/C = 11, despejando X se tiene,

$$X = \frac{(0.39)44 + 0.61(58)}{28 \times 28.16} (11) = 0.73$$

por lo tanto para un porcentaje de aire teórico de 73, o bien, una deficiencia de aire de 27% le corresponde una relación A/C igual a 11. En este caso la ecuación queda como sigue,

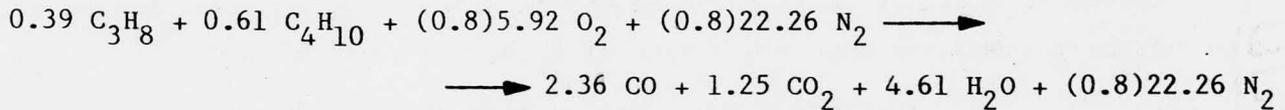


observar que en la ecuación anterior se ha supuesto que se tiene CO como consecuencia de la falta de O<sub>2</sub> y además que todo el H<sub>2</sub> forma H<sub>2</sub>O. De la misma manera para otras relaciones A/C se consiguen los siguientes valores de aire teórico,

A/C	% aire teórico	% de deficiencia o exceso de aire
11	73	27
12	80	20
13	87	13
14	97	3

*15	100	0
16	107	7
17	113	13
18	120	20
19	127	27

La ecuación de combustión con 80% de aire teórico es,



de la anterior el análisis volumétrico en base seca (no incluye el H<sub>2</sub>O) es el siguiente,

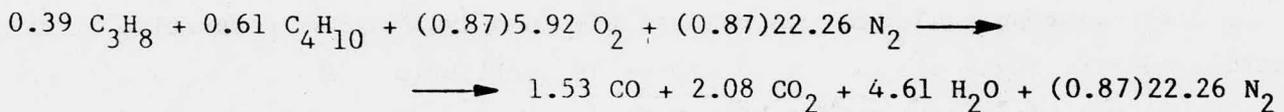
$$\text{CO} = 2.36/21.42 \times 100 = 11.02 \qquad \text{CO}_2 = 1.25/21.42 \times 100 = 5.84$$

$$\text{N}_2 = 17.81/21.42 \times 100 = 83.14$$

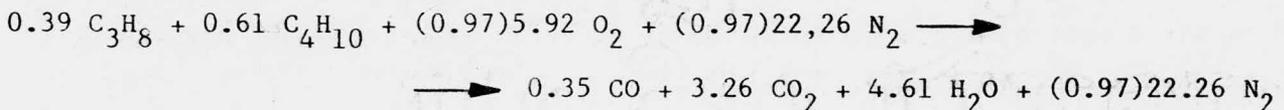
Análisis volumétrico en base seca,

$$\text{CO} = 11.02 \% \qquad \text{CO}_2 = 5.84 \% \qquad \text{N}_2 = 83.14 \%$$

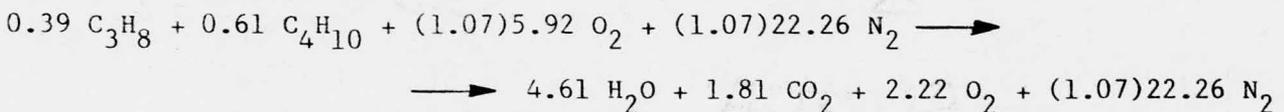
Ecuación de combustión para otras relaciones aire-combustible:  
cuando A/C = 13,



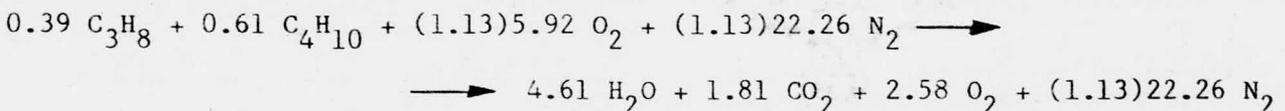
A/C = 14,



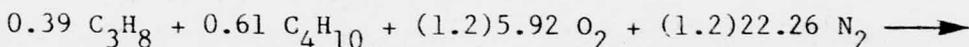
A/C = 16,

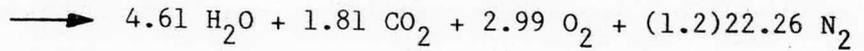


A/C = 17,

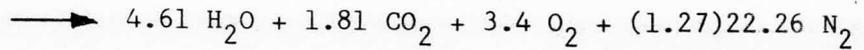
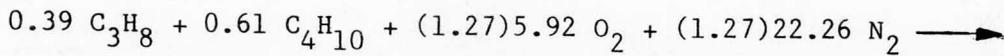


A/C = 18,





A/C = 19,



En las ecuaciones que implican un exceso de aire, el  $\text{O}_2$  existe libre en los productos y además se supone que todo el  $\text{H}_2$  se convierte en  $\text{H}_2\text{O}$ .

#### ANALISIS VOLUMETRICO EN BASE SECA

A/C	% Aire teórico	% de deficiencia o exceso de aire	$\text{O}_2$	CO	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$
11	73	27	—	16.06	2.11	81.82
12	80	20	—	11.02	5.84	83.15
13	87	13	—	6.66	9.05	84.29
14	97	3	—	1.39	12.94	85.68
*15	100	0	—	—	13.95	86.05
16	107	7	7.97	—	6.5	85.53
17	113	13	8.73	—	6.13	85.14
18	120	20	9.49	—	5.74	84.77
19	127	27	10.16	—	5.41	84.44

b) Práctica en la UCC.

1) Encender la Unidad de acuerdo al procedimiento de arranque, sección 5.1.

2) Fijar un caudal de gas combustible en 3 kg/h con su respectivo aire estequiométrico hasta alcanzar condiciones de equilibrio.

3) Una vez que se encuentre el sistema en estado estable obtener una muestra de gases de combustión para analizar en el Orsat de la Unidad repitiendo el mismo procedimiento según lo indica la tabla siguiente para diferentes relaciones aire-combustible.

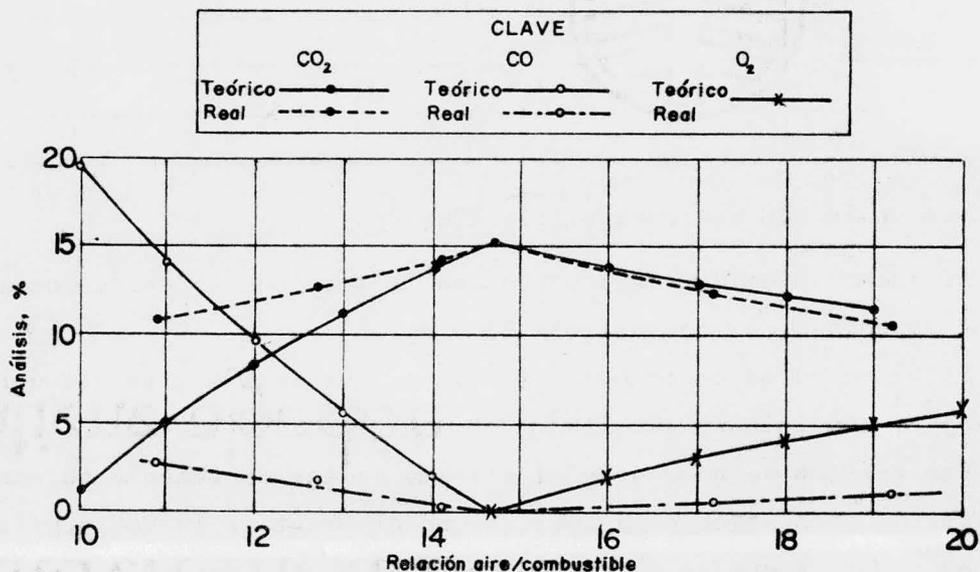
#### ANALISIS DE GASES PARA DIFERENTES RELACIONES AIRE-COMBUSTIBLE

A/C	$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	% $\text{O}_2$	% CO	% $\text{CO}_2$
11	3	33			
12	3	36			
13	3	39			
14	3	42			
*15	3	45			
16	3	48			
17	3	51			
18	3	54			

4) Luego de obtener las muestras para análisis para cada una de las relaciones aire-combustible, apagar la UCC de acuerdo a la sección 5.4 correspondiente al paro de ésta.

5) Hacer un gráfico comparativo como el que se muestra en la figura 6.1 con los datos teóricos obtenidos y los proporcionados por el analizador de gases y luego hacer las conclusiones apropiadas.

Fig. 6.1 COMPARACION DE ANALISIS DE GAS TEORICO Y PRACTICO DE QUEROSENO



c) Siguiendo el mismo método empleado anteriormente para un combustible gaseoso (Gas LP) en esta parte de la práctica, correspondiente a análisis de productos de la combustión, se manejará un combustible líquido.

1) Primeramente se han de hacer todos los cálculos teóricos comenzando por establecer la ecuación de combustión para el combustible líquido elegido y encontrar su relación aire-combustible ideal (\*A/C).

2) Obtener las ecuaciones de combustión con deficiencia o exceso de aire a partir de relaciones aire-combustible no ideales.

3) Hacer una tabla con el análisis volumétrico en base seca para cada una de las relaciones aire-combustible.

ANALISIS VOLUMETRICO EN BASE SECA

A/C	% de aire teórico	% de deficiencia o exceso de aire	O <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						

d) Práctica en la UCC con combustible líquido.

1) Arrancar la unidad de acuerdo con la sección 5.2 correspondiente a operación de la unidad con combustible líquido.

2) Fijar un valor de combustible con su respectivo aire estequiométrico hasta lograr condiciones estables.

3) Una vez que se encuentre el sistema en estado estable obtener una muestra de gases de combustión para analizar en el Orsat de la UCC repitiendo el mismo procedimiento según lo indica la tabla siguiente para diferentes relaciones aire-combustible.

ANALISIS DE GASES PARA DIFERENTES RELACIONES AIRE-COMBUSTIBLE

A/C	$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	% O <sub>2</sub>	% CO	% CO <sub>2</sub>
11	5	55			
12	5	60			
13	5	65			
14	5	70			
15	5	75			
16	5	80			
17	5	85			
18	5	90			
19	5	95			

4) Luego de obtener las muestras para análisis en cada una de las relaciones aire-combustible, apagar la UCC de acuerdo a la sección 5.4 correspondiente al paro de ésta.

5) Hacer un gráfico comparativo como el que se muestra en la figura-6.1 con los datos teóricos obtenidos y los proporcionados por el analizador de gases y luego hacer las conclusiones finales.

#### 6.4. COMPARACION DE LA COMBUSTION DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS.

El quemador de la UCC tiene la facultad de manejar diversos combustibles-  
líquidos destilados y gaseosos por lo que es posible llevar a cabo una serie -  
de pruebas comparativas que muestren las características particulares de com-  
bustión de varios combustibles.

#### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

La finalidad de la presente práctica es la observación de la combustión -  
de dos combustibles líquidos realizando una serie de observaciones comparati-  
vas.

#### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

1) Antes de encender la UCC es necesario verificar que exista suficiente -  
cantidad de ambos combustibles. Para cambiar de un combustible a otro es nece-  
sario cambiar la posición de la válvula de desvío instalada en la parte baja -  
trasera del panel.

El cambio de combustible debe efectuarse rápidamente y procurando estable-  
cer inmediatamente las condiciones ideales.

2) Encender la UCC de acuerdo a la sección 5.2.

3) Establecer un caudal del primer combustible líquido elegido y dejar -  
que el sistema llegue a su estado de equilibrio.

4) Modificar la cantidad de aire para variar la relación aire-combustible  
y anotar estos valores en la tabla siguiente:

#### EFFECTO DEL CAMBIO DE LA RELACION A/C EN LA COMBUSTION

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_  $\text{kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{comb.}}$

#### Aspecto de la flama

A/C	$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_w$	forma	color	ruido	estabilidad	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>



## 6.5. COMPARACION DE LA COMBUSTION DE COMBUSTIBLES GASEOSOS.

La comparación entre combustibles gaseosos ofrece mayores ventajas si éstos tienen propiedades relativamente distintas. Por ejemplo el gas ciudad (gas de hulla) y el propano comercial cuyas propiedades están resumidas en la tabla siguiente.

	Gas ciudad	Propano
Densidad específica (aire=1)	0.5	1.5
Poder calorífico, kJ/m <sup>3</sup>	18,650	89,400
*A/C	9:1	16:1

Debido a los valores tan diferentes en su densidad específica, poder calorífico, necesidades de aire, etc., la comparación entre ambos combustibles no puede ser muy directa, empero pueden establecerse comparaciones útiles y buenas conclusiones.

### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

El objetivo principal de la práctica es comparar la combustión de dos combustibles gaseosos basada en la observación y obtención de algunos parámetros como temperatura de camisa de agua y de gases de combustión con diferentes caudales.

### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

1) Antes de encender la UCC observar que exista suficiente combustible de ambos gases en los depósitos. La práctica puede realizarse para los dos combustibles en forma continua si se provee a la entrada del combustible gaseoso de la UCC de una válvula de desvío con la que pueda cambiarse de un combustible a otro sin tener que apagar la unidad, pero siempre tratando de conservar las condiciones ideales.

2) Encender la unidad como lo establece la sección 5.1.

3) Establecer un caudal del primer combustible gaseoso elegido y dejar que el sistema llegue a su estado de equilibrio.

4) Para varias relaciones A/C llenar la tabla siguiente en condiciones estables incluyendo relaciones con exceso, deficiencia e ideales de combustión.

EFFECTO DEL CAMBIO DE LA RELACION A/C EN LA COMBUSTION

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

Aspecto de la flama

$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_w$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	forma	color	ruido	estabilidad	A/C

5) Para varios caudales de combustible y en condiciones ideales de combustión llenar la tabla siguiente.

EFFECTO DEL CAMBIO EN EL FLUJO DE COMBUSTIBLE

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_w$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	forma	color	ruido	estabilidad	A/C
							aspecto de la flama				

6) Cambiar al siguiente combustible gaseoso y de la misma manera llenar las tablas que se muestran a continuación.

EFFECTO DEL CAMBIO DE LA RELACION A/C EN LA COMBUSTION

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

Aspecto de la flama

$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_w$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	forma	color	ruido	estabilidad	A/C

7) Para varios caudales de combustible y en condiciones ideales de combustión, llenar la siguiente tabla.

EFFECTO DEL CAMBIO EN EL FLUJO DE COMBUSTIBLE

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_w$	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	forma	color	ruido	estabilidad	A/C
							aspecto de la flama				

8) Después de llenar las cuatro tablas anteriores para la UCC de acuerdo a la sección 5.4.

9) Las dos tablas anteriores servirán para hacer las conclusiones finales comparando el comportamiento de los dos combustibles empleados.

## 6.6. BALANCE TERMICO.

Una forma útil de obtener la eficiencia de una planta es mediante un balance térmico. Este puede lograrse en forma general evaluando todas las manifestaciones de la energía en forma de calor que entren o abandonen el sistema.

### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

La eficiencia de la UCC puede ser establecida a partir de una balance térmico. El objetivo de la siguiente práctica es la evaluación de la Unidad de Combustión Continua a partir de un balance térmico.

### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

La práctica en forma general consiste en obtener los valores de todos aquellos factores que contribuyan a la pérdida o ganancia de energía calorífica de la UCC cuando se quema combustible en condiciones estequiométricas. Posteriormente y con la ayuda de las entalpías de formación y combustión realizar el balance térmico.

- 1) Encender la UCC de acuerdo al procedimiento de arranque según se emplee combustible gaseoso o líquido (sección 5.1 o 5.2 respectivamente).
- 2) Establecer un caudal de combustible con su respectivo aire estequiométrico. Para facilitar los cálculos se recomienda trabajar con un pequeño exceso de aire.
- 3) En condiciones estables llenar la tabla que se muestra a continuación.

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

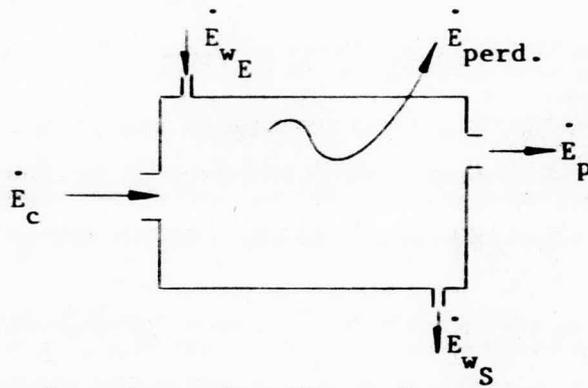
Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_5$	$T_6$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_w$	$\dot{m}_c$

- 4) Una vez tomados todos los datos anteriores se pueden tomar otros datos para un caudal diferente o bien emplear otro combustible.
- 5) Apagar la unidad de acuerdo al procedimiento de paro de la sección 5.4.

### PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR EL BALANCE TERMICO.

En el siguiente diagrama de la UCC se marcan cada una de las entradas y salidas de energía calorífica que intervienen en el sistema:



del diagrama anterior,  $\dot{E}_c + \dot{E}_{wE} = \dot{E}_p + \dot{E}_{wS} + \dot{E}_{perd.}$

de donde,  $\dot{E}_c = \Delta \dot{E}_w + \dot{E}_p + \dot{E}_{perd.}$  ..... (1)

- donde:  $\dot{E}_c$  = energía procedente de la combustión
- $\dot{E}_{wE}$  = energía del agua de enfriamiento a la entrada
- $\dot{E}_{wS}$  = energía del agua de enfriamiento a la salida
- $\Delta \dot{E}_w$  = incremento de energía del agua de enf.
- $\dot{E}_p$  = energía que contienen los gases de combustión
- $\dot{E}_{perd.}$  = energía cedida al medio ambiente.

La obtención de la energía de combustión ( $\dot{E}_c$ ) se hace a partir del poder calorífico del combustible,

$$\dot{E}_c = h_{rp}^o \times \dot{m}_c$$

donde:  $h_{rp}^o$  = poder calorífico inferior del combustible en condiciones 25°C, latm.

El incremento de energía del agua es,

$$\Delta \dot{E}_w = \dot{m}_w C_p T$$

$\dot{E}_p$  se obtiene de la diferencia de entalpías de combustión

$$\dot{E}_p = \dot{E}_c - \dot{H}_{rp} \text{ ..... (2)}$$

donde:  $\dot{E}_c$  = Entalpía de combustión cuando los productos salen a las condiciones estándar (25°C, 1 atm.).

$\dot{H}_{rp}$  = Entalpía de combustión cuando la temperatura de productos y reactivos difiere de la estándar.

$\bar{h}_{rp}$  se calcula a partir de las entalpías de formación de los reactivos y productos de la combustión.

Como ejemplo se hace a continuación el cálculo de la entalpía de combustión del gas propano cuando éste y el aire entran a 27°C, los gases de combustión salen a 665°C y se maneja un flujo de combustible de 6 kg/h.

La ecuación de combustión del gas propano con 100% de aire teórico es,



la entalpía de combustión es,

$$\bar{h}_{rp} = \sum_p n_e (\bar{h}_f^o + (\bar{h}_T - \bar{h}_{298}^o))_e - \sum_r n_i (\bar{h}_f^o + (\bar{h}_T - \bar{h}_{298}^o))_i \dots \dots (3)$$

= entalpía de combustión de los productos - entalpía de combustión de los reactivos.

Sustituyendo valores para encontrar la entalpía de combustión de los reactivos,

$$\begin{aligned} \bar{h}_r &= n_{\text{C}_3\text{H}_8} (\bar{h}_f^o + \bar{c}_{pp} (300-298))_{\text{C}_3\text{H}_8} + n_{\text{O}_2} (\bar{h}_f^o + (\bar{h}_{300} - \bar{h}_{298}^o))_{\text{O}_2} + \\ & n_{\text{N}_2} (\bar{h}_f^o + (\bar{h}_{300} - \bar{h}_{298}^o))_{\text{N}_2} = \\ & = (-104,921 + (1.7)(44.1)(300-298)) + 5(54.4) + 18.8(54.4) = \\ & = -105,365.3 \text{ kJ/kg mol.} \end{aligned}$$

la entalpía de combustión de los productos se halla de la manera siguiente,

$$\begin{aligned} \bar{h}_p &= n_{\text{CO}_2} (\bar{h}_f^o + (\bar{h}_{938} - \bar{h}_{298}^o))_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} (\bar{h}_f^o + (\bar{h}_{938} - \bar{h}_{298}^o))_{\text{H}_2\text{O}} + \\ & n_{\text{N}_2} (\bar{h}_f^o + (\bar{h}_{938} - \bar{h}_{298}^o))_{\text{N}_2} = \\ & = 3(-393,804 + 30,100.3) + 4(-242,000 + 23,480.7) + \\ & 18.8(19,473.7) = \\ & = -1'599,083.0 \text{ kJ/kg mol.} \end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (3),

$$\bar{h}_{rp} = -1'599,083.0 - (-105,365.3) = -1'493,717.7 \text{ kJ/kg mol.}$$

$$-h_{rp} = 33,871.15 \text{ kJ/kg}_{\text{comb.}}$$

$$-\dot{H}_{rp} = 203,226.9 \text{ kJ/h}$$

Por lo tanto el valor de  $\dot{E}_p$  se consigue sustituyendo valores en la ecuación (2)

$$\dot{E}_p = (46,355.1 \times 6) - 203,226.9 = 74,903.7 \text{ kJ/h}$$

para encontrar la energía cedida al medio ambiente ( $\dot{E}_{\text{perd.}}$ ) se sustituyen valores en la ecuación (1),

$$\dot{E}_{\text{perd.}} = \dot{E}_c - \dot{E}_w - \dot{E}_p$$

La eficiencia de la UCC si se considera que el objetivo de ésta es transmitir la mayor parte de la energía al agua, como es el caso de las calderas o generadores de vapor, es la relación de la energía transferida al agua y el poder calorífico del combustible,

$$\eta_{\text{UCC}} = \frac{\text{energía transferida al agua}}{\text{poder calorífico inf. del combustible}}$$

	$\dot{E}_c$	$\dot{E}_w$	$\dot{E}_p$	$\dot{E}_{\text{perd.}}$
kJ/h				
%	100			

### 6.7. USO DE AISLAMIENTOS EN LA CAMISA DE AGUA.

Una práctica interesante con la UCC consiste en aislar la parte exterior de la camisa de agua con un material aislante como una tela de amianto o de fibra de vidrio. El procedimiento consiste en lo siguiente: fijar ciertas condiciones estables de preferencia con altos caudales de combustible y hacer las anotaciones necesarias de temperatura. Enseguida se aísla la parte exterior de la cámara con alguno de los materiales mencionados (u otro que cumpla con la misma función) permitiendo que el sistema alcance sus condiciones estables.

