

20  
2ej



# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

DETERMINAR LA VELOCIDAD DE LA  
FLAMA DENTRO DE TUBOS

**T E S I S**

Que para obtener el título de  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
p r e s e n t a

**MIGUEL BARRERA DIAZ**



Director de tesis  
Dr. César Treviño Treviño

México, D. F.

1989

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

## I N D I C E

INTRODUCCION	I
DISEÑO DEL APARATO	II
CONSTRUCCION DEL APARATO	III
DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DE LA FLMA.	IV
RESULTADOS Y CONCLUSIONES	V
REFERENCIAS	VI

## INTRODUCCION

La introducción en el comercio de combustibles gaseosos de valores caloríficos altos, medianos y bajos a dado lugar a preguntas sobre la compatibilidad de combustibles de diferentes composiciones preparados para ser quemados dentro de sistemas de combustión. Como es normal, muchos de estos problemas están siendo resueltos sobre la práctica, en base al desarrollo de la cámara de combustión.

Una cámara de combustión puede describirse como un recipiente en el cual combustibles y oxidantes se inyectan de alguna manera y dentro del cual deberán de arder completamente como una flama estable, con el objetivo de proveer una salida de calor o trabajo para algún propósito útil

El diseño de las cámaras de combustión y su desarrollo en la mayoría de los casos se debe al arte, experiencias pasadas, así como la ciencia. Esta situación es consecuencia de formidables dificultades de diseño aunadas con la amplia variedad de combustibles y lo complejo de la combustión en sí.

Sin embargo, las dificultades del problema todavfa no -  
detienen los intentos de desarrollar teorias generales unifi-  
cadas capaces de predecir el desarrollo de todos los combus-  
tibles.

Este trabajo promete en particular servir de alguna for-  
ma para desarrollar teorias generales unificadas a fin de pre-  
decir el desarrollo de todos los combustibles cuando sean in-  
cinerados en cámaras de combustión.

#### REFERENCIAS

- 1.- Robert H. Essenhigh en stirred reactor desing of  
combustors page. 374-376.
- 2.- J. Odgers I. White D. Kretschmer en asme publication  
the experimental behaviours of premixed flames in  
tubes-the effects of diluent gases. December 1979.

## DISEÑO DEL APARATO

## DISEÑO DEL APARATO

La teoría considerada de relativa simplicidad nos hace la pregunta ¿ es posible medir la velocidad de la flama ? y la respuesta es el objetivo de este trabajo.

Se hacen algunas consideraciones para emplear gas L.P., ya que se tenía contemplado usar como combustible gas metano - después de hacer algunas sugerencias el director de esta tesis se concibe una aparato como se muestra en la fig. 1, en el cual los combustibles empleados son gases. La mezcla gaseosa es preparada introduciendo por separado gas L.P. (embotellado) y por el otro el aire, se considera presumiblemente se dispersaran rápida, razonablemente y uniformemente a través del aparato.

Los flujos son medidos por rotámetros, después se mezclan y luego pasan a la cámara de ignición donde son quemados por una chispa eléctrica, continuando la combustión a través de un tubo de vidrio transparente colocado horizontalmente.

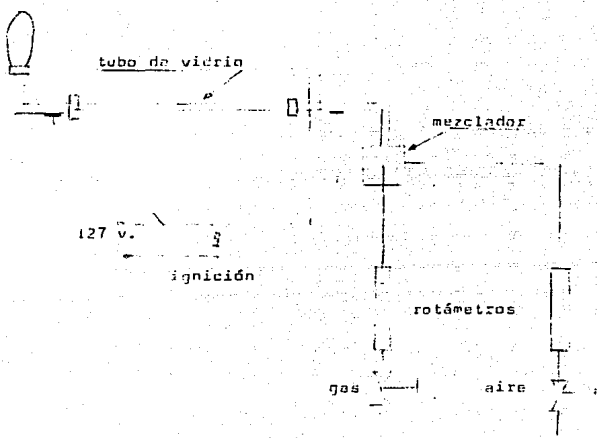


Fig. No. 1

Para comprender mejor el ensayo se saca un informe sobre combustibles y combustión.

El combustible empleado es combustible comercial ya pre--  
parado derivado del petróleo líquido (gas L.P.) formado princi  
palmente por propano (C3H8) en una proporción de 20% de éste -  
por 80% de butano (C4H10).



La tabla No. 1 indica algunos de los muchos hidrocarburos - conocidos y con algunas de las propiedades importantes como combustibles.

