



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIOS DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LA
LLAMA EN COMBUSTIBLES LIQUIDOS INMISCIBLES EN
AGUA.

T E S I S

Que para obtener el Titulo de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P r e s e n t a

CARLOS FLORES GALLARDO

Director: Dr. César Treviño T.

Asesor: Dr. Mihir Sen M.

México, D. F.

1984



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.

I N D I C E

	Página
SIMBOLOGIA	
SINOPSIS	
Capítulo 1. INTRODUCCION	1
Capítulo 2. INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LA PROPAGACION DE LA LLAMA EN FASE LIQUIDA SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES.	6
2.1 Concepto de Punto de Inflamación	7
2.2 Factores Físicos que Influyen en la Propagación de la Llama	9
2.3 Modelo Teórico de un Mecanismo factible de Propagación en Fase Líquida	11
2.4 Interpretación Física del Modelo Teórico	28
2.5 Condiciones a que Puede Estar Sujeto el Modelo Presentado	31
2.6 Factores Geométricos que Influyen en la Propagación de la Llama	31
2.7 El Fenomeno de Pulsación de la Llama Frontal	35
Capítulo 3. ACONDICIONAMIENTO E INSTRUMENTACION DESARROLLADOS PARA LA EXPERIMENTACION	39
3.1 Técnicas Empleadas en Estudios Semejantes	39
3.1a Detección de Fotomultiplicadores	39
3.1b Métodos de Cronometraje, Filmación y Contador Electrónico	41
3.2 Sistemas Creados para el Estudio Experimental	43
3.2a Sistema de Apoyo para la Experimentación	43
3.2b Sistema de Detección y Medición de la Velocidad del Frente de la Llama	48
3.2c Sistema de Medición de Condiciones Iniciales, Control y Calibración de Equipos	56
3.2d Sistema de Medición de Incrementos de la Temperatura en Puntos Fijos de Combustible y Medio Ambiente	58
3.3 Respuesta y Calibración de Equipos	60
3.4 Distribución de Equipos e Instrumentos	62
Capítulo 4. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PROPAGACION DE LA LLAMA	64
4.1 Objetivo de la Experimentación	64

	Página	
4.2	Introducción al Estudio Experimental	64
4.3	Fases de la Experimentación	65
4.4	Desarrollo de Pruebas Cuántitativas	66
4.4a	Medición de la Velocidad de Propagación de la Llama en Función del Espesor de Combustible	69
4.4b	Variación de la Temperatura en un Punto Fijo del Combustible y Medio Ambiente	74
4.5	Desarrollo de Pruebas Cualitativas	75
4.5a	El Fenomeno de las Microexplosiones	76
4.5b	El Fenomeno de Pulsación de la Llama Frontal	78
4.5c	Movimientos que Presenta el Combustible Bajo Diferentes Condiciones de Libertad de Flujo al Combustible y al Fuego	78
Capítulo 5.	RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL	80
5.1	Introducción	80
5.2	Resultados	81
5.2a	Velocidad de Propagación de la Llama en Función del Espesor de Combustible	81
5.2b	Incremento de la Temperatura en las Fases Gas y Líquida en un Punto Fijo	89
5.2c	El Fenomeno de las Microexplosiones	95
5.2d	El Fenomeno de Pulsación de la Llama Frontal	97
5.2e	Movimientos que Presenta el Combustible bajo Diferentes Condiciones de Libertad de Flujo al Combustible y al Fuego	99
5.3	Conclusiones	103
5.4	Recomendaciones	106
Apéndice A	PROPIEDADES DEL DIESEL	112
Apéndice B	PROPIEDADES DEL ACEITE 35° API	113

S I M B O L O G I A

B:	Medida de área
e:	Medida de longitud o espesor
f.e.:	Factor de escala de velocidad de grabación/velocidad de reproducción
g:	Campo de gravedad
\bar{h} :	Espesor característico o medida de profundidad
Δh :	Diferencia de entalpías por unidad de masa
N.V.R.:	Nivel de voltaje de referencia
\bar{p} :	Presión local
p:	Presión local adimensional
T_i :	Temperatura de ignición
u.v.:	Componentes horizontal y vertical de la velocidad del fluido en forma adimensional
\bar{U} :	Velocidad característica del fluido
V:	Rapidez de propagación de la llama
ψ :	Volumen
w:	Velocidad de la cinta de grabación
$\Delta \bar{x}$:	Distancia característica
$\bar{\sigma}$:	Tensión superficial
σ :	Tensión superficial adimensional
ρ :	Densidad
α :	Difusividad térmica
ν :	Viscosidad cinemática
ζ :	Altura local de la superficie de combustible
ζ_x :	Variación de la altura local de la superficie de combustible
ψ :	Incremento de tiempo

S I N O P S I S

Durante la propagación de la llama en combustibles líquidos in miscibles con agua en superficies horizontales, se presentan fenómenos muy interesantes como el proceso acelerativo de la llama fron-- tal, y por otro lado, en la región de llama difusiva desarrollada se tienen situaciones de microexplosiones explicadas en términos de nucleación en la interfase agua/combustible, también es posible ob-- servar la existencia de un fuerte cortante en la superficie del -- combustible.

Es pues, la intención de éste trabajo realizar un estudio de los fenómenos anteriormente mencionados, por medio, de pruebas de observación y pruebas de medición en modelos experimentales adecua-- dos, todo esto enmarcado en un análisis a partir de la mecánica de los fluidos y la transferencia de calor.

I N T R O D U C C I O N

Los combustibles empleados en la mayoría de los procesos de generación de energía son principalmente sustancias orgánicas que -- pueden dividirse en tres clases naturales que son: combustibles sólidos, líquidos y gaseosos.

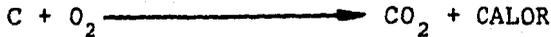
Los combustibles líquidos pueden dividirse en dos clases principales basados en su utilización a saber:

- a) Combustibles ligeros. Adecuados para motores de combustión interna y motores de propulsión.
- b) Combustibles pesados. Empleados principal o exclusivamente para combustión en hornos.

Algunas propiedades importantes de los combustibles desde el punto de vista de la mecánica de fluidos y la transferencia de calor son la viscosidad, densidad, tensión superficial, así como la temperatura de inflamación y la temperatura de combustión o "fire point".

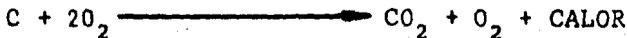
Se hace cita a las propiedades anteriores de los combustibles debido a que en éste estudio de propagación de llama en combustibles líquidos inmiscibles en agua en lechos horizontales, son sin duda propiedades importantes que nos ayudan a comprender el fenómeno y los procesos que involucran transferencia de masa y energía necesarios para la propagación de la llama a temperaturas inferiores a la de inflamación de los mismos.

Cabe recordar que la combustión es la combinación de oxígeno con un combustible resultando de esta un desprendimiento de energía calorífica, tomemos por ejemplo la siguiente reacción:



La combustión perfecta se obtiene del mezclado y quemado de la cantidad exacta en las proporciones de combustible y oxígeno de tal forma que no queda ni residuo no quemado ni oxígeno libre.

Cuando se suministra mucho aire decimos que la mezcla es pobre y el fuego es oxidante lo que resulta en una llama que tiende a ser corta y clara, en la cual el exceso de oxígeno (el que no reacciona) no forma parte en el proceso, es decir:



Por otro lado si se suministra mucho combustible decimos que la mezcla es rica obteniéndose en la combustión una llama reductora que se caracteriza por ser larga y con humo, a esto se le llama usualmente combustión incompleta.

Una característica fundamental de la combustión es la formación de las llamas, ya que es la zona en la que ocurre la reacción de la combustión siendo en cierta medida una fuente radiativa.

Hasta aquí se ha comentado en forma sencilla el vínculo que hay entre los combustibles y la combustión, sin embargo es oportuno decir ahora que la intención de este estudio es dar respuesta a cuestiones relacionadas con los procesos que engloban el fenómeno de la combustión para combustibles líquidos a temperaturas menores al punto de inflamación de los mismos, observando o fijando la atención fundamentalmente al aspecto de la propagación de la llama.

En años recientes se han publicado trabajos concernientes a la propagación del fuego para combustibles líquidos con el fin de estimar una serie de parámetros como el espesor de combustible mínimo capaz de permitir la propagación de la llama, esto con el fin de poder ser aplicado al control de la contaminación del mar por derrames de petróleo, la intención es quemar "in situ" a la fracción del mismo no recuperable por costo excesivo y económicamente no justificable (aunque ecológicamente no hay desde mi punto de vista justificación alguna). Debe entenderse que el volumen a quemar es el mínimo capaz de sustentar la combustión.

Dada la condición de volumen mínimo podemos pensar en espesores de combustible sumamente pequeños, el objetivo de este procedimiento es evitar que el charco de aceite se siga dispersando en el mar y llegue a contaminar playas y costas, etc.

Por otro lado conocer la velocidad de propagación de la llama a temperatura ambiente y presión atmosférica para algunos combustibles es un dato importante en la prevención y factibilidad de combatir algún siniestro en condiciones parecidas a las aquí estudiadas.