Otros aspectos que pueden estudiarse en estas condiciones de la cámara son: el determinar la conductividad térmica de la tela, procedimiento que resulta bastante sencillo si la tela queda bien ajustada a la cámara de lo contrario los cálculos pueden complicarse; discutir acerca del cambio tan reducido en la temperatura de salida del agua revisando la ecuación del balance térmico; comparar los resultados teóricos y prácticos sobre todo en los cálculos sobre transferencia de calor.

#### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

La práctica consiste en observar los cambios que se producen en la transferencia de calor cuando se aísla la parte exterior de la cámara anular para el agua, además, determinar la conductividad térmica de los aislantes y hacer comparaciones de los análisis teóricos y prácticos obtenidos.

#### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

1) Encender la UCC de acuerdo al procedimiento recomendado según se emplee combustible gaseoso o líquido (sección 5.1 o 5.2 respectivamente) y establecer un caudal entre 8 y 10 kg/h de combustible.

2) En condiciones estables tomar las lecturas cuidadosamente como lo indica la tabla siguiente:

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg comb.

$\dot{m}_w$	$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$T_1$	$T_2$	Temperatura superficial de la camisa de acero.

3) Colocar el material aislante en torno a la camisa de acero y tomar nuevamente las temperaturas sin variar las condiciones últimas de flujo.

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

$\dot{m}_w$	$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$T_1$	$T_2$	Temperatura superficial de la envuelta aislante

4) Apagar la unidad de acuerdo al procedimiento de paro, sección 5.4.

5) El cálculo de la conductividad térmica (k) del material aislante se hace a partir de un balance térmico para hallar la energía cedida al medio ambiente ( $E_{\text{perd.}}$ ).

Enseguida a manera de ejemplo se hace el cálculo de la conductividad térmica del asbesto suponiendo pérdidas de 19,430 kJ/h (5.397 kW):

La conductividad térmica a través de una superficie cilíndrica es,

$$k = \dot{E} (\ln(R_2/R_1))/2 L (T_1 - T_2) \dots\dots(1)$$

donde  $\dot{E}$  = es la energía perdida hacia el medio ambiente calculada a partir de las entalpías de formación y combustión ( $E_{\text{perd.}}$ ).

$R_1$  = radio interno de la envuelta aislante.

$R_2$  = radio externo de la envuelta aislante.

L = espesor de la capa aislante.

$T_1$  = temperatura interior de la capa aislante (exterior de la camisa de acero inoxidable).

$T_2$  = temperatura exterior de la capa aislante.

Sustituyendo valores en la ecuación (1) para valores supuestos de radios y temperaturas del material aislante,

$$k = 5.397(\ln(0.625/0.60))/2 (0.025)(75-45) = 0.259 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$$

### 6.8. RADIACION DE LA FLAMA Y TRANSFERENCIA DE CALOR.

Otro experimento que resulta bastante atractivo y además con un grado de dificultad superior a los hasta ahora recomendados, es el estudio de la Transferencia de Calor hacia las paredes de la cámara de agua de la UCC con una flama no luminosa y con una flama luminosa. Esa transformación puede lograrse cambiando de combustible gaseoso a líquido, o bien, modificando las condiciones de combustión para el mismo combustible modificando la relación aire combustible para conseguir diferentes tipos de flama. En un experimento cambiando el combustible y con el mismo desprendimiento de calor se consiguieron temperaturas de 5 a 12°C menores en una flama de combustible gaseoso no luminosa comparadas con las obtenidas de un combustible líquido de flama luminosa. Resultan inevitables los cambios de los caudales y de temperaturas de flama con cualquier método que se use para conseguir diferentes tipos de flama y las complicaciones que acarrearán estos cambios tienen que deducirse de conocimientos más avanzados de la combustión.

#### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

El experimento consiste de manera general en medir la Transferencia de Calor hacia el agua de enfriamiento de la UCC con una flama no luminosa, obtenida con un combustible gaseoso, y posteriormente y usando el mismo valor de desprendimiento de energía se han de hacer mediciones para una flama luminosa proporcionada con un combustible líquido.

#### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

1) Primeramente, y de acuerdo a las indicaciones de encendido, arrancar la UCC y ajustar un caudal de combustible gaseoso de 9 kg/h con su correspondiente aire estequiométrico.

2) Ya en condiciones estables hacer las mediciones que indica la tabla siguiente correspondientes a una flama no luminosa.

	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$\dot{m}_w$	$-\dot{h}_{rp}$	$\dot{E}_c$
Flama no luminosa										
Flama luminosa										

	Aspectos de la flama				
	Forma	color	ruido	estabilidad	otras
Flama no luminosa					
Flama luminosa					

3) Para una flama luminosa cambiar el combustible gaseoso por uno líquido y ajustar el caudal de combustible de manera que se obtenga la misma liberación de energía, es decir, que  $E_c$  sea igual en ambos casos y anotar las lecturas de flujo y temperatura, así como los aspectos de la flama, en las tablas anteriores.

4) Apagar la UCC de acuerdo al procedimiento de paro.

5) Conclusiones a la práctica.

## 6.9. MEDICION DE TEMPERATURAS.

La medición de temperaturas altas en la industria se realiza mediante termopares que son los instrumentos más usados en este campo. El termopar consiste de dos metales diferentes unidos por uno de sus extremos por una junta que al calentarse genera una corriente y es detectada en un instrumento para leer la temperatura. Esa temperatura detectada por la junta o perla del termopar puede o no ser semejante a la real del ambiente que la rodea dependiendo de factores como el tamaño de la perla, la velocidad del fluido y de la posición con respecto a la fuente de calor. Estos efectos pueden comprobarse realizando una serie de datos comparativos cambiando la posición de la perla del termopar y posteriormente mediante el empleo de un pirómetro de succión para evaluar los efectos de la velocidad del fluido al pasar por la perla del termopar.

### OBJETIVO DE LA PRACTICA.

Esta práctica tiene como objetivo el de obtener lecturas de temperatura tomas bajo diversas condiciones de posición del termopar y de velocidad de los gases.

### DESARROLLO DE LA PRACTICA.

1) Encender la UCC de acuerdo al procedimiento de arranque (sección 5.1 o 5.2 para combustible gaseoso o líquido respectivamente) y establecer un caudal en condiciones estables.

2) En condiciones estables tomar la lectura de temperatura y posteriormente hacer lo mismo para diferentes caudales de combustible siguiendo la tabla que aparece enseguida usando en todos los casos condiciones estequiométricas. La temperatura  $T_4$  es tomada en la posición en que la perla del termopar queda libre hacia la flama recibiendo energía de radiación y convección. La temperatura  $T_5$  es tomada cuando la perla sólo recibe energía de convección.

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

	$\dot{m}_c$	$\dot{m}_A$	$T_4$	$T_5$
1.				
2.				
3.				
4.				

5.				
6.				
7.				
8.				
9.				

3) Posteriormente y utilizando el pirómetro de succión para un caudal de combustible determinado tomar las lecturas de temperatura como se muestra en la tabla de abajo para diferentes valores de abertura de la válvula de succión del pirómetro.

Combustible empleado: \_\_\_\_\_

Relación A/C ideal: \_\_\_\_\_ kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb.</sub>

Flujo de combustible ( $\dot{m}_c$ ): \_\_\_\_\_ kg<sub>comb.</sub>/h

	* h (mm c.a.)	T <sub>5</sub>
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		

\* altura de la columna de agua tomada con el manómetro inclinado conectado al pirómetro de succión.

4) El procedimiento de paro de la UCC debe hacerse en la misma forma que se ha indicado (según procedimiento de la sección 5.4).

Con los datos de la primera tabla hacer una gráfica flujo de combustible--temperatura para cada una de las posiciones del termopar, lo mismo se ha de hacer con los datos de la segunda tabla (presión en la succión, mm c.a.-lectura del pirómetro).

5) Hacer las conclusiones a la práctica.

CAPITULO 7

## 7. MANTENIMIENTO

El contenido de este capítulo comprende el mantenimiento de la UCC. Se fijan los procedimientos, periodicidad y operaciones que mantendrán este equipo experimental en óptimas condiciones. Se trata cada una de las partes más importantes, de su conservación así como también se sugiere el inventario de repuestos para su reparación.

### 7.1. Mantenimiento del motoventilador.

Para mantener el motoventilador en buen estado de operación es necesario cumplir con las siguientes actividades:

-Lubricación. Debe realizarse en los cojinetes de los impulsores con una periodicidad de tres a seis meses; en los cojinetes del motor bimestralmente; o bien siempre que se superen las 60 horas de uso. El lubricante recomendado es grasa del N° 3 medio dura.

-Banda de transmisión. Es necesario verificar con frecuencia la tensión de la banda de transmisión. Si la tirantez no es la apropiada se debe tensar bajando la placa que soporta el motor después de extraer los pernos. Para verificar la tirantez se quita la banda y sobre una mesa se localiza la marca de calibración de tensión estampada en la banda. Cuidadosamente se mide la longitud de la tensión de calibración. Enseguida se monta la banda en las poleas y se tensa -- hasta que la longitud de calibración se incremente entre 3 y 5 mm. Se comprueba que los pernos de ajuste estén bien asegurados. También es importante verificar que exista paralelismo entre los ejes conductor y conducido y que las poleas estén alineadas. Finalmente se inspecciona que el motor quede perfectamente fijado cuando se haya completado los ajustes.