TABLA I  
PROPIEDADES DE LOS HIDROCARBUROS

	Fórmula	Temperatura °C			Densidad		Potencia calorífica (1) en kcal			Calor latente en kcal por kg	Valora- ción en octano	Número de atoma- ción (intercambio número) (amb 11 F = 3,75 litros)	Prome- dio de las W	
		Fusión	Ebullición	TAI (2)	Espe- cífica	API	Superior por kg	Inferior por kg	En la teoría por kg					
Gas	Metano	CH <sub>4</sub>	-182	-161	230	0,424	205,8	10 245	11 977	774	138	11(0)	...	18,0
	Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-182	-88	265	0,546	194,0	12 441	11 442	821	97	10(0)	...	20,0
	Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-186	-42	334	0,582	142,0	12 027	11 419	531	51	10(0)	...	44,0
	Gas LP, Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	-135	-0,55	316	0,579	116,5	11 852	10 896	841	91	92	...	55,1
	Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	-129	36	368	0,626	84,5	11 723	10 888	848	69	61	62	72,1
Parafinas saturadas	Gasolina (n Heptano)	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	-91	94	474	0,684	75,5	11 563	10 782	857	71	0	(0)	100,2
	Gasolina (n Octano)	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	-25	94	...	0,690	...	10 619	...	69	...	200	...	100,2
	Gasolina (n Decano)	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	-107	94	332	0,692	72,5	11 433	10 642	850	71	100	153	114,2
	Fuel oil (n Dodecano)	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	-20	174	401	0,730	62,5	11 444	10 659	859	60	...	...	122,3
	Fuel oil (n Hexadecano)	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	-10	236	...	0,749	57,5	11 410	10 651	862	59	...	...	170,3
Olefinas cadena no saturada	Hexeno-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	16	280	...	0,724	61,5	11 384	10 650	862	...	160	...	20,4
	Octadecano	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	27	237	...	0,742	49,5	11 333	10 561	876	...	...	...	24,7
	Propeno	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	-188	-47	...	0,61	163,0	11 666	10 563	859	...	75	...	42,1
Nafteos Arolicios saturados	Buteno-1	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	-195	-6	...	0,625	...	11 612	10 549	863	...	82	84	66,1
	Hexeno-1	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	-133	67	...	0,675	76,0	10 543	9 867	874	66	44	1	84,1
Arolicios no saturados	Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	94	94	...	0,746	86,7	10 432	9 741	871	...	83	140	20,0
	Ciclohexano	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	8	8	...	0,728	61,0	10 359	9 663	837	86	27	84	130
Aromáticos	Benceno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	5	80	230	0,88	29,0	10 088	9 249	861	84	11(0)	68	20,0
	Tolueno	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	-93	110	311	0,87	31,0	10 166	9 391	861	86	14(0)	58	20,0
Alcoholes	Metanol	C <sub>1</sub> H <sub>4</sub> O	-22	140	...	0,86	31,0	10 277	9 722	868	80	10(0)	...	10,2
	Etilalcohol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	-27	65	...	0,792	46,4	9 428	8 622	891	270	58	<75	20,0
Tetraetilplomo	Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	-117	78	...	0,787	47,1	7 669	6 446	833	250	59	<75	20,0
	Hidrógeno (gas)	H <sub>2</sub>	-126	142	...	1,653	...	...	...	...	...	...	...	...
	Agua	H <sub>2</sub> O	6	100	...	0,998	...	...	...	22,5	8	...	...	2,0
	Carbon sólido	C	...	...	...	...	...	...	...	0	...	...	...	18,0
	Gasolina (normal)	C	-60	43-140	...	...	...	...	...	4 810	...	...	...	32,0
Oxido de carbono	CO	-191	608	...	...	...	2 111	2 415	...	...	14(0)	54	93	28,0

(1) A volumen constante, a 25°C y a una presión de 1,033 kg por cm<sup>2</sup> (presión atmosférica).

(2) La temperatura de autoignición (TAI) es aquella temperatura a la cual el combustible a presión ambiente sin airecerca ninguna llama o chispa.

(3) Aproximado.

(4) Sin tetraetilplomo.

Una propiedad importante que está relacionada con la velocidad de la flama es la potencia calorífica y ésta se define - de la siguiente manera:

La potencia calorífica de un combustible, es la energía liberada por unidad de peso ó de volumen del mismo. Para los combustibles sólidos ó líquidos, la potencia calorífica se expresa en kcal. por kg. y para los gaseosos en kcal. por metro cúbico de gas medido a una temperatura de 15.6 grados C y a una presión absoluta de 762 mm. de mercurio.

Los combustibles que contienen hidrógeno tienen dos potencias caloríficas, la superior y la inferior. La potencia calorífica inferior es el calor liberado por kg. de combustible después de reducir el necesario para vaporizar el agua formada por la combustión del hidrógeno.

La potencia calorífica superior de un combustible es la obtenida mediante un calorímetro de volumen constante en el cual el vapor producido se condensa y se recupera su calor. - La potencia calorífica de un combustible puede determinarse - por el cálculo o bien mediante el empleo de un calorímetro, - como el de la fig. No. 2.