Es oportuno decir que una vez trazada la estrategia del estudio experimental, al iniciar los experimentos se suscitaron una serie de fenómenos no esperados, y que a pesar de ello no podían dejarse pasar por alto sin ser registrados, ya que además pueden resultar indicativos y en alguna medida normativos para la configuración de un modelo experimental creado con el fin de comprobar un modelo teórico específico.

Una vez comentado lo anterior y por tales razones el trabajo comprende una primera parte que trata acerca de bases teóricas y conceptos fundamentales requeridos para este estudio, ejemplificando también con un modelo teórico ^(ref 1) un posible mecanismo de propagación de fuego.

La segunda parte consiste de las técnicas de medición empleadas en estudios semejantes, así como la infraestructura propia de este trabajo que ha sido dividida en diferentes sistemas concatenados con el fin de obtener los mejores resultados en la investigación aplicada.

El siguiente capítulo comprende el estudio experimental de la propagación de la llama propiamente, en el cual se delimitan las

pruebas experimentales en dos grupos básicos definidos como pruebas cuantitativas y pruebas cualitativas, ambas serán de utilidad en la obtención de resultados y conclusiones.

Un capítulo más comprende la obtención de resultados, conclusiones y criterios generados a partir del análisis de la información obtenida, entendiéndose por criterios no solamente a los propios o explícitos sino también a aquellos que ligados implícitamente al fenómeno estudiado nos pueden aportar razonamientos de utilidad funcional.

Se anexan una serie de ideas sobre mejoras en ambientación que comprende desde mejoras en instrumentación, así como el equipo de separación de mezcla para la recuperación del combustible no quemado, e ideas adicionales.

Finalmente un factor importante es poder iniciar este tipo de estudios, los cuales con el paso del tiempo seguramente serán de mayor complejidad y por ende altamente apegados a condiciones reales y de mayor utilidad tecnológica en el desarrollo de métodos en tópicos afines a este campo.

CAPITULO 2

INTRODUCCION AL ESTUDIO DE LA PROPAGACION DE LA LLAMA EN FASE LIQUIDA SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES.

En la propagación de la llama en combustibles líquidos pueden prevalecer dos mecanismos que son la fase líquida y la fase de gas.

Cuando la temperatura del combustible es mayor a la del punto de inflamación del mismo, existe una mezcla de combustible y aire sobre la superficie del líquido y después de la ignición la llama se propaga a través de la mezcla combustible paralela a la superficie en una forma similar a una llama laminar, en este caso es el mecanismo en fase de gas el que controla el fenómeno de propagación del fuego.

El otro caso corresponde a la situación en que la temperatura inicial del combustible es menor a la de inflamación, en esta situación la llama debe calentar continuamente el líquido que se encuentra inmediatamente de la llama frontal. Es por esto que decimos que el mecanismo queda controlado por la fase líquida y la transferencia de calor es por conducción, convección y radiación.

Los combustibles líquidos cuya temperatura es menor a la del punto de inflamación tendrán velocidades de propagación menores al de llama laminar, debido a que el combustible que se encuentra delante de la llama debe calentarse por lo menos hasta el punto de inflamación.

2.1 CONCEPTO DE PUNTO DE INFLAMACION

El punto de inflamación es la temperatura a que debe calentarse un combustible en un instrumento normalizado para producir una mezcla inflamable con el aire. El aparato Pensky-Martén es un instrumento inglés para puntos de inflamación superiores a 49°C , y el aparato Abel se emplea para combustibles más volátiles con puntos de inflamación inferiores a 49°C .

En todos los estudios realizados sobre la propagación de la llama en combustibles líquidos se coincide en la importancia de la temperatura en el combustible al iniciarse la combustión, es por ello que a continuación se da una breve explicación de la forma en que se determina la temperatura de inflamación del combustible o "flash-point".

i) Ensayo en vaso cerrado Pensky-Martén. Este aparato está formado por un vaso de latón montado en un baño de aire y calentado por una llama de gas, un agitador de tipo hélice movido por un eje flexible se introduce desde el centro de la tapa en el vaso. La tapa tiene cuatro aberturas, una para el termómetro y las restantes provistas de obturadores deslizantes para la introducción de la llama piloto y para la ventilación, como se muestra en la figura 2.1.

La temperatura del combustible contenido en el vaso se eleva a 5°C o 6°C por minuto. El agitador se hace girar a unas 60 rpm, cuando la temperatura ha llegado a unos 15°C del punto de inflamación

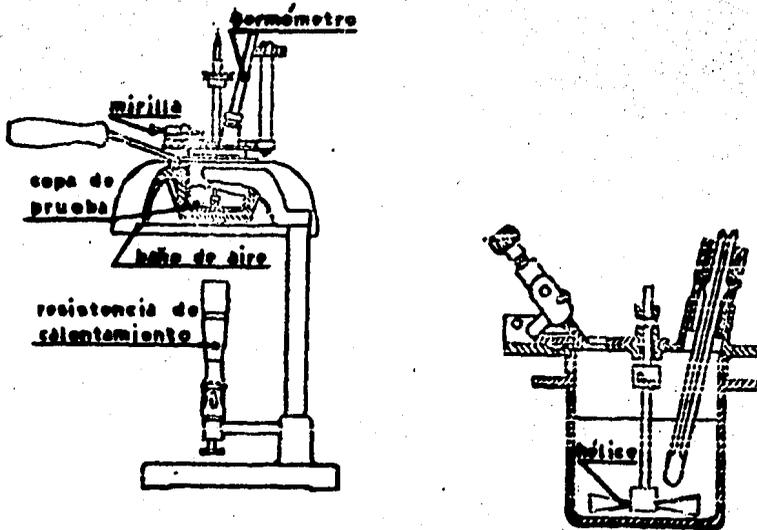


Fig 2.1 APARATO DE PENSKY MARTEN Y COPA DE PRUEBAS

esperado se introduce la llama piloto en los vapores de combustible durante dos segundos por cada grado de aumento de la temperatura.

El punto o temperatura de inflamación es la temperatura a la cual se observa un resplandor claro cuando la llama piloto incide sobre los vapores contenidos en el vaso.

Existe también el análisis para punto de inflamación abierto, éste puede determinarse después del punto de inflamación cerrado retirando la tapa y continuando el calentamiento hasta que se produzca un resplandor claro a través de la superficie contenida en el vaso abierto.

ii) Ensayo en vaso cerrado Abel. El aparato Abel esta formado por un vaso de latón cerrado, rodeado por un pequeño baño de agua que se sumerge en un segundo vaso con agua. La tapa del vaso de latón es tá dispuesta de un modo similar a la del aparato Pensky-Martén. Para combustibles con punto de inflamación inferior a 32°C el baño exterior se llena con agua a 55°C y no se calienta más. A continuación se introduce en el vaso el combustible a ensayar, cuando la temperatura al canza 19°C se introduce la llama por cada 0.5°C hasta que se observa el relampago.

Para combustibles con punto de inflamación superior a 32°C pero inferior a 49°C el baño de agua inferior se llena con agua fría y se calienta a la velocidad de 1°C por minuto, obteniéndose el punto de inflamación como en el caso anterior.

2.2 FACTORES FISICOS QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACION DE LA LLAMA.

Es indudable que la velocidad de propagación del frente de la llama debe depender de las condiciones iniciales de temperatura, viscosidad, tensión superficial, espesor de combustible, así como de la transferencia de calor ya sea considerando el área de transferencia de calor o la conductividad térmica del combustible entre otros parámetros.

Por ejemplo, la viscosidad como una característica de la resistencia interna a fluir por parte del líquido nos hace suponer que un combustible con alta viscosidad se aproxima al estado sólido y no flu ye fácilmente.

O bien la tensión superficial que a temperaturas en la zona de combustión decrece hasta un valor cero en el punto de ebullición del combustible, pudiendo originar un flujo convectivo natural inducido por un gradiente de temperatura a través de la superficie de combustible.

Por lo que respecta a la transferencia de calor existen esencialmente tres formas que son conducción convección y radiación.

El calor se transmite por conducción de una molécula a otra de la misma substancia de tal manera que se logra una mayor o menor conducción de calor dependiendo de la facilidad del combustible para permitir flujo de calor.

En la convección el proceso es realmente una combinación de conducción y movimiento de partículas del fluido. Si el movimiento del fluido se debe a efectos de gravedad o bien de temperatura el proceso es por convección libre o natural.

La radiación es un modo completamente diferente a los ya mencionados, así, la luz es una forma de calor radiado, pero no todo calor radiado es necesariamente luz. El calor radiado viaja en líneas rectas y puede pasar a través de aire, vacío, algunos gases, algunos líquidos y pocos sólidos como vidrio y cuarzo.

Puede afectar a la cantidad de calor transferido:

El área de transferencia de calor, ya que la cantidad de flujo de la fuente al pozo de calor es directamente proporcional al área de flujo.

La conductividad térmica es la habilidad de una sustancia para conducir calor, en los líquidos la conductividad es uno de los factores que afectan la proporción de convección, y la transferencia por conducción no resulta tan relevante como la convección.