-Filtro de aire. La revisión del filtro de aire debe hacerse trimestralmente con objeto de limpiarlo, lavándolo con agua jabonosa y enjuagándolo con agua limpia y secándolo después con aire. El filtro está hecho de una espuma de material plástico y cuando ha sido usado en condiciones normales de trabajo no necesita ser sustituido. Sin embargo es conveniente tener en inventario un repuesto del elemento filtrante con el objeto de facilitar el mantenimiento. Si el filtro de material plástico no es obtenible se puede instalar un sustituto de papel.

-Procedimiento de revisión del motoventilador.

Nota. Cuando se desarme el motoventilador es importante marcar la secuencia y la posición relativa de todas las piezas a fin de que se cree una guía para su reensamble. Son muy importantes las flechas de dirección de rotación. También hay que señalar la posición de entrada y salida de cubiertas y carcasa.

En la siguiente secuencia de desarmado se refieren las partes de la figura 7.1:

1) Desconectar el suministro de corriente eléctrica y retirar los alambres. Limpiar todas las superficies externas y quitar todas las conexiones de los puntos de entrada y salida de aire. Colocar el motoventilador en un banco de trabajo.

2) Quitar la guarda que cubre la banda aflojando la tensión.

3) Quitar la polea del eje del motor y quitar la polea del eje del ventilador desatornillando el prisionero para extraer la polea y retirar la cuña.

4) Retirar la tapa posterior de la guarda de la banda.

5) Desatornillar el motor de su base en la placa giratoria y quitar las varillas de soporte para elevar el motor. Limpiar y hacer una inspección en el sistema eléctrico.

6) Retirar el manguito distanciador (parte Nº 19) de la flecha del ventilador y desatornillar los sujetadores de los cojinetes (parte Nº 12). Extraer la tapa del cojinete (parte Nº 24) y desatornillar los pernos de cierre (parte Nº 17) de la cubierta para quitar la sección de la carcasa golpeando con un mazo de madera sobre las esquinas y sobre el final del eje para liberarlo.

7) Aflojar los prisioneros (parte Nº 25) sobre el eje y retirar la arandela (parte Nº 9). Tener cuidado de no dañar el apoyo del eje limpiarlo y retirar cualquier rebaba antes de extraer el primer impulsor (parte Nº 26).

8) Deslizar el primer impulsor y el espaciador (parte Nº 15) seguido por el difusor (parte Nº 27) y la banda espaciadora del difusor (parte Nº 30).

9) Extraer los impulsores, espaciadores y difusores restantes y la arandela final (parte Nº 9).

10) Sujetar el eje (parte Nº 23) con unas mordazas protegidas y retirar la tapa posterior y la tuerca del eje la cual está roscada con cuerda izquierda (parte Nº 13). Golpear el eje para soltar el cojinete. Señalar y desmantelar el cuerpo de la carcasa. Finalmente extraer el último difusor y el espaciador.

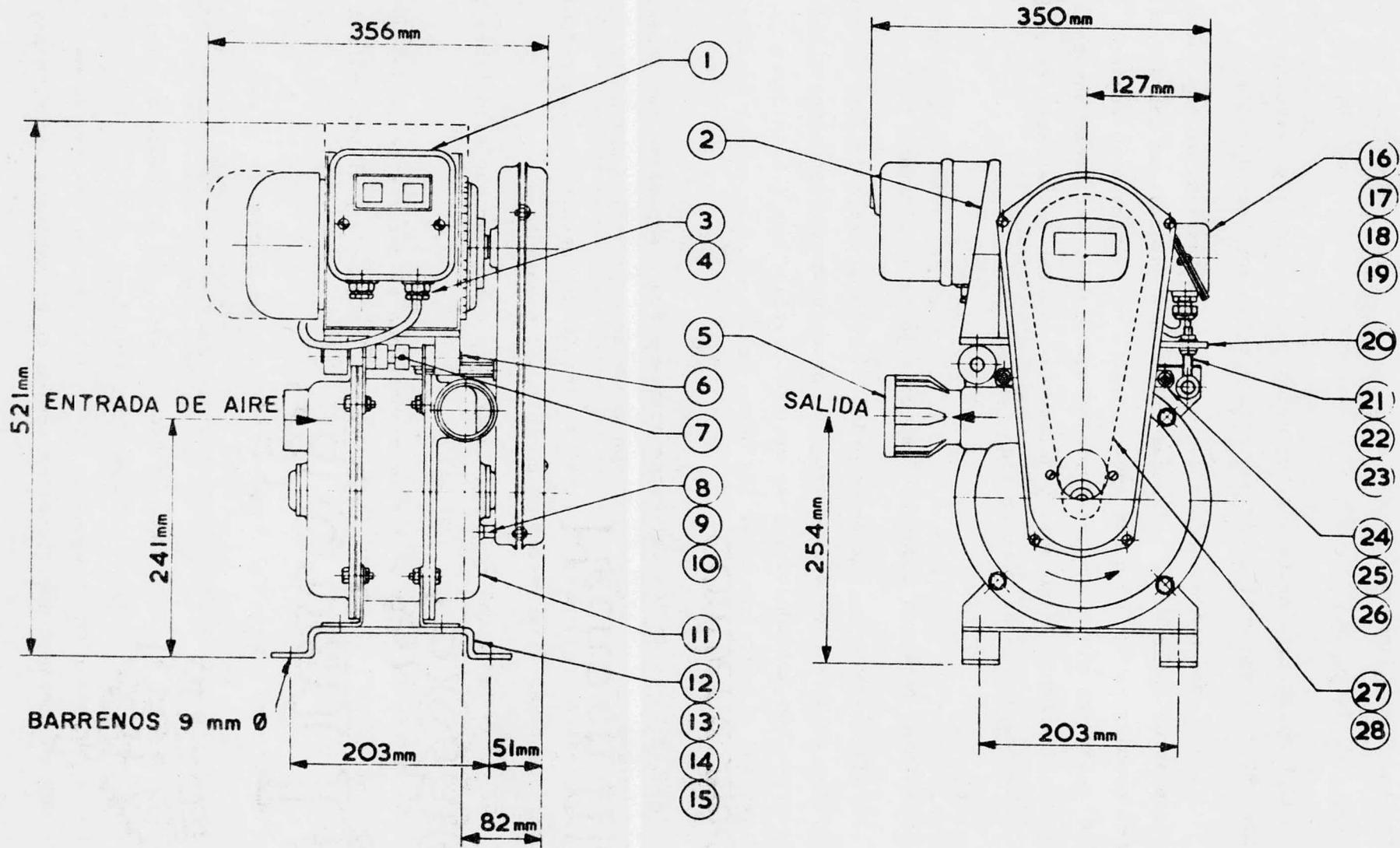


Fig. 7.1 MOTOVENTILADOR

dor; y retirar los cojinetes finales.

-Limpieza e inspección.

1) Limpiar totalmente los cojinetes para secarlos y examinarlos minuciosamente. Si muestran huellas de maltrato deberán ser reemplazados.

2) Las demás partes tienen que ser lavadas también. Si hay sustancias extrañas que estén adheridas a las caras internas o externas de los difusores o impulsores remojar la suciedad con agua y jabón. Si es necesario rasparlo hay que evitar dañar las placas de retención de los álabes. Verificar que todas las placas estén firmemente aseguradas y quitar las rebabas de las superficies maquinadas para después lavar y secar todas las partes.

-Ensamblado.

1) Untar de grasa todas las partes sujetas a fricción.

2) Reensamblar las partes en orden inverso al procedimiento de revisión. Procurar no dañar los apoyos del eje, principalmente donde ensamblan la tuerca de retención del impulsor y el opresor. Vigilar que los extremos de los espaciadores del difusor (parte N° 30) no se traslapen. Estirar el espaciador antes de recolocar el cuerpo.

3) Las tapas de los cojinetes extremos deben empacarse con grasa, también tener cuidado de no sobrecargar con grasa la caja de los cojinetes.

4) Realizar el ensamble final ajustando las partes con los pernos para asegurar que todas ellas estén en perfecto alineamiento.

5) Girar la flecha del ventilador para comprobar que esté libre y sin señal de fricción.

6) Montar la parte de los impulsores con el motor e instalarlo en la placa, finalmente verificar el alineamiento de las poleas y el paralelismo de las flechas.

## 7.2. Manómetro diferencial para medición de flujo de aire.

Procurar el lavado del manómetro diferencial una vez cada semestre. La manguera y el tubo de vidrio en el que se hace la medición del flujo se pueden lavar con agua jabonosa y después enjuagar con agua limpia.

El fluido de medición es agua. Su nivel 0 en la ramificación de medición se ajusta con un elevador que tiene una tuerca en el gabinete por esto hay que-

conservar el tubo con suficiente agua para realizar con mayor precisión la medición del flujo de aire. La verificación del nivel del agua debe hacerse previamente a la práctica.

### 7.3. Quemador.

El quemador debe ser objeto de revisiones periódicas de mantenimiento preventivo y de acciones previas a su encendido. Las dos operaciones preliminares son la purga del combustible y la limpieza interna de la cámara con el barrido del aire del ventilador. El drenado del combustible líquido se realiza desatornillando el tapón que se encuentra en la parte baja izquierda del cuerpo del quemador (ver plano No 3). La purga se debe realizar después de concluida la práctica y antes del encendido del equipo. Para purgar el quemador con aire se arranca el ventilador y se mantiene su funcionamiento dos minutos.

La limpieza interna de las partes que forman el quemador debe realizarse una vez cada ocho o doce meses si el uso del equipo no es muy intenso. Con este fin deben mantenerse limpios y lubricados los elementos móviles.

-Procedimiento de revisión del quemador.

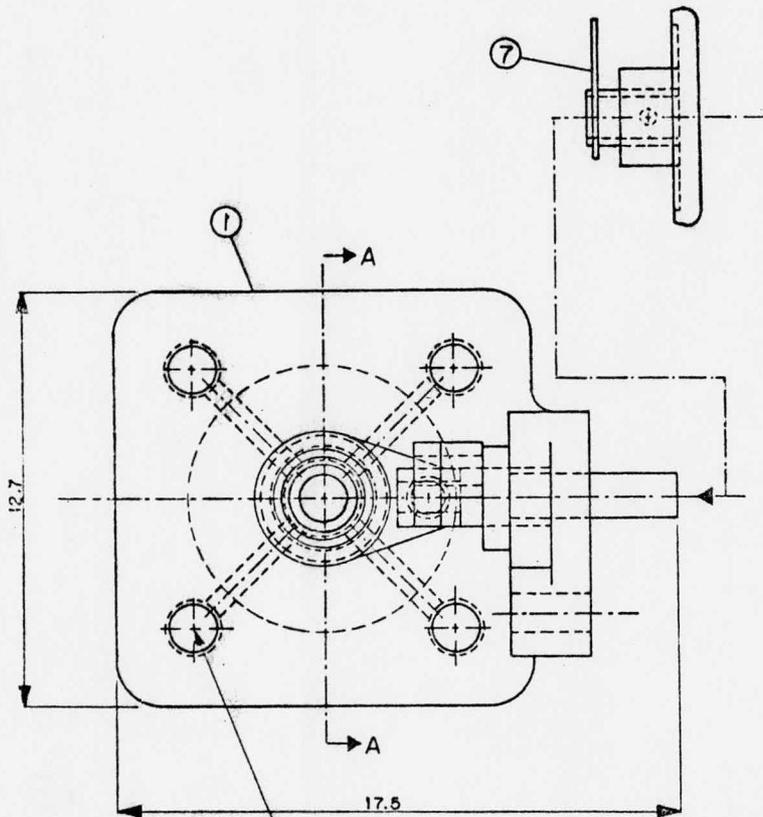
Nota. Se recomienda sean registradas las piezas y la secuencia de su desarmado con el objeto de simplificar la tarea de reconstrucción del quemador.