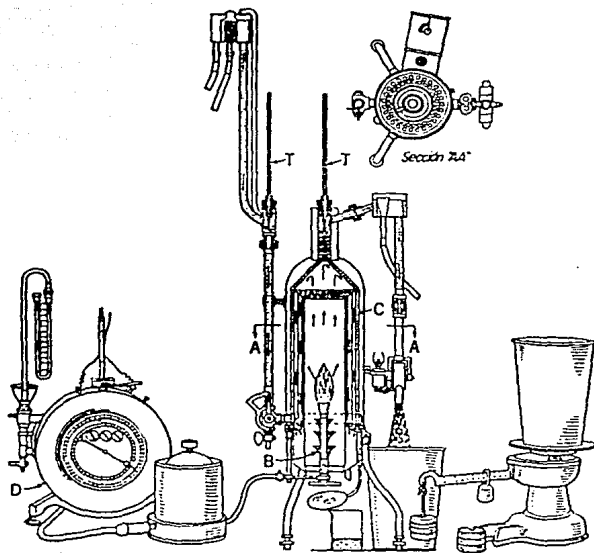
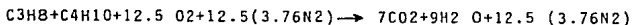


FIG. 50. Calorimetro Sargent, para gases.

3

Combustión es sinónimo de oxidación y consiste en la unión del oxígeno con una materia combustible. Los grados de la combustión varían ampliamente, conociéndose la combustión lenta y la combustión muy rápida ó detonación. Se dice que una combustión es completa cuanto el combustible es completamente oxidado y se libera toda la energía. la siguiente expresión corresponde a la oxidación completa de gas L.P.



La combustión incompleta puede ser debida a: (1) insuficiencia de oxígeno; (2) mezcla imperfecta entre el combustible y el oxígeno y (3) temperatura demasiado baja para mantener la combustión.

El oxígeno necesario para la combustión es captado siempre del aire, acompañado de gran cantidad de nitrógeno, debido a que no es fácil la separación de ambos. En la tabla #2 figuran los porcentajes de los principales componentes del aire seco.

TABLA # 2  
COMPOSICIÓN DEL AIRE SECO

	% en volumen, moles	% en peso	Peso molecular, kg por mol
Oxígeno.....	20.99	23.19	32
Nitrógeno.....	78.03	75.47	28.016
Argón.....	0.94	1.30	39.944
Anhidrido carbónico.....	0.03	0.04	44.003
Hidrógeno.....	0.01	0	2.016
Aire seco.....	100	100	28.967

El aire se halla constituido por 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, en volumen; y por 23.2% de oxígeno y 76.8% de nitrógeno, en peso todos los constituyentes, excepto el oxígeno, pueden considerarse en conjunto como un gas inerte.

El aire utilizado para hacer éste trabajo experimental es aire comprimido y por sus características es considerado como saturado a 21' grado centígrado y contiene 2.46% de humedad en volumen.

#### REFERENCIAS

- 1.- W.H. Severns M.S.

La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases. pags. 88-125

- 2.- J. Odgers I.White D.Kretschamer

an asme publication.

- 3.- Combustión chemistry

- 4.- Manual Selmecc 1982.

## II

### C O N S T R U C C I O N D E L A P A R A T O

## CONSTRUCCION DEL APARATO

Para controlar la entrada del aire se coloca una válvula de bronce tipo globo de 9.525 mm. de diámetro y otra de las mismas características pero de 6.35 mm. de diámetro para controlar el gas. Para conducir los fluidos se emplean mangueras de plástico transparentes hasta los rotámetros, éstos nos sirven para medir la cantidad necesaria de gases para hacer la combustión.

Para medir la cantidad de aire que está pasando se coloca el rotámetro en posición vertical siendo la entrada del fluido en la parte inferior; la marca del rotámetro es Roger Gilmont serie E-1013 tamaño 5. Para medir la cantidad de gas se coloca otro rotámetro en posición vertical con la entrada por la parte inferior, la marca del rotámetro es Roger Gilmont No. de serie F-121 tamaño 3 y sus cartas aparecen en las fig. No. 3 y 4 respectivamente.

Las salidas de los rotámetros están en la parte superior y éstas se conectan hasta las entradas del mezclador por medio de mangueras de plástico transparentes. El mezclador se contruye de fierro como se muestra en la fig. No. 5. La entrada de 9.525 mm. es para el aire, la de 6.35 mm. para el gas.