2.3 MODELO TEORICO DE UN MECANISMO FACTIBLE DE PROPAGACION EN FASE LIQUIDA. (ref. 1)

A continuación y como un ejemplo propuesto de un mecanismo factible de propagación se presenta el siguiente modelo, el cual queda controlado por la fase líquida debido a que la temperatura inicial del combustible es menor a la de inflamación del mismo.

El modelo que se presenta considera espesores finos de combustible, y el fenómeno en fase de gas así como la energía transferida del gas y el líquido son ignorados.

En la figura 2.2 se muestra el modelo que se analiza, el factor crítico en el mecanismo propuesto de propagación es una variación en la tensión superficial causada por un gradiente en la temperatura de la superficie originada por la propagación de la llama, lo

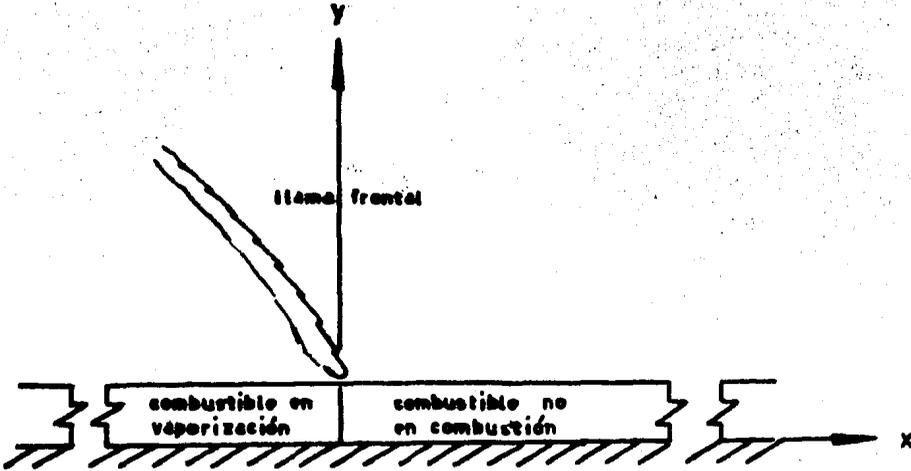


Fig 2.2 MODELO DE PROPAGACION DE FUEGO EN COMBUSTIBLES LIQUIDOS

cual produce una transferencia de calor por convección que resulta ser de un orden mayor a la transferencia por conducción y radiación.

En la superficie del líquido los esfuerzos que resultan de la variación en la tensión superficial son balanceados por los esfuerzos cortantes viscosos, esto es:

$$\mu \frac{\partial \bar{U}}{\partial Y} = \frac{d\bar{\sigma}}{dx} \equiv \bar{\sigma}_x \quad \text{----- (5),}$$

en donde $\bar{\sigma}$: tensión superficial.
 μ : viscosidad
 \bar{U} : velocidad horizontal,

Si \bar{h} es la dimensión característica de la capa viscosa, de acuerdo con la ecuación (5) la velocidad característica del fluido es:

$$\bar{U} = 0 \left[\frac{\bar{\sigma}_a \bar{h}}{\mu} \right] \text{----- (6),}$$

ya que:

$$\frac{\partial u}{\partial \bar{y}} = 0 \left(\frac{\bar{U}}{\bar{h}} \right)$$

La ecuación (6) nos indica el orden de magnitud de la velocidad característica del fluido por la variación en la tensión superficial.

Si hacemos de una forma semejante una estimación de las magnitudes relativas a la transferencia de energía por convección y la correspondiente a la conducción, ambas a través del líquido equivale a comparar:

$$\bar{U} \frac{d \bar{T}}{d \bar{x}} \quad \text{y} \quad \alpha \frac{d^2 \bar{T}}{d \bar{x}^2}$$

y considerando que la velocidad del fluido es pequeña, podemos obtener un número de Peclet a través de la longitud característica $\Delta \bar{x}$ que es:

$$Pe = \frac{\bar{U} \Delta \bar{x}}{\alpha} \text{----- (7),}$$

llevando (6) a (7) se tiene que:

$$\frac{U \Delta \bar{x}}{\alpha} = 0 \left[\frac{\bar{h} \sigma_x \Delta \bar{x}}{\mu \alpha} \right] \text{----- (8),}$$

pero como en la dirección horizontal se ha supuesto que la transferencia de calor por convección es mucho mayor que la correspondiente a la conducción, es decir;

$$\frac{\bar{h} \Delta \bar{x} \sigma_x}{\mu \alpha} > > 1 \text{----- (9),}$$

entonces:

$$\frac{\text{calor vertical por conducción}}{\text{calor horizontal por conducción}} = 0 \left[\frac{\Delta \bar{x}}{\bar{h}} \right]^2$$

O sea que el calor vertical por conducción es balanceado por el calor transferido horizontalmente por convección, esto implica que:

$$\frac{\text{conducción vertical}}{\text{conducción horizontal}} = 0 \left[\frac{\text{convección horizontal}}{\text{conducción horizontal}} \right]$$

es decir:

$$\left(\frac{\Delta \bar{x}}{\bar{h}} \right)^2 = 0 \left[\frac{\bar{h} \sigma_x \Delta \bar{x}}{\mu \alpha} \right]$$

tal que:

$$\frac{\Delta \bar{x}}{\bar{h}} = 0 \left[\frac{\bar{h}^2 \sigma_x}{\mu \alpha} \right]$$

como $\frac{\Delta \bar{x}}{h} \gg 1$, entonces la convección horizontal puede ser un mecanismo importante de transferencia de calor.

Una vez establecido lo anterior procedemos a analizar el problema hidrodinámico solamente, fijando el marco de referencia a la fuente de calor que avanza analizamos el problema en estado estable.

En el problema de interés hay cuatro fuerzas importantes que son gravitatorias, inerciales, viscosas y de tensión superficial por lo consiguiente es posible formar tres parámetros independientes. Sea el número de Reynolds, el número de Froude y el número $N_1 = \bar{h} \bar{\sigma}_x / \mu \bar{U} V$.

Para flujos causados por tensión superficial el orden de magnitud de la velocidad esta determinado por un balance entre las fuerzas de tensión superficial y las fuerzas viscosas en la superficie, por lo que $N_1 = 1$ en el caso considerado y sólo dos parámetros son de interés.

Las velocidades se adimensionalizan con la velocidad característica \bar{U} , el espacio de dimensiones por la profundidad del líquido en reposo y los esfuerzos en la superficie por el valor característico $\bar{\sigma}_x$. Bajo estas consideraciones procedemos a formular las ecuaciones de movimiento en forma adimensional.

Dichas ecuaciones son de continuidad, momentum vertical y horizontal, cuya adimensionalización se muestra a continuación.

$$u = \frac{\bar{u}}{\bar{U}}$$

$$v = \frac{\bar{v}}{\bar{U}}$$

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{h}}$$

$$y = \frac{\bar{y}}{\bar{h}}$$

$$p = \frac{\bar{p}}{\rho g \bar{h} N}$$

en donde u , v , y , x así como p son variables adimensionales, considerando el combustible como fluido newtoniano se obtiene;

CONTINUIDAD

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0 \quad \text{----- (10)}$$

haciendo las siguientes substituciones $\bar{u} = u\bar{U}$, $\bar{v} = v\bar{U}$, $\bar{x} = x\bar{h}$
 $\bar{y} = y\bar{h}$, las parciales se transforman en

$$\frac{\partial(u\bar{U})}{\partial(x\bar{h})} + \frac{\partial(v\bar{U})}{\partial(y\bar{h})} = 0 \implies \frac{\bar{U}}{\bar{h}} \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] = 0$$

por lo que la ecuación adimensional de continuidad es

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{----- (10a)}$$

MOMENTUM HORIZONTAL:

$$-\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) = \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad \text{----- (11),}$$

la adimensionalización de las parciales se escribe a continuación:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} &= \rho g N_1 \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} &= \frac{\bar{U}}{h^2} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} &= \frac{\bar{U}}{h^2} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ u \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} &= \frac{\bar{U}^2}{h} u \frac{\partial u}{\partial x} \\ v \frac{\partial u}{\partial y} &= \frac{\bar{U}^2}{h} v \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \right\} \text{----- (11a)}$$

substituyendo (11a) en (11) se obtiene,

$$-\rho g N_1 \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\rho \bar{U}}{h^2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{\rho \bar{U}^2}{h} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

despejando el laplaciano.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \text{Re} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\rho g h^2}{\mu \bar{U}} N_1 \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{----- (11b)}$$

el segundo término del lado derecho de la ecuación (11b) representa el parámetro adimensional N , ya que éste ha sido definido como

$N = (Re/Fr)N_1$ pero $N_1 = 1$ entonces $N = Re/Fr$, y la ecuación (11b) puede escribirse como:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = Re \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + N \frac{\partial p}{\partial x} \quad \text{----- (11c)}$$

MOMENTUM VERTICAL.