Para seguir la secuencia de desarmado deben observarse los dibujos de los planos siguientes:

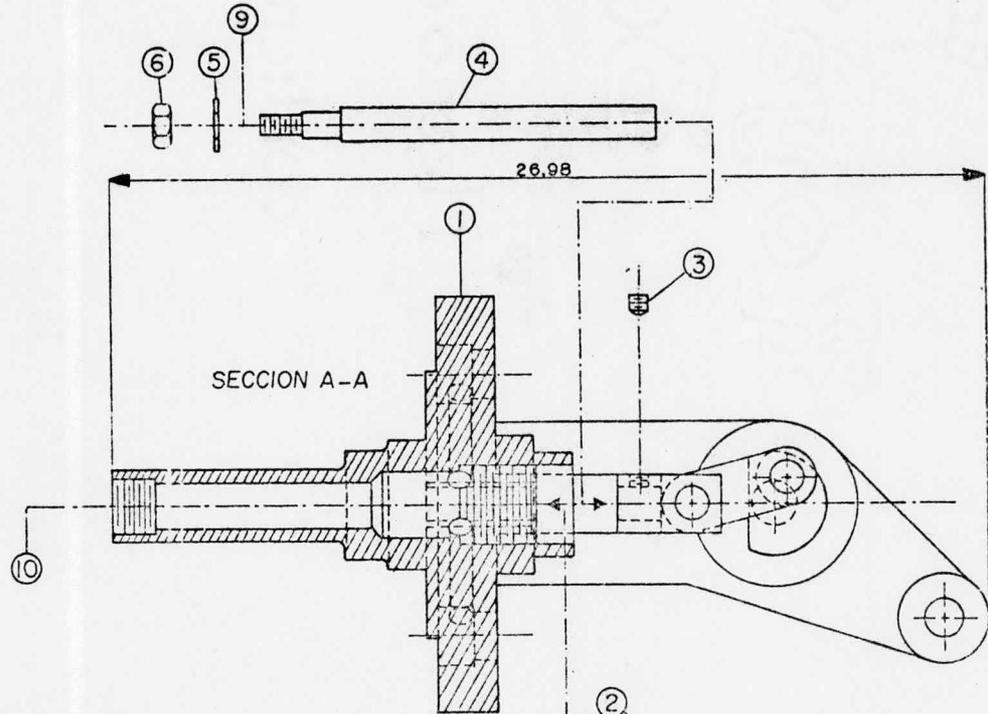
1) Retirar la brida que soporta la válvula de solenoide de combustible gaseoso, y desatornillar el acoplamiento que une el quemador y la válvula de solenoide del combustible líquido. Retirar las mangueras de suministro de aire comburente y la de aire de enfriamiento del detector de flama ultravioleta.

2) Retirar los cuatro pernos allen de 12.7 mm para liberar la pieza No 1 (regulador y distribuidor de aire y combustible líquido). Hecho esto proceder al desarmado de todos los elementos para su inspección y limpieza. Estas partes son:

Pieza No 2	tapón central con rosca y sello
Pieza No 3	prisionero
Pieza No 4	varilla de guía de regulación de flujo
Pieza No 7	perilla de control de aire
Pieza No 8	cono móvil de cierre de aire
Pieza No 9	extensión móvil del cono de cierre
Pieza No 10	atomizador

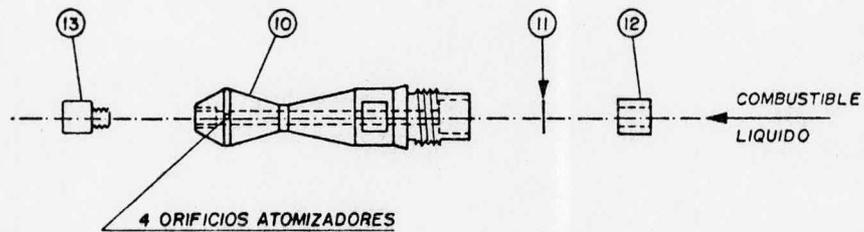
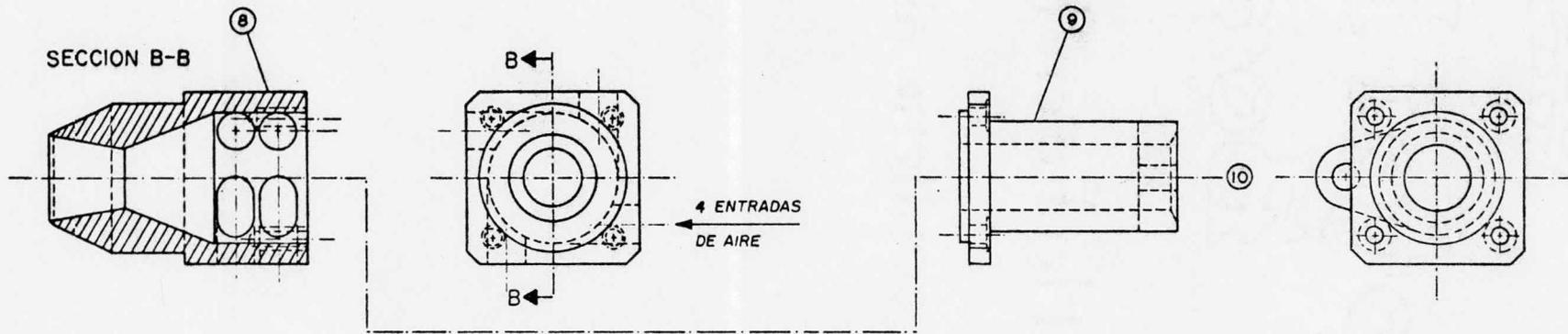


CONDUCTO DE LLEGADA  
DEL COMBUSTIBLE LIQUIDO

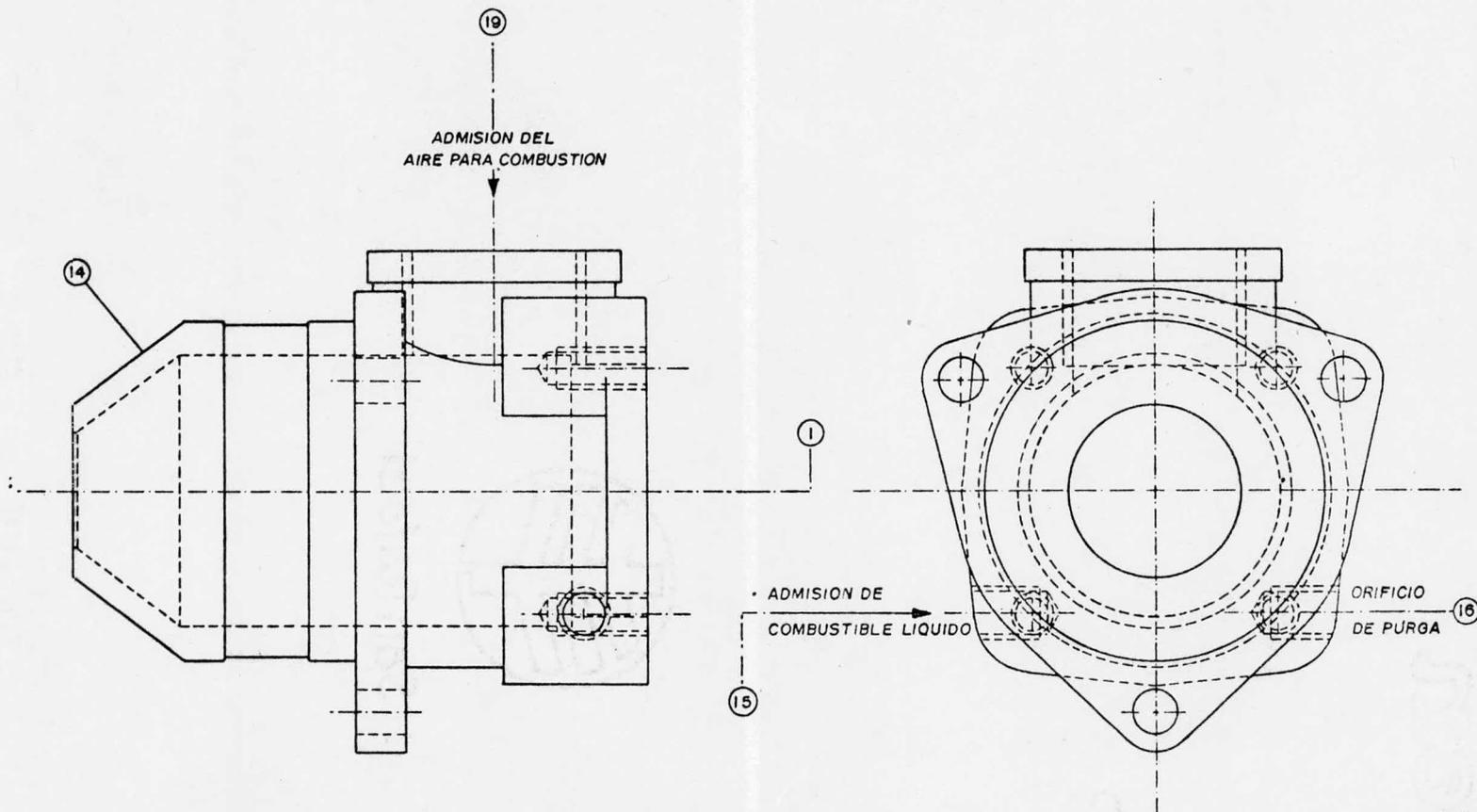


7	PERILLA CONTROL DE AIRE
6	TUERCA
5	ARANDELA
4	VARILLA REGULADORA
3	TORNILLO PRISIONERO
2	TAPON CON ROSCA Y SELLO
1	MECANISMO REG. Y DIST.