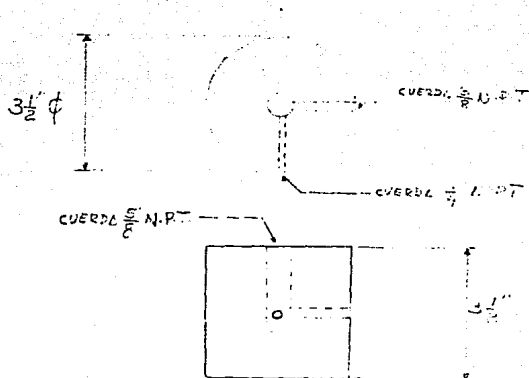


fig. No. 5

Posteriormente la salida de 15.875 mm. del mezclador se une a un tubo de fierro a 90 grados que nos sirve en la parte horizontal cercana al tubo de vidrio como la cámara de combustión donde son quemados los gases



La ignición se hace con un pequeño transformador conectado en la entrada a 127 volts y en la línea un botón pulsador para hacer la chispa eléctrica y prenderla mezcla; en la salida se colocan cables para alto voltaje que llegan a los electrodos, éstos son de alambre de cobre desnudo calibre 12 y aislados con juntas de cerámica y resina dieléctrica que a la vez sirven de sellador de fugas.

Se diseñan los coples y se fabrican de acero para unir el tubo de vidrio transparente tipo pyrex de 19 mm  $\phi$  y 70cms. de longitud, en los extremos del tubo de vidrio se colocan trampas de flama, éstas son telas de alambre tipo cribas para detener los viajes de las flamas. Para probar el equipo se conecta al final del tubo de vidrio un codo de fierro a 90 grados con la salida hacia arriba.

#### Algunos Datos Referentes a Límites de Flamabilidad

Una mezcla flamable de gases como metano y aire es disuelta con uno de sus componentes o con otros gases hasta hacerla no flamable. Límite de flamabilidad es el límite de composición, un ligero cambio en la composición hace que una mezcla flamable se convierta en no flamable.

Hay dos límites de flamabilidad, alto y bajo para cada par de los llamados gases combustibles que sostienen la combustión. El límite bajo corresponde a la cantidad mínima de gas combustible y el límite alto o límite superior es la máxima cantidad de gas combustible capaz de producir flamabilidad en la mezcla, por ejemplo, para mezclas de aire y metano, estos límites bajo condiciones normales son aproximadamente 5 y 14% respectivamente. Las mezclas dentro de estos límites liberan más energía en la combustión.

La determinación de los límites de flamabilidad es más difícil de lo que puede esperarse tal como lo demuestran los reportes contradictorios publicados.

Condiciones para La Propagación de la Flama en Mezclas de Gases.

Cuando una fuente de calor de suficiente tamaño e intensidad es introducida en una mezcla débil, ocurre alguna combustión aún cuando la mezcla es incapaz de autopropagarse, esto es frecuentemente visible, como una capucha de flama la cual puede ser larga si la fuente de calor es amplia, el flama puede ser fijo en relación a la posición de la fuente de ignición. Como la flama de un soplete oxiacetilénico, la

cual puede despegarse de la fuente y flotar a una distancia limitada que puede ser 0.6 o 1 mts. Tales flamas no se auto propagan ya que son extinguidas cuando la influencia de la - fuente de encendido se pierde.

#### Dirección de la Flama

Cuando una fuente de ignición tal como una chispa eléctrica o una flama es introducida dentro de una mezcla flammable, la flama tiende a viajar desde la fuente en todas direc ciones.

#### Longitud del Recipiente.

Cuando la flama viaja desde el final abierto en un tubo preparado al final cerrado, esta velocidad es uniforme sobre una distancia que depende la composición de la mezcla y de las dimensiones del tubo, la inflamación de una capa de gas repi te la inflamación de cualquier otra capa en el "movimiento - uniforme" de la flama. Tarde o temprano el mov. unif. es re emplazado por el movimiento vibratorio pero éste es raramente observado en mezclas límites.

### Efectos de Pequeños Cambios en Composición Atmós.

Los límites algunas veces han sido determinados toscamente en mezclas secas en las cuales la presión parcial del agua y el vapor es menor a un milímetro; algunas veces con mezclas saturadas con agua y vapor a la temperatura del laboratorio. La condición de humedad no siempre ha sido establecida, quizás porque se ha asumido que es negligente, probablemente la diferencia es apreciable para algunos de los gases en un trabajo exacto. Así es que el límite más bajo de metano en el aire es en ciertos experimentos comparativos, resultó ser 5.24% para una mezcla seca de clorhidrato de calcio y 5.22% para una saturada de agua y vapor a temperatura de laboratorio.

Estos porcentajes actuales y la igualdad dentro del error experimental son reportados de análisis calculados en una base seca, éstos parecen 5.24 y 5.37% respectivamente. Para el metano además el límite verdadero bajo no es apreciablemente afectado por el reemplazo de casi 2% de aire por un volumen igual de vapor de agua.

### Presión

Las variaciones normales de la presión atmosférica se desprecian ya que no afectan los límites de flamabilidad. Presión atmosférica o barométrica normal: 760 mm. de mercurio ó 1.033 kg/cm<sup>2</sup>.