Considerando la fuerza de cuerpo debida a la gravedad se tiene,

$$-\rho g - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + u \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = \rho \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) \quad \text{----- (12)}$$

procediendo de una manera análoga a las ecuaciones (11a) se tiene la expresión adimensional correspondiente a la ecuación (12) que es,

$$-\rho g - \rho g N_1 \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\rho \bar{u}}{h^2} \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) = \frac{\rho \bar{u}^2}{h^2} \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)$$

despejando el laplaciano,

$$\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} = \frac{\rho g h^2}{\mu \bar{u}} + \frac{\rho g h^2}{\mu \bar{u}} N_1 \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\rho \bar{u} h}{\mu} \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)$$

ordenando y considerando que $N = Re/Fr$ se tiene finalmente que,

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = N + N \frac{\partial p}{\partial y} + Re \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad \text{----- (12a)}$$

NOTA: La ecuación de energía esta indirectamente ligada a las anteriores si consideramos que la tensión superficial depende de la temperatura.

Toca ahora determinar las condiciones de frontera:

Sea $\zeta(x)$ la altura local del volumen de combustible, y si

$$\frac{d\zeta(x)}{dx} \ll 1$$

las condiciones de frontera serán,

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \sigma_x \quad \text{en} \quad y = \zeta(x) \quad \text{----- (13)}$$

detallando, la ecuación (13) se obtiene a partir del siguiente desarrollo:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \frac{\bar{U}}{\bar{h}} \frac{\partial u}{\partial y} \quad \text{----- (13a)}$$

llevando (13a) a la ecuación (5) se tiene que

$$\frac{\mu \bar{U}}{\bar{h}} \frac{\partial u}{\partial y} = \bar{\sigma}_x \cdot \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\bar{\sigma}_x}{\frac{\mu \bar{U}}{\bar{h}}} = \sigma_x$$

obteniéndose de esta forma (13).

También y debido a que $\frac{d\zeta}{dx}$ es muy pequeño el cortante en la superficie actúa en la dirección x.

La superficie sólida en el fondo del volumen de combustible se mueve con respecto al marco de referencia fijo a la llama.

Si V es el valor absoluto de la velocidad de propagación de la llama y considerando positivo el sentido de propagación la condición de no deslizamiento implica que,

$$u = -V \quad \text{en} \quad y = 0 \quad (\text{fondo del vol})$$

En el problema de interés práctico la fuerza de gravedad es mayor que la fuerza viscosa, es decir $N \gg 1$.

Considerando despreciable la componente vertical de la velocidad la ecuación de momentum vertical (12a) se transforma en

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -1$$

cuya solución es

$$p = p_0 + \zeta(x) - \gamma y \quad \text{----- (14a)}$$

en donde p_0 es la presión en la superficie y puede ser considerada igual a la presión ambiente adimensional. De (14a) se sigue que,

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \zeta(x)}{\partial x} = \zeta_x$$

con lo que la ecuación de momentum horizontal (11a) se transforma en

$$\text{Re} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + N \zeta_x = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad \text{----- (15)}$$

También en la superficie podemos considerar que $\frac{v}{u} = 0$ (ζ_x), y como sucede esto podemos esperar que $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$ ($u \zeta_x$).

Si $\frac{\partial v}{\partial y} = 0$ ($u \zeta_x$) entonces de la ecuación de conservación (10) se concluye que $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$ ($u \zeta_x$).

Considerando a la velocidad adimensional u del orden de la unidad, y la velocidad v despreciable, los términos inerciales del lado izquierdo de la ecuación (15) son del orden de $\text{Re} \zeta_x$. Para flujos

con número de Reynolds bajo estos términos son despreciables comparados con el tercero.

También y debido a que el esfuerzo cortante es sumamente mayor que el esfuerzo viscoso normal $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ es despreciable comparado con $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$, con esto la ecuación (15) queda de la siguiente manera,

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = N\zeta_x \quad \text{----- (16)}$$

La relación (16) representa un balance entre las fuerzas viscosas y las fuerzas de presión.

La solución de la ecuación (16) es encontrada a partir del siguiente procedimiento.

$\frac{\partial u}{\partial y} = N\zeta_x y + C_1$, pero para $y = \zeta(x) = \zeta$, se tiene la condición de la ecuación (13), por lo que obtenemos

$$\sigma_x = N\zeta_x \zeta + C_1,$$

de donde $C_1 = \sigma_x - N\zeta_x \zeta$, y $\frac{\partial u}{\partial y} = N\zeta_x y + \sigma_x - N\zeta_x \zeta$, obteniéndose la ecuación correspondiente a $u(x,y)$ que es,

$$u = N\zeta_x y \left(\frac{y}{2} - \zeta \right) + \sigma_x y - V \quad \text{----- (17)}$$

para obtener (17) se hace uso de la condición $u = -V$ en $y = 0$.

En la evaluación de la velocidad y la presión en las ecuaciones (17) y (14a) es necesario determinar $\zeta(x)$.

Considerando el fenómeno estable y la cantidad de vaporización despreciable comparada con la velocidad u , podemos suponer que no hay cambios en el flujo de masa con la posición x . Es decir que la porción superior del líquido se mueve en la dirección de la propagación de la llama, y la porción inferior se mueve en la dirección opuesta de tal forma que la cantidad de flujo a través de la sección de cruce es invariante con la posición x .

Ademas se tiene que $\zeta(\infty) = 1$, esto sucede cuando el líquido está en reposo en el caso en particular, matemáticamente se tiene

$$\int_0^{\zeta} u \, dy = -V\zeta(\infty) \text{ pero } \zeta(\infty) = 1 ,$$

por lo tanto $\int_0^{\zeta} u \, dy = -V$, introduciendo la expresión (17) en la integral se obtiene

$$-\frac{1}{3} N\zeta_x \zeta^3 + \frac{1}{2} \sigma_x \zeta^2 - V = -V\zeta, \text{ se sigue que}$$

$$\frac{N\zeta_x \zeta}{3} = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{V(1-\zeta)}{\zeta^2}$$

----- (18).

Considerando a (18) como una ecuación diferencial ordinaria en x , podemos aplicar la siguiente serie como solución y debido a que $\frac{1}{N}$ es sumamente pequeño la serie propuesta es

$$\begin{aligned}\zeta(x) &= \zeta_0(x) + \frac{1}{N} \zeta_1(x) + \frac{1}{N^2} \zeta_2(x) + \dots \\ &= \zeta_0 + \frac{1}{N} \zeta_1 + \frac{1}{N^2} \zeta_2 + \dots\end{aligned}\quad \text{----- (19)}$$

derivando (19) se obtiene,

$$\frac{d\zeta(x)}{dx} = \zeta_0'(x) + \frac{1}{N} \zeta_1'(x) + \frac{1}{N^2} \zeta_2'(x) + \dots$$

$$\zeta_x = \zeta_{0x} + \frac{1}{N} \zeta_{1x} + \frac{1}{N^2} \zeta_{2x} + \dots$$

Por lo que

$$\zeta_x \zeta = \left(\zeta_{0x} + \frac{1}{N} \zeta_{1x} + \frac{1}{N^2} \zeta_{2x} + \dots \right) \left(\zeta_0 + \frac{1}{N} \zeta_1 + \frac{1}{N^2} \zeta_2 + \dots \right)$$

desarrollando y separando en potencias de N se tiene

$$\zeta_x \zeta = \zeta_{0x} \zeta_0 + \frac{1}{N} \left[\zeta_{0x} \zeta_1 + \zeta_{1x} \zeta_0 \right] + \frac{1}{N^2} \left[\zeta_{0x} \zeta_2 + \zeta_{1x} \zeta_1 + \zeta_{2x} \zeta_0 \right] + \dots \quad (20)$$

Dividiendo (18) entre N se tiene

$$\frac{\zeta_x \zeta}{3} = \frac{1}{N} \left[\frac{\sigma_x}{2} + \frac{V(1-\zeta)}{\zeta^2} \right] \quad \text{----- (21),}$$

comparando (19) con (20) se observa que $\zeta_{0x} \zeta_0 = 0$, por lo que $\zeta_{0x} = 0$ y (19) se convierte en :

$$\zeta_x \zeta = \frac{1}{N} \left[\zeta_{1x} \zeta_0 \right] + \frac{1}{N^2} \left[\zeta_{1x} \zeta_1 + \zeta_{2x} \zeta_0 \right] + \dots \quad \text{----- (22)}$$

llevando (20) a (21) se tiene que

$$\frac{\zeta_0 \zeta_{1x}}{3} = \frac{\sigma_x}{2} + \frac{V(1-\zeta_0)}{\zeta_0^2} \quad \text{----- (22a)}$$

$$\frac{\zeta_{1x} \zeta_1 + \zeta_{2x} \zeta_0}{3} = V \left(\frac{\zeta_1}{\zeta_0^2} - \frac{2\zeta_1}{\zeta_0^3} \right) \quad \text{----- (22b)}$$

Dado que la condición de frontera de la ecuación diferencial de primer orden es

$\zeta(\infty) = 1$, se sigue que

$$\zeta_0(\infty) = 1 \quad \text{y} \quad \zeta_1(\infty) = \zeta_2(\infty) = 0.$$

Con lo que se puede encontrar la solución a la ecuación (22a), con ζ_0 constante, tal que $\zeta_0^{(\infty)} = 1$, por lo que (22a) se convierte en