PZA	NOMBRE
REGULADOR DE AIRE Y DISTRIBUIDOR DE LIQUIDO	
ACOT.: cm	1
ESC.: 1:2	

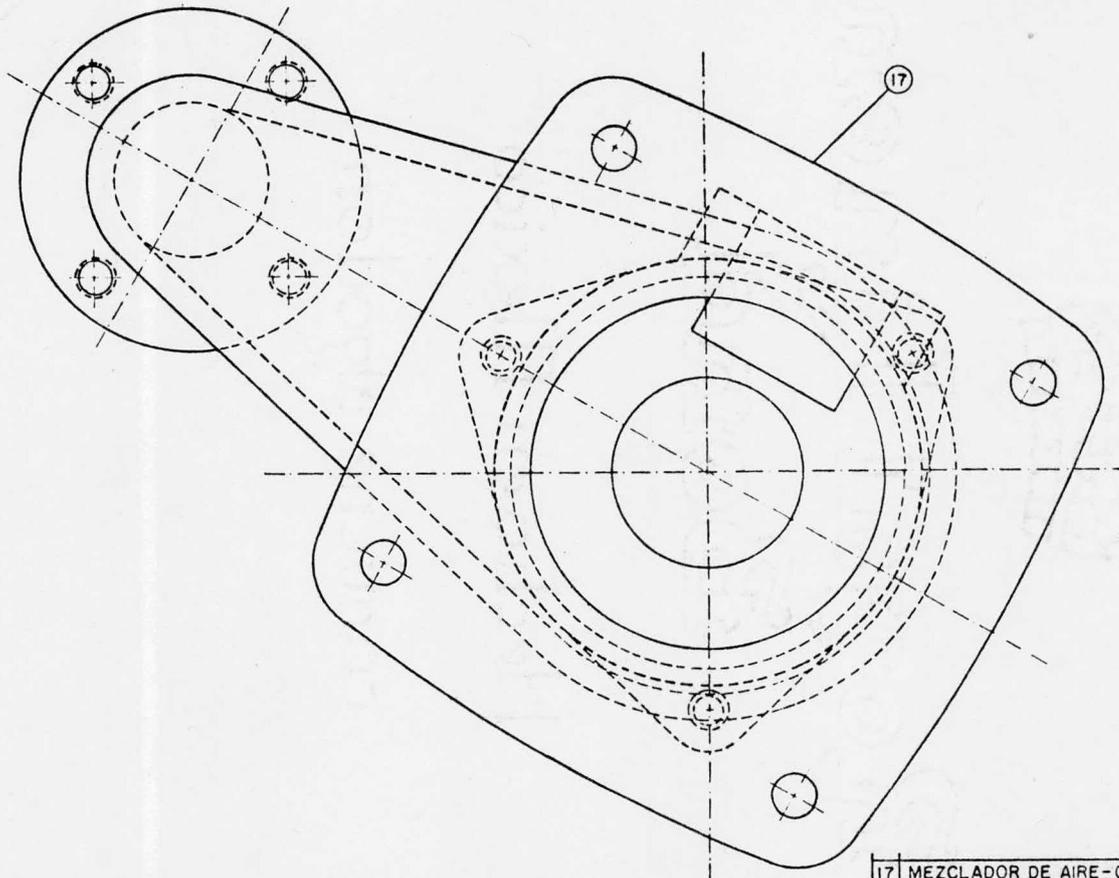
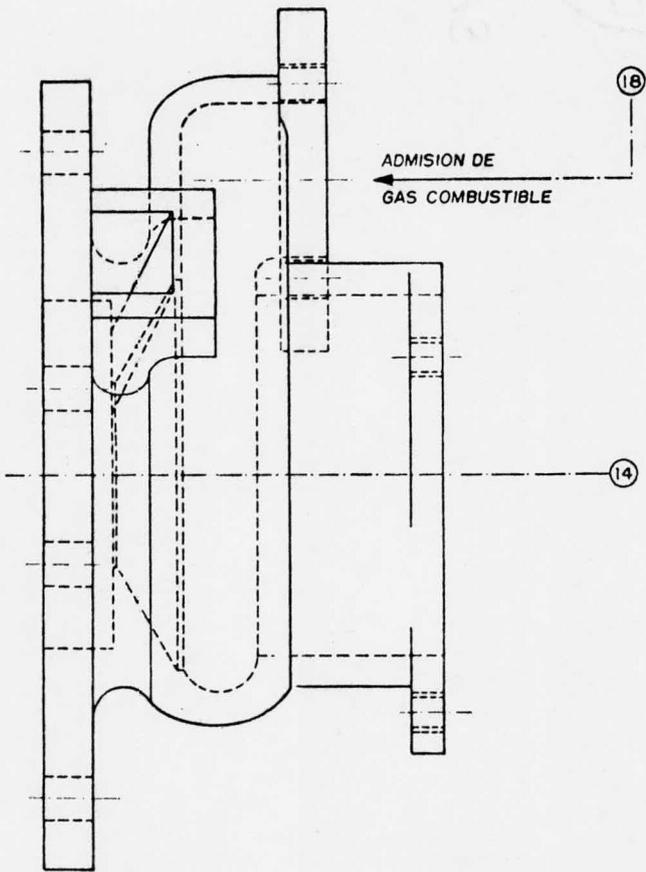


13	TAPON-TORNILLO
12	RETEN DEL FILTRO
11	MALLA METALICA-FILTRO
10	ATOMIZADOR
9	PARTE TRASERA DEL CONO
8	CONO OBTURADOR
PZA	NOMBRE
CONO OBTURADOR Y ATOMIZADOR	
ACOT: cm	2
ESC: 12	



16	TAPON ROSCADO
15	VALVULA SOLENOIDE
14	CAMARA DE SUMINISTRO-AIRE
PZA	NOMBRE
	CAMARA DE SUMINISTRO DE AIRE
ACOT.:cm	3
ESC. 1:2	

18 VALVULA SOLENOIDE



17	MEZCLADOR DE AIRE-GAS
PZA	NOMBRE
MEZCLADOR DE AIRE-GAS	
ACOT. cm	4
ESC. 1:2	

3) Retirando los tres tornillos de cabeza hexagonal que une la cámara de suministro de aire (pieza N° 14) con el mezclador de aire-gas (pieza N° 17), se puede separar la cámara de suministro de aire y el regulador de presión de aire con la tubería de llegada en su parte superior. Si no fuere necesario extraer esta pieza (N° 14) para su revisión y limpieza, entonces se recomienda no hacerlo. Si es preciso se debe sacar girando a un lado y a otro (derecha e izquierda) ya que la pieza (N° 14) en su parte cónica está machihembrada con el mezclador de aire. Por su peso se necesita más de una persona para realizar la tarea.

4) Por su forma el mezclador de aire (pieza N° 17) no necesita ser separado del cuerpo de la unidad, además de que se puede dañar la envoltura refractaria si se hace. Por esto se recomienda no quitarla.

-Limpieza y lubricación.

1) Se recomienda su limpieza con agua jabonosa, cepillando las zonas en las que se presenten adherencias extrañas.

2) La lubricación deberá hacerse en todas las partes sometidas a fricción o movimiento.

3) Debe tenerse especial cuidado en no dañar juntas y empaques.

-Ensamblado.

1) Para ensamblar seguir el orden inverso de secuencia de desarmado.

2) La cámara de suministro de aire, perfectamente limpia en su parte cónica, se inserta girando de derecha a izquierda y empujando hasta que las placas de unión se registran, entonces atornillar los tres pernos hexagonales.

3) Atornillar al distribuidor el atomizador (pieza N° 10) con su tapon tornillo.

4) Sobre la varilla guía reguladora (pieza N° 4) colocar la pieza N° 9, la cual ya debe tener atornillado el cono obturador, con los ocho tornillos de caja hexagonal. Ensamblar con precaución para no dañar el atomizador. Luego de montar la parte trasera del cono sobre la varilla guía colocar la arandela y la tuerca de fijación.

5) Instalar el mecanismo de regulación y distribución (pieza N° 1) sobre la cámara de suministro de aire, se registran los barrenos y se insertan los pernos de ajuste.

6) Fijar en su sitio la perilla de regulación mediante el prisionero.

7) Conectar la manguera de descarga del ventilador a la tubería de a-

cometida del aire al regulador de presión.

8) Instalar en la conexión de espiga la manguera que lleva aire de enfriamiento al detector de flama ultravioleta.

9) Atornillar la brida de unión del suministro de gas combustible y - el mezclador de aire (pieza Nº 17).

10) La conexión pol de la alimentación de combustible líquido se une a la entrada mediante la tuerca.

11) Finalmente comprobar que el quemador no presente fugas de combustible líquido o gaseoso. Si se registra escurrimiento se debe detectar su origen y suprimirlo (junta o empaque deteriorado, mal atornillado, etc.).

#### 7.4. Manómetro de presión de gas.

Las tareas de conservación para el manómetro de gas son:

1) Mantener la manguera y tubo de vidrio limpios, sin polvo y sin torsiones. Para lograrlo drenar y lavar una vez cada tres meses.

2) Antes de iniciar la práctica, comprobar que el fluido medidor (a--gua) está en el nivel adecuado y que no tenga ni cuerpos extraños ni burbujas.

3) El desacoplado de la manguera y del tubo de vidrio no precisa de - una guía detallada para realizarlo. Su aseo se hace con agua jabonosa para después reinstalarlo y llenarlo con agua.

#### 7.5. Cámara de combustión.

La cámara de combustión, construida con lámina de acero inoxidable soldada necesita de sólo dos tareas de conservación: limpieza externa e interna y la verificación del sellado para impedir infiltraciones de aire o escape inapropiado de gases.

Es necesario liberar del hollín a la cara interna de la cámara, expuesta a la flama. Este es producto de la combustión y tiene la propensión por su natura leza grasa a adherirse a la superficie de la pared, tornándose una capa calorí-fuga indeseable. Por lo tanto es preciso eliminarla periódicamente. Su extrac--ción se puede lograr lavando con agua jabonosa, en periodos que no excedan las-30 horas con combustible gaseoso y 20 horas con combustible líquido.

En la cámara, como ya se dijo, existen mirillas de cristal obscuro que es necesario limpiar para observar claramente la flama en el interior. Con tal fi-nalidad asear las mirillas una vez trimestralmente con agua jabonosa y secar -- con aire o paño suave. Para su colocación tener en cuenta que la cámara debe-

estar totalmente estanca al aire.

Aunque el acero inoxidable es incorrosible y no permite la incrustación sería conveniente drenar la camisa de agua de enfriamiento una vez concluida la práctica.

#### 7.6. Misceláneos.

-Tomador de muestras de gases. Este debe ser limpiado previamente a cada sesión de prácticas. El pequeño orificio de aspiración está en contacto con los gases y puede taponarse con hollín, entorpeciendo su objetivo. Su limpieza exterior no es tan importante como la del orificio.

-Bujía de ignición. Es preciso limpiar el entrehierro de la bujía de ignición con el fin de desprender sustancias adheridas que pudieran aislar el arco eléctrico. Para conseguir su limpieza se sugiere limpiar con un cepillo y agua jabonosa el entrehierro.