### Temperatura.

La temperatura se toma la del laboratorio (ambiental) y esta no afecta a los límites de inflamabilidad.

### Turbulencia.

Pocas observaciones han sido hechas al efecto de la turbulencia, pero ha sido mostrado que los bajos límites de metano y etano en el aire son reducidos por una suave cantidad de turbulencia producida por un abanico o por un movimiento de corriente de la mezcla con la inflamabilidad de otras mezclas de aire.

### Supresión de la Inflamabilidad

Una mezcla inflamable puede reducirse a no inflamable.

- a) Con un incremento en la cantidad de cualquier componente.
- b) La adición de una cantidad suave de una sustancia Química e inerte y
- c) La adición de una sustancia inflamable en cantidad suficiente para exceder el alto límite de la mezcla resultante. Por ejemplo la mezcla de hidrógeno y aire conteniendo solamente bastante oxígeno para quemar el hidrógeno completamente (29.5% hidrógeno) se convierte en no inflamable en una mezcla final conteniendo (86% aire y 65% de hidrógeno) ó 67% de nitrógeno ó 10% de metano.

Aparato para determinar los Límites de Flamabilidad en Gases y Vapores.

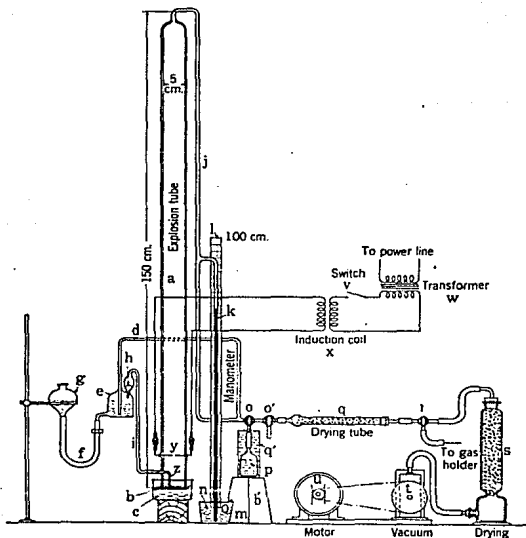


FIGURE 3.—Apparatus for Determining Limits of Flammability of Gases and Vapors.

Referencias

- 1.- H.F. Coward and G.W. Jones. Límites de flamabilidad de Gases y Vapores.
- 2.- J. Odgers I white D. Kretschmer. The experimental behaviours of premixed flames in tubes.- The effects of diluent gases.

### III

## DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE LA FLAMA.

## METODO PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE LA FLAMA.

Una vez que han considerado todos los parámetros se pro  
cede a medir la velocidad de la flama.

Primero se purgan las válvulas del equipo y se prende -  
como si fuera un mechero, para revisar que no hallan fugas.  
En seguida se hacen diferentes mezclas, se hace la ignición  
con un pequeño transformador pero se observa que no hay com-  
bustión. Después de muchos experimentos se detecta una ex-  
plosión dentro del tubo producida por la expansión térmica -  
de la combustión del gas, apreciando con la vista una ondula  
ción que es restringida por la pared del tubo y siguiendo la  
dirección del lado abierto del tubo y esta onda se detiene -  
al final del tubo donde esta la trampa.

Las mezclas débiles no fueron vistas, las ondas fueron  
vistas utilizando mezclas ricas. Consecuentemente el flujo -  
atañe velocidades más altas que en bajo condiciones de expan  
sión libre.

Una película cinematográfica de 18 mm. es usada para me  
dir la velocidad de la flama dentro de tubos; se preparan -  
las mezclas que se desean medir y ésta se acciona instantes



antes para observar la flama entre el inicio y el final del tubo de vidrio que es de 70 cms. de longitud.

Se prepara la mezcla haciendo pasar aire por el flujómetro de la fig. No. 3 y se mantiene constante en 30 que - - equivale a 23000 ml./min. En el flujómetro de la fig. No. 4 se hace pasar el gas en cantidades diferentes y se toma la - - película, de ésta se obtiene el número de cuadro que recorre la flama.