$\zeta_{1x} = \frac{3}{2} \sigma_x$, lo que integrado desde ∞ hasta x queda como

$$\zeta_1(x) = \frac{3}{2} \Delta\sigma(x) = \frac{3}{2} [\sigma(x) - \sigma(\infty)] \quad \text{----- (23)}$$

y (22b) queda entonces de la siguiente forma

$$\zeta_{2x} = -\zeta_1 \zeta_{1x} - 3V\zeta_1 = -\frac{9}{4} \Delta\sigma(x) \sigma_x - \frac{9}{2} V\Delta\sigma(x)$$

cuya solución es

$$\zeta_2(x) = -\frac{9}{8} \Delta\sigma^2(x) - \frac{9}{2} V \int_{\infty}^x \Delta\sigma(x) dx \quad \text{----- (24)}$$

Combinando (19), (23) y (24) se obtiene

$$\zeta(x) = 1 + \frac{3}{2N} \Delta\sigma(x) - \frac{9}{8N^2} [\Delta\sigma(x)]^2 - \frac{9}{2N^2} V \int_{\infty}^x \Delta\sigma(x) dx + O\left(\frac{1}{N^3}\right) \quad \text{----- (25)}$$

substituyendo (25) en (14a) y despreciando términos de segundo orden en N se tiene que

$$P = P_0 + \left(1 + \frac{3}{2N} \Delta\sigma(x) - y\right) + O\left(\frac{1}{N^2}\right)$$

----- (26)

análogamente con (25) en (17), y despreciando términos de primer orden en N se tiene

$$u = N \left[\frac{3}{2N} \sigma_x y \left(\frac{y}{2} - 1 - \frac{3}{2N} \Delta\sigma(x)\right) \right] + \sigma_x y - V$$

$$u = \frac{3}{2} \sigma_x y \left(\frac{y}{2} - 1 - \frac{3}{2N} \Delta\sigma(x)\right) + \sigma_x y - V$$

por lo que,

$$u(x, y) = \left(\frac{3}{4} y^2 - \frac{1}{2} y\right) \sigma_x - V + O\left(\frac{1}{N}\right)$$

----- (27)

concluyendo de esta forma el análisis matemático.

2.4 INTERPRETACION FISICA DEL MODELO TEORICO.

Escribiendo nuevamente las ecuaciones (25), (26) y (27)

$$\zeta(x) = 1 + \frac{3}{2N} \Delta\sigma(x) - \frac{9}{8N^2} [\Delta\sigma(x)]^2 - \frac{9}{2N^2} v \int_{-\infty}^x \Delta\sigma(x) dx + 0 \left(\frac{1}{N^3}\right)$$

----- (25)

$$P = P_0 + \left(1 + \frac{3}{2N} \Delta\sigma(x) - y\right) + 0 \left(\frac{1}{N^2}\right)$$

----- (26)

$$u = \left(\frac{3}{4} y^2 - \frac{1}{2} y\right) \sigma_x - v + 0 \left(\frac{1}{N}\right)$$

----- (27)

podemos concluir que la altura superficial local del volumen de combustible se incrementa a medida que nos alejamos del frente de las llamas hacia la región que aún no se encuentra en combustión, es decir se forma una pendiente en la superficie del combustible.

También se puede apreciar en la ecuación (25) que la velocidad de propagación de fuego no afecta en primer orden dicha pendiente en la superficie.

Por otra parte, si el gradiente en la tensión superficial es lo suficientemente grande (y positivo) habrá convección del líquido cercano al frente de la llama y en la dirección de la propagación.

Es decir que si nos ubicásemos en algún punto lo suficientemente lejos del frente de la llama la tensión superficial es pequeña y la velocidad relativa del combustible va en la dirección opuesta a la propagación del fuego. Esto implica que existe un punto de estancamiento en alguna vecindad adelante de la llama, y el análisis realizado no es aplicable en el entorno de ese punto ya que ambas componentes de la velocidad tienden a ser del mismo orden

Observando la ecuación (26), es posible pensar que la variación en la presión es debida a efectos hidrostáticos, pues disminuye la densidad del combustible en la zona del frente de la llama, esto se puede apreciar en el siguiente cálculo.

Para:

$$P = P(0, \zeta) \quad \text{se tiene} \quad P = P_0$$

$$P = P(0, y) \quad \text{se tiene} \quad P = P_0 + \left(1 - \frac{3}{2N} \Delta \sigma(x) \cdot -y\right) + 0 \left(\frac{1}{N^2}\right)$$

$$P = P(\infty, \zeta) \quad \text{se tiene} \quad P = P_0$$

$$P = P(\infty, y) \quad \text{se tiene} \quad P = P_0 + (1-y) + 0 \left(\frac{1}{N^2}\right)$$

y $P(\infty, y) > P(0, y)$, en tanto que como se supuso $P(0, \zeta) = P(\infty, \zeta) = P_0$.

Como $P(\infty, y) > P(0, y)$ es de suponer que hay una variación horizontal de la densidad que aumenta en el sentido de la propagación

En la figura 2.3 se resume el análisis realizado.

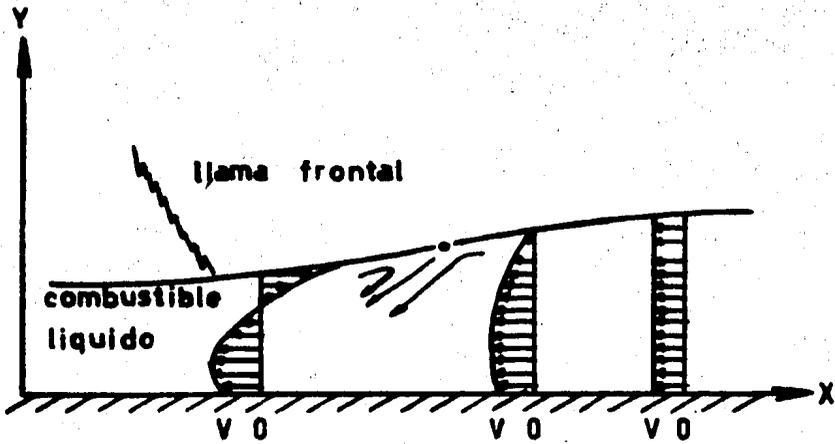


Fig 2.3 PERFIL DE VELOCIDADES Y FORMACION DE PENDIENTE EN LA SUPERFICIE DEL COMBUSTIBLE

2.5 CONDICIONES A QUE PUEDE ESTAR SUJETO EL MODELO PRESENTADO

El modelo matemático presentado puede exigir al estudio experimental condiciones como poca altura de las llamas, lo que conlleva a ciertas condiciones geométricas en el modelo de prueba, pues es evidente que si la altura de las llamas excede ciertas proporciones de magnitud con respecto al resto del sistema, entonces será una fuente emisora de radiación de un orden semejante a los efectos de la convección en el seno del líquido, esto se podrá deber al desprendimiento de anhídrido carbónico, microhollines así como ciertas cantidades de vapor de agua.

Otro factor que puede afectar es el efecto de la presión ejercida por la gran cantidad de gases generados en la combustión.

También si la intensidad de la combustión excede a la velocidad de propagación del sistema experimental, la llama sufrirá un proceso acelerativo por lo que no será muy adecuado hablar de una velocidad de propagación.

2.6 FACTORES GEOMETRICOS QUE INFLUYEN EN LA PROPAGACION DE LA LLAMA.

Es común realizar el estudio de velocidad de propagación de

combustibles líquidos en superficies horizontales en recipientes paralelepípedicos, por lo que es necesario antes de iniciar las pruebas experimentales determinar la longitud del recipiente tal que la propagación de la llama permanezca constante a través de dicha longitud y bajo las condiciones específicas del modelo.

Un ejemplo de lo dicho se muestra en la figura 2.4 en donde se muestra la posición de la llama frontal en función del tiempo a lo largo de un recipiente de 240 cm de largo por 19.5 cm de ancho y 2.5 cm de altura, con una cantidad de n-decano de 4 mm de espesor flotando sobre 14.8 mm de agua a $23.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ de temperatura inicial en el combustible.

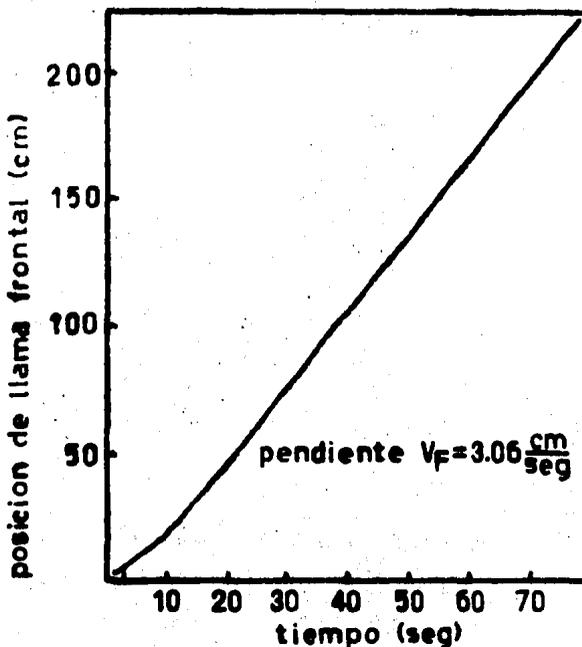


Fig. 2.4 POSICION DE LA LLAMA FRONTAL CON RESPECTO AL TIEMPO EN UN RECIPIENTE PARALELEPIPEDICO

Analogamente influyen la altura libre entre la superficie del combustible y el borde del recipiente, esto se puede observar en la figura 2.5 para el mismo combustible y en las mismas condiciones de espesor y temperatura.