-Detector de flama ultravioleta. Este dispositivo precisa de limpieza preliminar a cada periodo de trabajo. Debe ser retirado del agujero en la placa refractaria para limpiar con un lienzo suave el cristal que protege la rejilla detectora. La vida útil del detector es de unas 40 mil horas, es decir que para este equipo didáctico es prácticamente imperecedera.

#### 7.7. Analizador de gases de Orsat.

a) Instrucciones para después del análisis. Los químicos deben mantenerse en la marca del cuello de cada pipeta. Cuando el analizador vaya a ser transportado las botellas conectadas a las pipetas deberán estar perfectamente tapadas con los taponetes. Asimismo, cerrar firmemente las válvulas de aguja. Vaciar el agua de la botella niveladora y colocar ésta en la pinza sujetadora del gabinete. Desconectar la manguera tomamuestras, la bomba y el filtro. La VM debe quedar en la posición 4. Finalmente, cerrar las puertas y enganchar la asa de piel.

b) Cuidado y mantenimiento del Orsat. La válvula maestra debe ser desmontada ocasionalmente, limpiada y lubricada con grasa. Si el resorte de la válvula ha perdido carga se desarma y se tensa para que después de lubricarla proceder al armado. Esto evitará fugas e incrementará la vida de la válvula.

El exceso de agitación y salpicado de agua en la bureta de medición y en la botella niveladora cuando se bombea la muestra puede indicar que el tubo está parcialmente bloqueado o que existe suciedad en el filtro. Para remediar es-

to se recomienda lavar mangueras, conexiones, bomba y filtro en agua jabonosa.

Se recomienda también tener a mano un juego nuevo de químicos. Empero, para realizar el cambio es necesario lavar previamente las pipetas. Para esto el analizador debe ser totalmente desensamblado. Sacar las pipetas desconectando los segmentos de manguera que las une al cabezal, derramar los químicos viejos y quitar los tapones de la parte baja de las pipetas para extraer el relleno metálico y lavarlo. Enseguida enjuagar y limpiar las pipetas y los rellenos con un fluido limpiador especial para este fin conseguible en el mismo lugar de venta de los químicos.

Nota. Los rellenos no se pueden lavar con agua sola ni con agua jabonosa ya que se provocaría su corrosión. Sólo deberá usarse la solución limpiadora especial.

Los rellenos y los químicos no deberán estar en contacto con el aire demasiado tiempo durante el cambio. Si el relleno de cobre presenta adherencias o precipitaciones se recomienda remojar la pipeta y el relleno por algunos minutos en un concentrado de hidróxido de amonio.

c) Pruebas de fugas del Orsat. El Orsat debe ser probado contra fugas inmediatamente que se presenten resultados ilógicos o que se haya ejecutado una reparación. El procedimiento para descubrir fugas es el siguiente:

- 1) Retirar los químicos de las pipetas. (Cuidar que no entren en contacto con el aire).
- 2) Preparar el Orsat como si se fuera a efectuar un análisis.
- 3) Cerrar las válvulas de aguja y apretar firmemente sus empaques. (Aflojar las válvulas de aguja antes de apretar las tuercas del empaque).
- 4) Abrir las tres válvulas de aguja y girar la VM maestra a la posición 4.
- 5) Elevar la botella niveladora para expulsar todo el aire de la bureta a la atmósfera.
- 6) Plegar la manguera de la botella niveladora con la palma de la mano.
- 7) Girar la VM a la posición 1.
- 8) Cerrar las válvulas de aguja de derecha a izquierda.
- 9) Retirar la presión de la mano sobre la manguera y depositarla sobre la mesa.

Si el nivel de agua en la bureta permanece inmóvil significa que no hay fugas de aire, pero si el nivel de agua desciende (aunque sea lentamente) es que existe una fuga de aire.

Esto indica que hay una fuga en el cabezal, en el ensamble de las válvulas de aguja o en la conexión de la bureta y el cabezal.

10) Abrir las válvulas de aguja una a una de izquierda a derecha. Cada vez que se abra una válvula el nivel del agua de la bureta descenderá para después permanecer inmóvil si es que no hay fuga. Si la hubiera el nivel del agua seguirá descendiendo, con lo que se prueba que existe alguna fuga en las pipetas, las botellas de los químicos o en las conexiones.

Antes de usar el Orsat comprobar que las mangueras y todas las conexiones estén libres de fugas, esto se puede realizar de la siguiente manera:

1) Plegar la manguera de entrada de gases y girar la válvula maestra a la posición número 4 (ver figura No 5.3).

2) Ajustar el nivel del agua de la bureta en la parte baja y dejar la botella niveladora sobre la mesa.

3) Girar la válvula maestra a la posición No 3 (ver figura 5.3).

4) Colocar la botella niveladora sobre el gabinete del Orsat, y observar el nivel del agua en la bureta. Si el nivel del agua se eleva hasta la parte alta de la bureta esto significa que hay una fuga de aire. Si sólo se eleva unos centímetros y se detiene entonces no existe fuga.

Nota. Si se ha descubierto una fuga para localizarla se recomienda introducir en una tanque con agua la parte sospechosa. Se quita la botella niveladora y se conecta en su lugar la bomba con una manguera. Bombear hasta que se observen burbujas para con esto encontrar la fuga.



Faint, illegible text, possibly a title or header, located below the crown emblem.

Faint, illegible text, possibly a subtitle or section header, located below the first line of text.

Faint, illegible text, possibly a line of a list or a paragraph, located in the middle section of the page.

Faint, illegible text, possibly a line of a list or a paragraph, located below the middle section of the page.



Faint text located below the circular logo on the left side of the page.

APENDICE

Tabla No 1. Entalpía de formación.

$\Delta \bar{h}_f^\circ$ , entalpía de formación estándar ( $T^\circ = 25^\circ\text{C}$  y  $P^\circ = 1 \text{ atm}$ ), kJ/kg mol.

$\bar{h}_{fg}^\circ$ , entalpía de vaporización a  $25^\circ\text{C}$ , kJ/kg mol.

SUSTANCIA	Peso Mol.(M)	$\Delta \bar{h}_f^\circ$	$\bar{h}_{fg}^\circ$
Acetileno, $\text{C}_2\text{H}_2$ (g)	26.036	+226878.50	-
Amoniaco, $\text{NH}_3$ (g)	17.032	- 45929.19	19874.74
Argón, Ar (g)	39.95	0	-
Benceno, $\text{C}_6\text{H}_6$ (g)	78.108	+ 82982.37	33871.21
$\text{C}_6\text{H}_6$ (l)		+ 48692.48	-
n-Butano, $\text{C}_4\text{H}_{10}$ (g)	58.120	-126232.02	21080.54
Carbono (grafito), C (s)	12.01	0	-
Carbono (diamante), C (s)		+ 1.05	-
Bióxido de carbono, $\text{CO}_2$ (g)	44.010	-393772.72	-
Monóxido de carbono, CO (g)	28.01	-110623.63	-
Cloro, $\text{Cl}_2$ (g)	70.914	0	-
Cianógeno, $\text{C}_2\text{N}_2$ (g)	52.038	+308144.29	-
Etano, $\text{C}_2\text{H}_6$ (g)	30.068	- 89724.08	-
Etanol, $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (g)	46.068	-235461.44	42370.42
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (l)		-377831.86	-
Eteno, $\text{C}_2\text{H}_4$ (g)	28.052	+ 52502.47	-
Flúor, $\text{F}_2$ (g)	38.00	0	-
Helio, He (g)	4.003	0	-
n-Heptano, $\text{C}_7\text{H}_{16}$ (g)	100.198	-187945.45	36584.26
$\text{C}_7\text{H}_{16}$ (l)		-224525.52	-
Hidrazina, $\text{N}_2\text{H}_4$ (g)	32.048	+ 95417.17	-
Hidrógeno, H (g)	1.008	+218128.09	-
Hidrógeno, $\text{H}_2$ (g)	2.016	0	-
Peróxido de hidrógeno, $\text{H}_2\text{O}_2$ (g)	34.016	-136196.60	51539.51
$\text{H}_2\text{O}_2$ (l)		-187736.11	-
Acido sulfhídrico, $\text{H}_2\text{S}$ (g)	34.086	- 20431.58	-
Hidroxilo, OH (g)	17.008	+ 39489.89	-
Metano, $\text{CH}_4$ (g)	16.042	- 74918.59	-
Metanol, $\text{CH}_4\text{O}$ (g)	32.042	-201297.15	37438.36
$\text{CH}_4\text{O}$ (l)		-238739.71	-
Cloruro de metilo, $\text{CH}_3\text{Cl}$ (g)	50.49	- 86503.47	-

Tabla No 1. Cont. Entalpía de formación.

$\bar{h}_f^{\circ}$ , entalpía de formación estándar ( $T^{\circ} = 25^{\circ}\text{C}$  y  $P^{\circ} = 1 \text{ atm}$ ), kJ/kg mol.

$\bar{h}_{fg}^{\circ}$ , entalpía de vaporización a  $25^{\circ}\text{C}$ , kJ/kg mol.

SUSTANCIA	Peso Mol.(M)	$\bar{h}_f^{\circ}$	$\bar{h}_{fg}^{\circ}$
Neón, Ne (g)	20.183	0	-
Nitrógeno, N <sub>2</sub> (g)	28.016	0	-
Oxido de nitrógeno, NO (g)	30.008	+ 90430.69	-
Bióxido de nitrógeno, NO <sub>2</sub> (g)	48.008	+ 33117.58	-
n-Octano, C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	114.224	-208582.18	41533.05
C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)		-250094.31	-
Nonano, C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> (g)	128.250	-228950.97	46381.37
Oxígeno, O (g)	16.00	+249357.43	-
Oxígeno, O <sub>2</sub> (g)	32.00	0	-
Ozono, O <sub>3</sub> (g)	48.00	+142769.88	-
Propano, C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	44.094	-103912.18	15093.41
Bióxido de azufre, SO <sub>2</sub> (g)	64.07	-297036.71	21796.48
Agua, H <sub>2</sub> O (g)	18.016	-241917.31	-
H <sub>2</sub> O (l)		-286029.61	-

Tabla No 2. Necesidades de aire y productos de la combustión.