	AIRE	ml./min.	COMBUSTIBLE	ml./min.	No. de CUADROS
1)	30	23,000	21	2200	21
2)	30	23,000	21	2250	21
3)	30	23,000	22	2350	22
4)	30	23,000	24	2450	24
5)	30	23,000	25	2600	23
6)	30	23,000	27	2800	22
7)	30	23,000	28	3000	26
8)	30	23,000	29	3200	24
9)	30	23,000	30	3300	22
10)	30	23,000	31	3400	20
11)	30	23,000	32	3600	19
12)	30	23,000	33	3700	17

13)	15	12,000	25	26000	22
14)	15	12,000	28	30000	28
15)	15	12,000	30	33000	30
16)	15	12,000	32	36000	32
17)	15	12,000	34	40000	34

La velocidad de la película es de 18 cuadros/seg.

$$\text{La velocidad de la flama} = \frac{.70\text{m} \times 18 \text{ cuad/seg.}}{\text{No. de cuadros}} = \frac{.70\text{m} \times 18 \text{ seg.}}{\text{No. de cuad.}}$$

	VELOCIDAD m/seg.	RELACION vol. aire/gas
1)	0.6	10.45
2)	0.6	10.25
3)	0.57	9.78
4)	0.52	9.38
5)	0.57	8.84
6)	0.57	8.5
7)	0.48	7.6
8)	0.52	7.18
9)	0.57	6.96
10)	0.63	6.76
11)	0.66	6.38
12)	0.74	6.21
13)	0.57	4.6

14)	0.45	4.0
15)	0.42	3.6
16)	0.39	3.3
17)	0.37	3.0

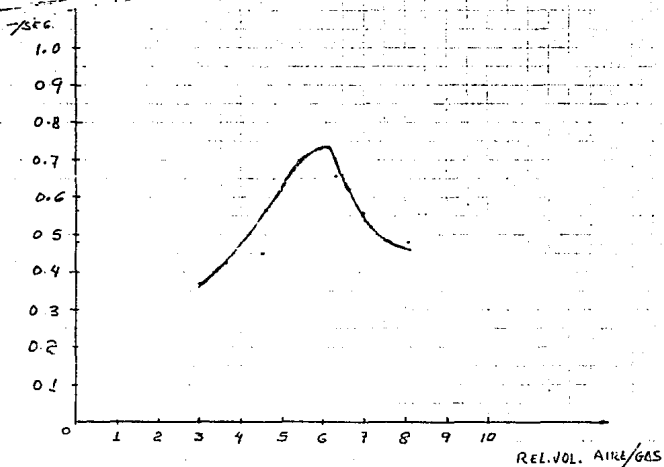


FIG. 6 VELOCIDAD DEL VIAJE DE LA FLAMA.

SIZE NO. 3

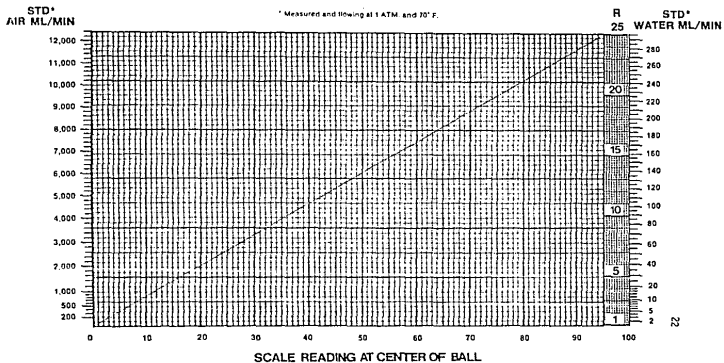


Calibration Chart  
Flowmeter Catalog No. F1300

Serial No. F-121

D. = 0.250" W. = 0.329 GM  $\rho$  = 255 GM/ML

\* Measured and flowing at 1 ATM. and 70° F.



SIZE NO. 5

F. 1. 1. 1. 1.

**ROGER GILMONT** Calibration Chart  
Flowmeter Catalog No. F1500

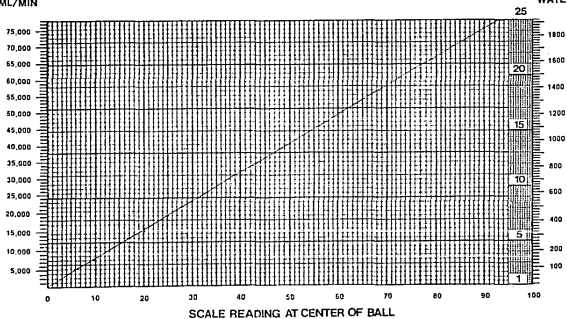
Serial No. E-1013

D. = 0.500" W. = 2.715 GM  $\rho$ . = 2.53 GM/ML

\* MEASURED AND FLOWING AT 1 ATM. AND 75° F.

STD\*  
AIR ML/MIN

STD\*  
WATER ML/MIN



## PROPAGACION DE LA FLAMA

Grado de propagación de la flama es la velocidad con -- que la flama viaja a través de la mezcla de gas-aire. Esta característica es importante en el diseño de quemadores a - gas, para evitar explosiones resultantes de la baja veloci-- dad en el nivel del combustible o ignición inestable resul-- tante de la alta velocidad el nivel del combustible.