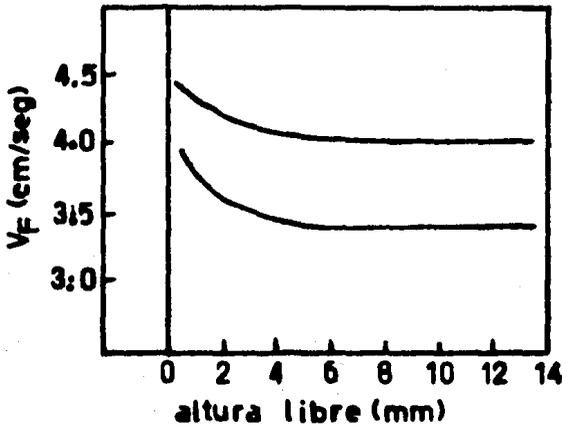


Fig 2.5 RELACION ALTURA LIBRE - VELOCIDAD DE PROPAGACION

Es de esperarse que el ancho del recipiente ejerza también influencia en la propagación de la llama para éste tipo de pruebas, por ejemplo puede influir en la altura de las llamas, así como en la proporción de energía liberada en la zona de combustión desarrollada, así la influencia del ancho del recipiente en la velocidad de propagación para n-decano en recipientes de 120 cm de longitud por 2.5 cm de profundidad y en condiciones de temperatura y espesores semejantes a los ya considerados para la construcción de las gráficas anteriores (figs 1.1 y 1.2) se muestran en la figura 2.6.

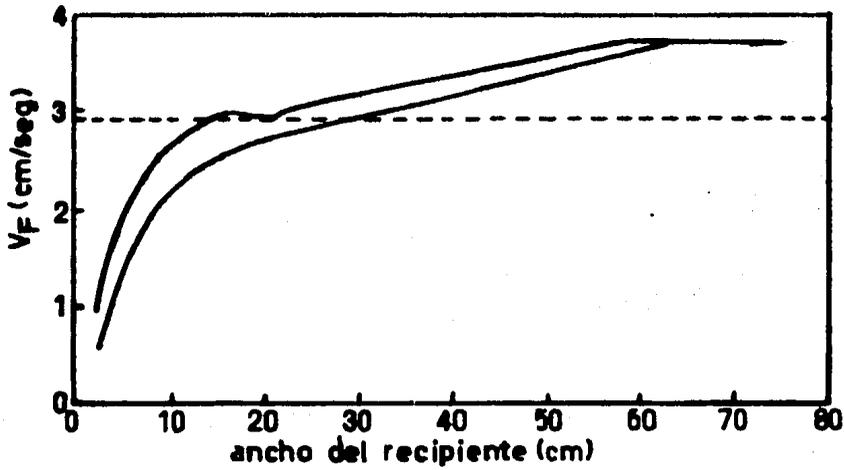


Fig 2.6 INFLUENCIA DEL ANCHO DEL RECIPIENTE
EN LA VELOCIDAD DE PROPAGACION

Para confirmar la influencia de la geometría del recipiente de ensayo se obtuvo la relación de la longitud del mismo con la velocidad de propagación como se muestra en la figura 2.7.

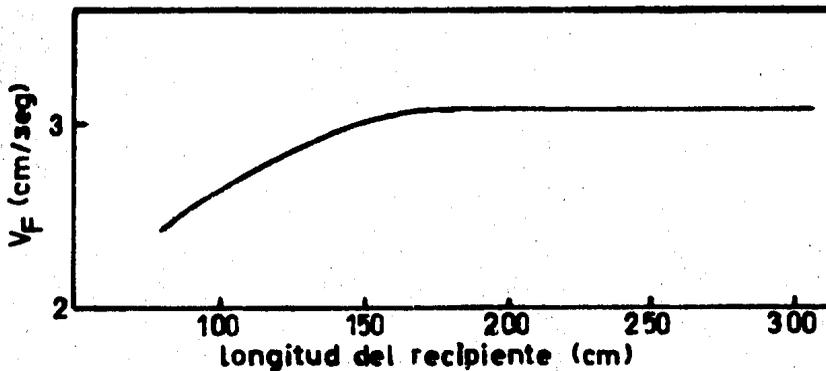


Fig 2.7 RELACION ENTRE LA LONGITUD DEL RECIPIENTE
Y LA VELOCIDAD DE PROPAGACION

La forma en que se llevaron a cabo dichos estudios se encuentra en la referencia 3, y la técnica empleada fué la filmación de los experimentos.

2.7 EL FENOMENO DE PULSACION DE LA LLAMA FRONTAL.

Roberts en 1959 y Glassman en 1970 observaron una característica importante en la propagación de la llama en combustibles con temperaturas iniciales inferiores al punto de inflamación, que consiste en pequeñas fluctuaciones que ocurren en el movimiento de la llama frontal.

Roberts opinó que las fluctuaciones fueron un resultado del hecho de que cuando la llama entra a una región no es estable necesariamente, por lo que la cantidad de vapor de combustible consumido puede exceder a la cantidad suministrada.

Glassman postuló más tarde que la pulsación de la llama es por la combustión de aire y combustible premezclados dentro de la región superficial definida por los lugares en donde son alcanzadas las temperaturas correspondientes al punto de inflamación abierto y al punto de fuego, justificando que era posible que dicha pulsación estuviera originada por que el punto de fuego era varios grados mayor que el punto de inflamación abierto.

Sin embargo en 1973 Akita y Fujiwara propusieron un mecanismo para explicar la pulsación de la llama al menos para alcoholes, --- sugiriendo una interacción de la llama con el flujo en la superfi--- cie en el cual la llama frontal puede ser autoacelerada bajo condi--- ciones apropiadas en tanto que el flujo en la superficie se mueve con una rapidez casi constante.

La autoaceleración fue atribuida al calentamiento del líquido en la superficie originado por el movimeinto del mismo.

Posteriormente en 1976 Dryer y Newman explicaron que el fenómeno de pulsación es un resultado del acoplamiento de los efectos de con--- vección en las fases líquida y gas en la región pulsante.

La transferencia de calor local a la superficie del líquido en la región de difusión es disminuida debido a la estructura de la llama precursora que retrocede. Por lo que las mezclas combustibles no se incrementan puesto que la temperatura en la superficie del líquido nuevamente decrece abajo de la temperatura de vaporización requeri--- da, y el oxígeno no es abastecido en la cantidad suficiente por la fa--- se de gas en la región de circulación, por lo que la combustión retro--- cede hasta la zona de la máxima llama de difusión

Como nos podemos dar cuenta la explicación de Dryer y Newman ha--- cen mención al termino de "llama difusiva", por lo que a continuación se da una breve explicación de la misma, así como de la llama en ga--- ses premezclados.

Cuando la mezcla combustible ocurre rápidamente en comparación con la reacción, o bien antes de la zona de llamas la combustión puede considerarse en término de procesos homogéneos, en este renglón caen las llamas de gases premezclados.

Existen también sistemas en los cuales el mezclado es lento comparado con la reacción de combustión, tal que el mezclado controla la combustión. Varios sistemas prácticos caen dentro de ésta categoría, y son nombrados sistemas de llamas de difusión en los cuales el combustible y el oxidante concurren en una zona de reacción a través de una difusión molecular (en régimen laminar o bien en reposo), así como de una difusión turbulenta.

La característica distintiva de una llama de difusión es que la cantidad quemada está determinada por la proporción en la cual el combustible y el oxidante acuden en las proporciones convenientes para la reacción.

Resumiendo, la teoría de llamas en la combustión de gases premezclados consiste esencialmente de un análisis de los factores tales como difusión de masa, difusión de calor y los mecanismos que afectan a la reacción homogénea que toma lugar. En tanto que los procesos primarios de mezclado de combustible y oxígeno parecen ser dominantes en los procesos de las llamas de difusión.

Así para el combustible etileno en una reacción con oxígeno se

tiene que para llama premezclada hay un consumo de reactantes de $4 \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3 \text{seg}}$, en tanto que para llama difusiva se tiene un consumo de reactantes de $6 \times 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3 \text{seg}}$.

En las figuras 2.8 a y 2.8 b se muestran dibujos que ilustran la forma de la llama para gases premezclados y en forma difusiva.