Combustible	Fórmula química	Peso molecular	Densidad específica, Kg/m <sup>3</sup> a 20°C y una atmósfera.	Volumen de aire necesario para la combustión del volumen unitario de combustible.	Masa de aire necesaria para la combustión de la masa unitaria de combustible.	Productos de la combustión de 1 Kg de combustible con la cantidad teórica de aire, Kg.		
						CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>
Oxígeno	O <sub>2</sub>	32.0	1.33					
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	28.08	1.16					
Aire			1.20					
Hidrógeno	H <sub>2</sub>	2.026	0.083	2.39	34.2	0.0	8.94	26.28
Vapor de agua	H <sub>2</sub> O	18.016						
Oxido de carbono	CO	28.00	1.16	2.39				
Anhídrido carbónico	CO <sub>2</sub>	44.00	1.83					
Metano	CH <sub>4</sub>	16.03	0.66	9.55	17.21	2.75	2.248	13.22
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.05	1.25	16.71	16.07	2.93	1.799	12.34
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.06	1.83	23.87	15.65	3.00	1.635	12.02
Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.1	2.41	30.94	15.44	3.03	1.551	11.86
Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.1	2.99	38.08	15.31	3.05	1.499	11.76
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.1	3.57	45.3	15.22	3.07	1.465	11.69
Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.1	4.16	52.5	15.15	3.08	1.439	11.64
Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.1	4.74	59.7	15.11	3.08	1.421	11.60
Nonano	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.2	5.32	66.8	15.07	3.09	1.406	11.57
Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.0	3.24	35.8	13.26	3.38	0.693	10.18
Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.1	3.82	42.9	13.50	3.35	0.783	10.36
Xileno	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.2	4.41	50.1	13.57	3.31	0.845	10.42

Tabla 2. Cont. Necesidades de aire y productos de la combustión.

Ciclohexano	$C_6H_{12}$	84.0	3.49	43.0	14.76	3.14	1.285	11.34
Etileno	$C_2H_4$	28.03	1.16	14.32	14.76	3.14	1.285	11.34
Propileno	$C_3H_6$	42.0	1.74	21.48	14.76	3.14	1.285	11.34
Butileno	$C_4H_8$	64.1	2.33	28.64	14.76	3.14	1.285	11.34
Acetileno	$C_2H_2$	26.02	1.08	11.93	13.26	3.38	0.693	10.18
Alileno	$C_3H_4$	40.0	1.66	19.09	13.78	3.30	0.900	10.59
Naftaleno	$C_{10}H_8$	128.1	5.32	57.3	12.93	3.44	0.563	9.93
Alcohol metílico	$CH_4O$	32.0	1.33	7.16	6.46	1.37	1.125	4.96
Alcohol etílico	$C_2H_6O$	46.0	1.91	14.32	8.99	1.91	1.174	6.90

**Tabla No 3. Calores específicos a presión constante, de varias sustancias a presión cero.**

Gas o Vapor	$\text{kJ/kg mol} \cdot \text{K} \text{ (T en } ^\circ\text{K)}$	Rango, $^\circ\text{C}$	Error máx. %
$\text{O}_2$	$\bar{c} = 48.213 - \frac{536}{\sqrt{T}} + \frac{3559}{T}$	150 - 1540	1.1
	$= 48.213 - \frac{536}{\sqrt{T}} + \frac{3559}{T}$	1540 - 2750	0.3
	$+ \frac{0.38}{1000} (T - 2220)$		
$\text{N}_2$	$\bar{c} = 39.65 - \frac{8.08 \times 10^3}{T} + \frac{1.5 \times 10^6}{T^2}$	150 - 2750	1.7
$\text{CO}$	$\bar{c} = 39.61 - \frac{7.66 \times 10^3}{T} + \frac{1.38 \times 10^6}{T^2}$	150 - 2750	1.1
$\text{H}_2$	$\bar{c} = 24.12 + (4.35 T/1000) + (62.4/\sqrt{T})$	150 - 1200	0.8
	$= 24.12 + (4.35 T/1000) + (62.4/\sqrt{T})$	1200 - 2750	1.4
	$- \frac{2.49}{1000}(T - 2220)$		
$\text{H}_2\text{O}$	$\bar{c} = 83.15 - (186.3/\sqrt{T}) + 17.46/T$	150 - 1650	1.8
$\text{CO}_2$	$\bar{c} = 67.8 - \frac{15.2 \times 10^3}{T} + \frac{1.82 \times 10^6}{T^2}$	150 - 1925	0.8
$\text{CH}_4$	$\bar{c} = 18.93 + 0.0555 T$	150 - 440	1.2
$\text{C}_2\text{H}_4$	$\bar{c} = 17.71 + 0.0888 T$	90 - 320	1.5
$\text{C}_2\text{H}_6$	$\bar{c} = 16.79 + 0.1232 T$	105 - 320	1.5
$\text{C}_3\text{H}_8$	$\bar{c} = 9.454 + 0.2412 T - 73.7 T^2 \times 10^{-6}$	110 - 825	1.8
$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\bar{c} = 18.26 + 0.3044 T - 92.5 T^2 \times 10^{-6}$	150 - 825	1.7
$\text{C}_8\text{H}_{18}$	$\bar{c} = 33.16 + 0.452 T$	105 - 320	4
$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	$\bar{c} = 36.34 + 0.67 T$	105 - 320	4

Tabla No 4. Entalpía de un gas ideal.

Oxígeno monoatómico (O)  
 (  $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = 249,357.43 \text{ KJ/kg mol}$  )  
 M = 16.00

Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)  
 (  $\bar{h}_{f,298}^{\circ} = -393,772.72 \text{ KJ/kg mol}$  )  
 M = 44.011

Temperatura °K	( $\bar{h}^{\circ} - \bar{h}_{298}^{\circ}$ ) KJ/kg mol	Temperatura °K	( $\bar{h}^{\circ} - \bar{h}_{298}^{\circ}$ ) KJ/kg mol
0	-6,133	0	-9,371
100	-4,522	100	-6,159
200	-2,190	200	-3,379
298	0	298	0
300	42	300	67
400	2,211	400	4,011
500	4,346	500	8,320
600	6,465	600	12,925
700	8,275	700	17,774
800	10,677	800	22,832
900	12,779	900	28,061
1000	14,872	1000	33,429
1100	16,962	1100	38,922
1200	19,055	1200	44,516
1300	21,140	1300	50,194
1400	23,229	1400	55,947
1500	25,315	1500	61,758
1600	27,400	1600	67,628
1700	29,485	1700	73,545
1800	31,570	1800	79,499
1900	33,655	1900	85,490
2000	35,740	2000	91,515
2100	37,825	2100	97,570
2200	39,910	2200	103,649
2300	41,991	2300	109,750
2400	44,077	2400	115,871
2500	46,166	2500	122,013
2600	48,251	2600	128,177
2700	50,340	2700	134,352
2800	52,430	2800	140,545
2900	54,523	2900	146,750
3000	56,617	3000	152,972
3200	60,812	3200	165,449
3400	65,020	3400	177,977
3600	69,240	3600	190,542
3800	73,478	3800	203,145
4000	77,732	4000	215,790
4200	82,007	4200	228,468
4400	86,298	4400	241,175
4600	90,611	4600	253,916
4800	94,944	4800	266,591
5000	99,295	5000	279,495

Tabla No 4. Cont. Entalpía de un gas ideal.

Monóxido de carbono (CO)		Agua (H <sub>2</sub> O)	
( $\bar{h}_f^{\circ} = -110,623.63$ KJ/kg mol )		( $\bar{h}_f^{\circ} = -241,917.31$ KJ/kg mol )	
M = 28.011		M = 18.016	
Temperatura °K	( $\bar{h}^{\circ} - \bar{h}_{298}^{\circ}$ ) KJ/kg mol	Temperatura °K	( $\bar{h}^{\circ} - \bar{h}_{298}^{\circ}$ ) KJ/kg mol
0	-8,680	0	-9,911
100	-5,832	100	-6,620
200	-2,868	200	-3,283
298	0	298	0
300	54	300	63
400	2,977	400	3,454
500	5,933	500	6,925
600	8,948	600	10,505
700	12,029	700	14,194
800	15,186	800	18,004
900	18,410	900	21,940
1000	21,701	1000	25,997
1100	24,862	1100	30,188
1200	28,446	1200	34,501
1300	31,888	1300	38,931
1400	35,363	1400	43,478
1500	38,876	1500	48,130
1600	42,414	1600	52,882
1700	45,973	1700	57,726
1800	49,557	1800	62,654
1900	53,162	1900	67,662
2000	56,780	2000	72,741
2100	60,418	2100	77,887
2200	64,065	2200	83,095
2300	67,725	2300	88,358
2400	71,397	2400	93,672
2500	75,077	2500	99,035
2600	78,770	2600	104,445
2700	82,467	2700	109,892
2800	86,177	2800	115,377
2900	89,891	2900	120,900
3000	93,609	3000	126,452
3200	101,070	3200	137,652
3400	108,556	3400	148,961
3600	116,059	3600	160,362
3800	123,583	3800	171,847
4000	131,120	4000	183,412
4200	138,678	4200	195,043
4400	146,252	4400	206,733
4600	153,835	4600	218,482
4800	161,438	4800	230,285
5000	169,050	5000	242,130

Tabla No 4. Cont. Entalpía de un gas ideal.

Hidrógeno monoatómico (H)

(  $\bar{h}_f^{\circ} = 218,128.09$  KJ/kg mol )  
 $\bar{h}_f^{\circ}$ <sub>298</sub>

M = 1.008

Temperatura °K	( $\bar{h}^{\circ} - \bar{h}_{298}^{\circ}$ ) KJ/kg mol
0	-6,201
100	-4,120
200	-2,043
298	0
300	38
400	2,119
500	4,200
600	6,281
700	8,357
800	10,438
900	12,519
1000	14,600
1100	16,681
1200	18,762
1300	20,839
1400	22,920
1500	25,001
1600	27,082
1700	29,162
1800	31,239
1900	33,320
2000	35,401
2100	37,482
2200	39,563
2300	41,640
2400	43,721
2500	45,802
2600	47,883
2700	49,963
2800	52,044
2900	54,121
3000	56,202
3200	60,364
3400	64,522
3600	68,684
3800	72,845
4000	77,003
4200	81,165
4400	85,327
4600	89,485
4800	93,646
5000	97,804

## B I B L I O G R A F I A

1. Salvi, Giuliano. La Combustión, Teoría y Aplicaciones, 2a ed., Madrid, - España. Ed. Dossat, S.A.
- 2, Babcock and Wilcox. Combustion, its generation and use.
3. Van Wylen, Gordon J. y Sonntag, Richard E. Fundamentos de termodinámica, - la. ed. México, Ed. Limusa, S.A., 1977.
4. Moring Faires, Virgil. Termodinámica, 2a ed., México. Unión Tipográfica - Editorial Hispano Americana, 1978.
5. Marks, Lionel S. y Baumeister, Theodore. Manual del Ingeniero Mecánico, - la. ed. en español. México, Unión Tipográfica Editorial- Hispano Americana, 1980.
6. Holman, J.P. Métodos Experimentales para Ingenieros, México, Edit. McGraw Hill, 1978.
7. Necati Ozisik, M. Transferencia de Calor, Bogotá, Colombia. Ed. McGraw-- Hill, 1979.