La velocidad uniforme de la flama en una mezcla esta en función del porcentaje de gas combustible y del aire, así co-- mo de las condiciones específicas bajo las cuales se hacen - las determinaciones. La velocidad mínima de la flama se ob-- tiene con mezclas de bajo o alto límite. Según aumenta la - proporción de gas sobre el límite bajo de la mezcla, la velo-- cidad también aumenta gradualmente. Se alcanza un máximo en algún paso intermedio o velocidad máxima de la mezcla cuando existe una baja gradual hasta alcanzar nuevamente la veloci-- dad mínima en el límite máximo de la mezcla.

En la table 11-2 se muestran el límite menor, velocidad máxima y límites extremos de las mezclas inflamables de gases simples, junto con los grados de propagación de las flamas - correspondientes.

Approximate Limits of Inflammability and Rate of Flame Propagation  
of Simple Gases in Air

(At ordinary temperature and pressures — all in 1-in. diameter tube)

Gas	LOWER-LIMIT MIXTURE			MAXIMUM-SPEED MIXTURE		UPPER-LIMIT MIXTURE		
	Percent gas in "mixture"		Speed ft./sec.	Percent gas in mixt. "	Speed ft./sec "	Percent gas in "mixture "		Speed ft./sec
Carbon Monoxide CO	12.5	16.3	0.640	56.0	4.10	74.0	71.2	0.630
Hydrogen H <sub>2</sub>	4.1	6.2	0.526	35.5	15.90	74.0	71.4	—
Methane CH <sub>4</sub>	5.3	5.8	0.765	9.9	2.20	14.0	13.3	0.620
Ethane C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.2	3.3	0.594	6.3	2.60	12.5	10.6	0.610
Propane C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.4	2.4	0.692	4.7	2.69	9.5	7.3	0.605
Butane C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.9	1.9	0.660	3.7	2.71	8.5	6.5	0.605
Pentane C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	1.4	1.6	0.663	2.9	2.72	8.0	5.4	0.603
Ethylene C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3.3	3.4	0.732	7.1	4.65	—	14.1	0.655

\* U. S. Bureau of Mines Bulletin No. 279.

\*\* Payman and Associates: Journ. Chem. Soc. (1919, 1920 and 1922).

CONDICIONES PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE LA FLAMA

Temperatura

La temperatura se toma la del laboratorio (ambiental) -  
esta es de 21 grados centígrados.

Presión.

Las variaciones de la presión atmosférica se desprecian  
considerado, presión atmos. 1.033 kg/cm.

## Aire

El aire utilizado es considerado como saturado. La humedad en volumen es de 2.46%.

### Propagación de la flama Laminar en Tubos.

Cuando un gas explosivo es quemado dentro de un tubo, - el flujo inducido por la expansión térmica de la combustión del gas en la onda es restringido por la pared del tubo, consecuentemente el flujo atañe velocidades más altas que en - - bajo condiciones de expansión libre y la flama y el flujo comunmente se aumentan una a la otra por retroalimentación, como sigue: Turbulencia corriente, aún cuando la vista inicial puede producir una ondulación en la combustión de la superficie de la onda, incrementa la cantidad de gas quemado por - unidad de tiempo, el flujo del gas en el tubo; este entorno produce más turbulencia y de aquí que se incremente la ondulación y viseversa. Para que el progreso de la onda de comcombustión se convierta en no estable y tenga su propia aceleración, la aceleración resultante del flujo de los productos - combustibles produce pulsaciones de presión como estos pul--sos se propagan hacia el gas no quemado, éstos pueden unirse dentro de ondas de choque y producir un incremento de la detonación.



Además la discusión de estos efectos se reservan para - estudios posteriores.

Aquí notamos que bajo ciertas condiciones también es posible obtener flamas que sean (firmes) uniformes y laminares en tales circunstancias el tubo que contiene el gas explosivo es claramente de diámetros pequeños, aunque puede ser mas grande que el diámetro del quemador; si es cerrado en un final y el gas es prendido en el final abierto, analógicamente para el caso de flamas combustibles, tales flamas plantean - problemas de estabilidad y estructura. Discutiremos aquí es tos problemas con sus limitaciones por falta de información teórica y experimental de la materia.

Bajo las condiciones descritas, la onda se propaga desde el punto cerrado hasta el final abierto del tubo, más - - allá de la onda de gas no quemado contenido en la pared del tubo para que forme una columna estacionaria. La expansión térmica dentro de la onda genera un flujo continuo de gas - quemado hacia la abertura, poseyendo un arrastre viscoso, el flujo es retardado en la pared del tubo y acelerado en el - centro, del tubo. La aceleración final produce una transición la cual empuja el gas no quemado dentro de la región - central del tubo hacia el final cerrado, siendo que el gas -

no puede escapar ahí está esforzado a regresarse, su dirección para que el flujo siga un patron curvo desde el centro y hacia el final abierto.

La fig. No. 6 muestra esquemáticamente el flujo del gas enfrente de y junto a la onda de combustión como si se diera una observación instantanea y estacionaria.