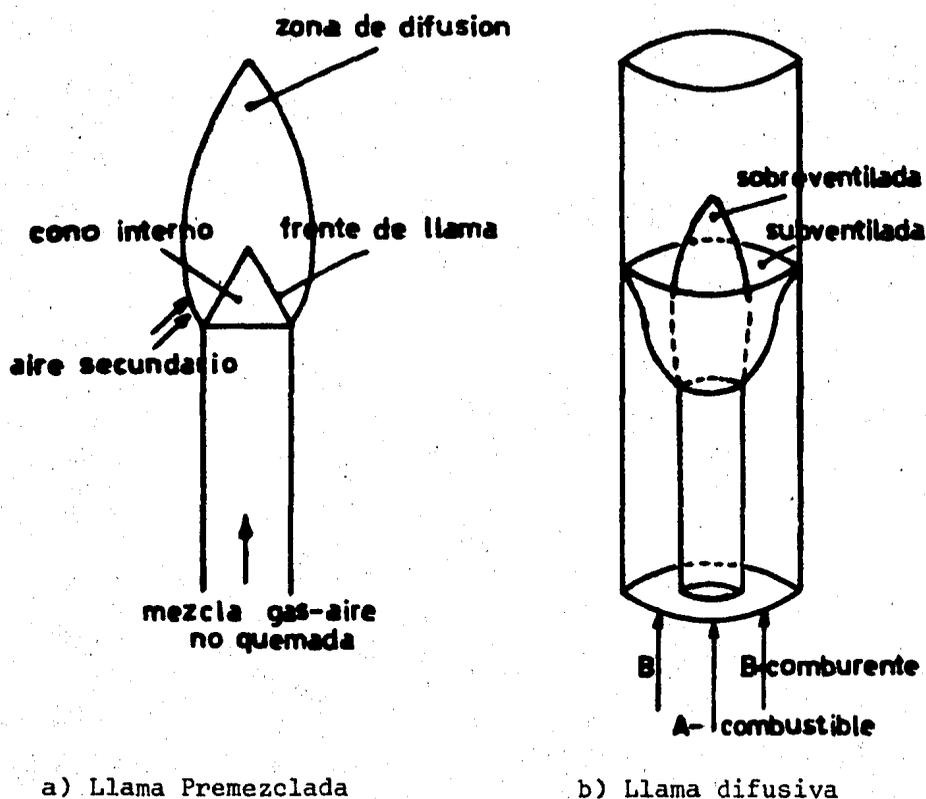


Fig 2.8 CARACTERISTICAS DE LAS LLAMAS DE DIFUSION Y PREMEZCLADO

CAPITULO 3

ACIONAMIENTO E INSTRUMENTACION DESARROLLADOS PARA LA EXPERIMENTACION

3.1 TECNICAS EMPLEADAS EN ESTUDIOS SEMEJANTES.

En todo estudio experimental resulta de fundamental importancia disponer de la instrumentación adecuada, de tal manera que los resultados sean confiables, para esto es necesario considerar calidad de trabajo, equipos de posible empleo en la experimentación de acuerdo al espacio, tiempo y factibilidad de conseguirse sin problemas en el mercado circundante.

Tales equipos se eligen de acuerdo a las técnicas de medición que se emplean durante la experimentación de tal manera que la instrumentación sirva para la obtención de resultados confiables.

A continuación se presenta un resumen de algunas técnicas empleadas en estudios semejantes.

3.1a. DETECCION CON FOTOMULTIPLICADORES.

Una serie de experimentos^(ref. 2) fueron realizados en un recipiente de aluminio de dimensiones 180 X 20 X 2.5 centímetros de largo, ancho y alto respectivamente, y las velocidades de propagación de la

llama fueron medidos a distancia por medio de un sistema sensitivo a la luz de como se muestra en la figura 3.1.

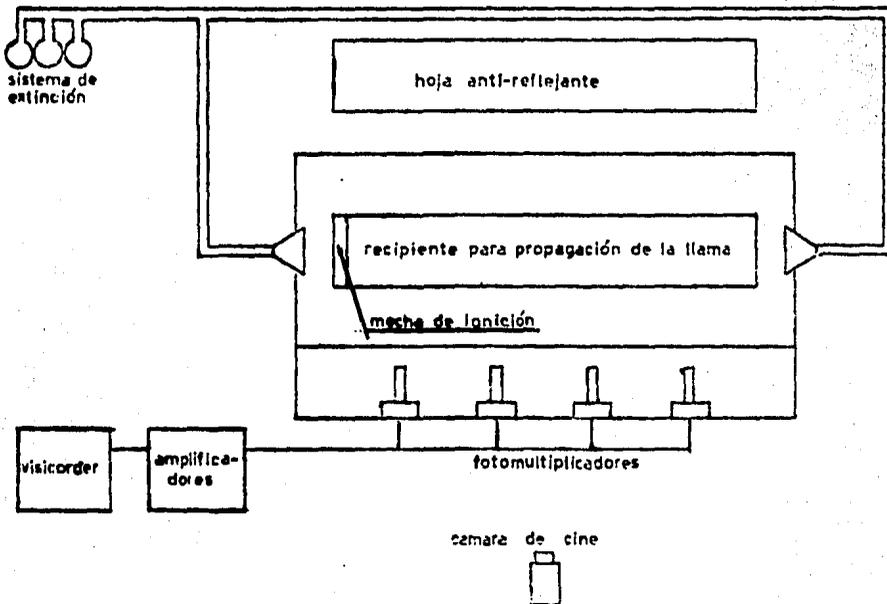


Figura 3.1. Detección con fotomultiplicadores.

Cuatro fotomultiplicadores 931 A fueron montados en recintos de acero con tubos de 0.16 cm de diámetro y 13 cm de longitud dirigidos al recipiente. Dichos sensores fueron posicionados en intervalos de 40 cm comenzando en una zona a 10 cm del extremo del recipiente opuesto al área de ignición.

Los sensores fueron apostados a 4 cm por encima de la superficie de combustible con una separación horizontal de 30 cm. Para

prever efectos de reflexión fueron colocados al lado opuesto a los sensores, hojas de acero "ennegrecido" (opaco) colocados a 45°.

Los cuatro sensores fueron conectados a un oscilagrafo Honey -- well visicorder de alta respuesta con 12 canales. Las velocidades de propagación fueron calculadas a partir de las señales de dichos sensores.

Un termopar colocado debajo de la superficie del combustible cerca de la chispa registra la temperatura de ignición de la mezcla, el movimiento y la forma de la llama fueron filmados con una cámara de cine de 250 cuadros por segundo marca Milliken DBM-5 de 16 mm.

3.1b. METODOS DE CRONOMETRAJE, FILMACION Y CONTADOR ELECTRONICO.

Otra serie de técnicas son las siguientes; (ref. 3)

Método 1. Tiempo cronometrado entre dos puntos fijos.

Este es el primer método empleado, tiene la ventaja de ser muy sencillo ya que consiste en establecer ciertas referencias a lo largo del recipiente y cronometrar el avance de la llama entre una referencia y otra.

La desventaja del método es que mide velocidades medias, y es muy subjetivo pues depende de la observación para determinar la

posición de la llama.

Método 2. Filmación de la posición de la llama y tiempo.

Empleando una cámara Bolex de 16 mm para registrar simultáneamente el tiempo y la posición de la llama en un recipiente graduado. La ventaja del método es que a partir de los cuadros de la película se obtienen los dibujos de la posición de la llama con respecto al tiempo y se puede obtener una velocidad instantánea de la misma.

La desventaja consiste en el procesamiento de la película, así como lo tedioso de la lectura de la misma.

Método 3. Detección con fototransistor y contador electrónico con pantalla.

Los fototransistores fueron colocados en posiciones conocidas a lo largo del recipiente en resguardos especialmente diseñados tal que el ángulo de detección es muy pequeño y en una dirección perpendicular a la que la propagación de la llama. La salida de los fototransistores se alimenta a un disparador Schmidt tal que cuando la señal de salida llega a un cierto valor un contador Berkeley es accionado. Un fototransistor comienza la cuenta cuando la llama lo cruza y otro detiene la cuenta, el contador esta calibrado en segundos.

Este método tiene la ventaja de ser muy rápido de usarse, pero mide solamente velocidades medias de propagación de la llama.

3.2. SISTEMAS CREADOS PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

Para el estudio objeto de este trabajo se han implementado una serie de sistemas cuya función es proporcionar control y seguridad en la realización de los experimentos, tales sistemas son:

3.2a. SISTEMA DE APOYO PARA LA EXPERIMENTACION

Son el conjunto de elementos cuyo fin es dar agilidad y control en exactitud y precisión a las pruebas realizadas, tales elementos son:

a) Charolas de quemado.

De material aluminio calibre 16 y dimensiones 180 X 20 X 2.5 cm en largo, ancho y alto respectivamente. También se tienen otras de 180 X 20 X 6 cm (ídem anteriores).

Cuando se inicio este estudio se propuso hacer prácticas en recipientes con las dimensiones propuestas en las conclusiones de la referencia 3 pero usando diesel en lugar de n-decano y a una temperatura ambiente variable entre 16°C y 18°C.

b) Plancha de nivelación.

Consiste de una hoja de triplay de 1.905 cm de espesor y de 244 X 40 cm de largo y ancho respectivamente, se encuentra recubierta con una lamina de Wilsondor que es un material plástico resistente al fuego no directo además de ser autoextinguible. Sobre esta

plancha va colocada la charola de quemado.

c) Pivotes de nivelación.