Las líneas punteadas en la fig. marcan los protones de varias partículas y las flechas representan las velocidades de las partículas. Está visto que cerca del centro la onda es conducida hacia el final cerrado y cerca de la pared es conducida hacia el final abierto. La superficie de la onda además se convierte en curva como se demuestra, la formación de ondas curvas de este tipo que es confirmado por observaciones casuales visuales de ondas de combustión luminosas en tubos, han sido estudiadas fotográficamente.

## REFERENCIAS

- 1.- De Lorenzi Otto  
combustion engineering inc.  
pags. 11. 3 - 11. 5.
- 2.- Williams y Wilkins  
combustion and flames .  
pags. 290-294
- 3.- B. Lewis y G. Von Elbe  
combustion, flames and explisions of gases  
p.p. 317 F.F. academic pres. (1959)
- 4.- Francis Otto  
los combustibles y su tecnologia
- 5.- Howard J. B. Palmer  
combustion tenchology.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

**IV**

**R E S U L T A D O S   Y   C O N C L U S I O N E S**

El presente trabajo fué realizado para un diámetro de tubo constante.

La discusión de resultados esta relacionada con la publicación ASME.

En un espacio no confinado, mezclas de combustibles y oxígeno arden bastante bien dentro de límites definidos. Según aumenta el grado de confinamiento, estos límites se hacen más delgados hasta que no se limiten un diámetro, bajo el cual la mezcla no ardera, generalmente si la incineración ocurre dentro del tubo, se le llamara a éstos, límites de estabilidad.

El apagado de la flama o falla en incinerar, se puede deber a la pérdida de calor (por conducción, convección o radiación de la zona de la flama) o a choques de terceros cuerpos en la superficie de la pared la cual mitiga efectivamente la cadena que inicia y/o extiende las reacciones.

En el caso de una flama no confinada, la razón principal de extinción se debe probablemente a la pérdida de radiación. Para este tipo de flama cerca de los límites, la temperatura correspondiente al punto máximo de reacción es cercano a la temperatura adiabática de la flama y por lo tanto

una pérdida de calor relativamente pequeña ocasionará la extinción. La mayoría de las mezclas de hidrocarbón/aire los límites no confinados se aproximan a 0.5 (límite débil) y a 2.0 (límite rico) en condiciones ambientales. En estas condiciones (la temperatura del aire 300 grados kelvin) se puede mostrar que la flama adiabática alcanza temperaturas de 1500 grados K. y 1565 grados K. aproximadamente y que una pérdida calorífica de aprox. 3% puede producir la extinción de la flama.

Esta registrado que la región de esta temperatura - - - (1500-1600 K) representa la región de la temperatura en la cual la mayoría de las flamas de hidrocarbón son extinguidas. Para que una llama sufra una pérdida de calor mayor, la temperatura de la flama adiabática debiera ser mayor, por lo consiguiente los límites serán mas delgados dentro de los tubos de diferente diámetro, el grado de pérdida calorífica de una flama se deberá al diámetro, con pérdida relativamente mayor ocurriendo en los tubos de menor diámetro.

## CONCLUSIONES

Un aparato ha sido desarrollado para la adecuada medición del nivel de propagación de la flama en tubos de diferentes diámetros. Los límites de combustión pueden también determinarse utilizando este equipo. De los niveles de propagación de la flama, la velocidad laminar de la flama se ha calculado utilizando  $V_t$  Vs  $d$  y la extrapolación del diámetro en el cual ocurre la extensión de la flama, a estas alturas el valor de  $V_t$  corresponde a  $S_u$ .

Para el determinado diámetro de un tubo, se ha establecido una relación entre el nivel de propagación de la flama y la correlación del parámetro  $d$  donde.

Al tener mas información disponible parecería que existe un potencial considerable de aplicaciones al diseño de turbinas de gas y componentes asociados.

V

REFERENCIAS



- Combustion Chemistry
- Combustion Technology. Howard d. B. Palmer
- Combustion Aerodynamics Peter Chigier.
- Limites de flamabilidad de gases y vapores por  
H. F. Coward y G. W. Jones
- Manual selmec 1982
- Modelling of gas turbine combustor. U. Kretschmer  
Y J. Uuyers.
- Combustion, flames and explosion of gases.  
B. Lewis y G. Von Elbe.
- La produccion de la energia mediante el vapor de agua,  
el aire y los gases W. H. severns 1961
- Publicación ASME. 1979 The Experimental behaviour of  
Premixed flames in tubes-The effects of Diluent gases  
J. Odgers I. White U. Kretschmer
- Combustion engineering inc. de Lorenzo Otto.
- Los combustibles y su tecnologia Francis Wilfrid.
- Company Cleveland Wort American Manufacturing.
- Project Squid workshop on combustion measurements  
On combustion