Son cuatro postes que pueden subir o bajar la plancha de nivelación con el fin de poder nivelar dicha plancha, están fabricados de barra hexagonal de bronce con cuerda interna y externa, giran en ejes de acero rolado en frío formando un mecanismo bastante sencillo pero efectivo.

d) Distribuidor.

Debido a que se trabaja con espesores finos de agua del orden de 16 a 20 mm, y espesores de combustible de 3 a 8 mm es necesario depositar el combustible con un espesor uniforme sobre la capa de agua y en un intervalo de tiempo demasiado corto.

El material seleccionado para el distribuidor es acrílico transparente de 1.25 cm de espesor.

La importancia y necesidad del equipo de nivelación y el distribuidor obedecen a que es necesario controlar la horizontalidad de la charola de quemado con el fin de tener una capa de agua de espesor uniforme lo que es sumamente importante en las condiciones iniciales de la prueba, así como en el control de la transmisión de calor a través de la superficie de fondo de la charola de quemado.

Por lo que respecta al distribuidor, el manejar espesores finos

de agua puede generar adherencia del combustible al fondo de la charola de aluminio si éste no se deposita cuidadosamente, dicha adherencia puede ocasionar que en determinadas zonas haya mayor concentración de combustible y en los cuales el agua alcanzará demasiado pronto la temperatura de ebullición, siendo esto sumamente perjudicial en el desarrollo del experimento.

También otra razón por la cual el tiempo de depositación del combustible debe ser mínimo es la volatibilidad de las fracciones más ligeras de los combustibles líquidos multicomponentes.

e) Charola de contención.

Es un elemento de seguridad, pues ahí se confina el combustible en proceso de combustión que se llega a derramar en la charola de quemado.

Esta fabricada en lámina negra calibre 12 de dimensiones 194 X 35 X 4.0 cm (largo, ancho y alto respectivamente).

f) Barrera confinadora de combustible.

Es una barrera de asbesto de 0.15 cm de espesor con una sección de espesor fino (casi 1 mm), articulada a un soporte universal con varilla de 45 cm de altura. El área de contención de la barrera es de 20 X 30 cm (ancho y alto respectivamente). Esta barrera confina el combustible en el extremo de la charola en donde se inicial la combustión.

g) Extinguidores.

Señ dos extinguidores de CO_2 colocados en extremos opuestos a lo largo de la mesa, se emplean en la extinción del fuego una vez concluido el experimento y como elementos de seguridad aparte de la charola de contención.

h) Mesa de experimentación.

Sobre la mesa de experimentación van colocados los elementos ya mencionados, el bastidor de la mesa es tubular de sección cuadrada de 2.54 cm y medidas 220 X 70 X 80 cm en largo, ancho y alto respectivamente.

La cubierta del bastidor es una hoja de panelart de 1.9 cm de espesor y superficie de 244 X 122 cm.

Todos los elementos mencionados se muestran en la figura 3.2.

La ignición del combustible se realiza con un soplete de propano de 14.1 oz y una boquilla tipo Bray Aireada que produce una flama fina y extendida con lo que se evita que el combustible sea esparcido.

Algunos elementos adicionales son 6 placas de Al de 22 X 22 cm con un espesor de 3/11 de plg para impedir flujo de fuego sin afectar el flujo de combustible, así como una barrera doble para confinación central.

- a = Charola de combustión
- b = Plancha de nivelación
- c = Distribuidor
- d = Charola de contención
- e = Extinguidor
- f = Mesa de experimentación

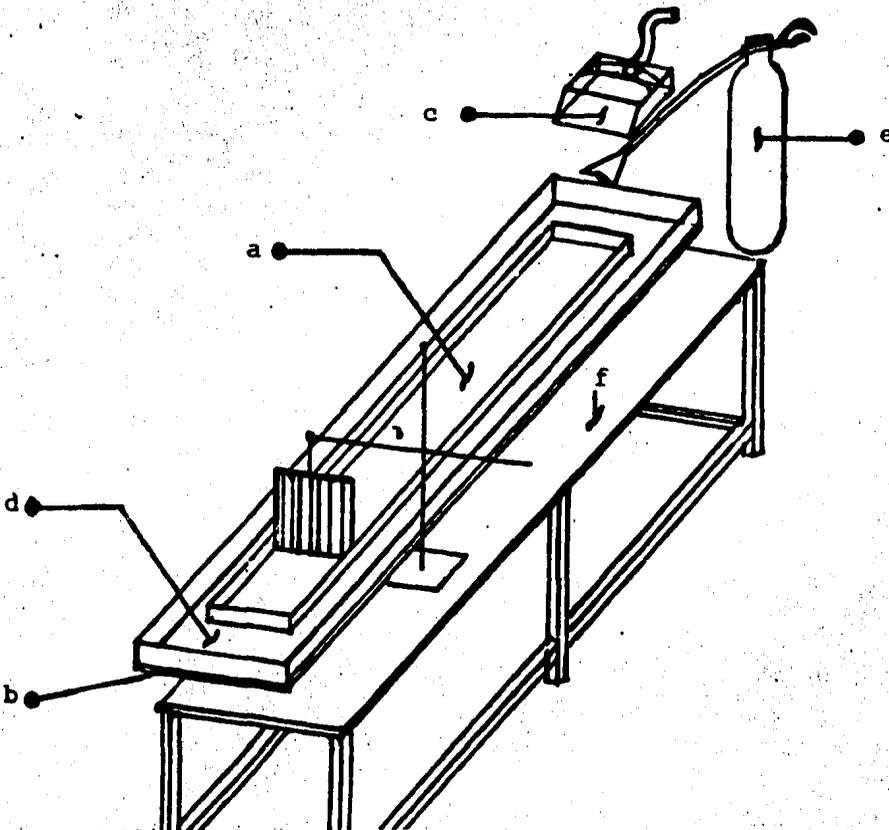
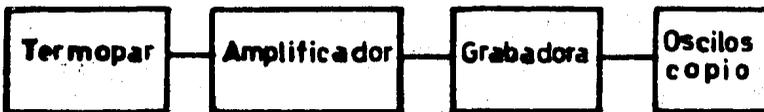


Fig 3.2 ELEMENTOS BASICOS DEL SISTEMA DE APOYO
PARA LA EXPERIMENTACION

3.2b. SISTEMA DE DETECCION Y MEDICION DE LA VELOCIDAD DEL FRENTE DE LLAMA.

Son el conjunto de elementos concatenados cuya función es detectar y registrar el paso de la llama frontal.

En los diagramas de bloques de la figura 3.3 se muestran las técnicas de detección del frente de llama, y medición del tiempo de propagación del fuego.



A) Técnica de grabación.



B) Técnica de graficación

Fig 3.3 TECNICAS DE DETECCION DE LA LLAMA

A continuación se da una explicación de cada uno de los elementos utilizados en estas técnicas.

a) Termopares.

Cada termopar de hierro-constantán (IC ó J) calibre 30 con un diámetro de 0.25 mm se emplea para detectar el paso del frente de la llama, el alambre de termopar tiene un recubrimiento de fibra de vidrio, sobre dicho recubrimiento ha sido colocado un forro de teflón con el fin de proteger y aumentar la vida útil de termopar.

Dicho calibre posee una constante de tiempo de 0.25 seg. y es apropiado cuando se trabaja en atmosferas reductoras como en éste caso (debido a que se tiene una mezcla rica) y con un costo comparativamente bajo, pudiendo ser empleado hasta una temperatura de 760°C.

b) Amplificadores.

El equipo de amplificación consiste de tres amplificadores ACCUDATA 122-4 DC AMPLIFIER, son módulos de estado sólido.

Tienen un rango de ganancia que va desde 0.02 hasta 5000 por lo que son útiles para señales de estudio que van desde 2 mV hasta 300 V. Es, por estas características deseable para la etapa de amplificación en el uso de transductores.

c) Grabadora.

Se trata de una grabadora Hewlet-Packard de cuatro canales de grabación y un rango de velocidades de grabación/reproducción que va de 15/32 hasta 15 plg/seg, en pasos multiples de 2.

El objeto de la amplia gama de velocidades de registro en las cabezas de grabación y reproducción obedece a su empleo en la grabación de señales en frecuencia, así para señales de baja frecuencia son deseables bajas velocidades de grabación y en registro de señales de alta frecuencia es necesario aumentar el ancho de banda por lo que la velocidad de operación aumenta.

Una vez que cada uno de los canales ha sido debidamente calibrado, puede haber confiabilidad en la legitimidad y semejanza de las señales registradas y que se originan en los termopares.

d) Osciloscopio.

Es Tektronix modelo 5112 DEO con doble haz de barrido bifurcable, esto presenta la ventaja de poder emplear cuatro canales simultáneamente, así tres canales se emplean para estudiar el comportamiento de cada termopar y el cuarto canal o haz de barrido sirve para establecer el nivel de voltaje de referencia en la comparación, con lo que disminuye considerablemente la incertidumbre en la medición del tiempo de propagación de la llama.

e) Oscilógrafo.

Registro oscilográfico visicorder modelo 1858 Honeywell de 18 canales de registro para módulos que emplean un sólo canal como el 1884-IFM, o bien para otros módulos que utilizan dos canales como el 1886-TCU.

De alta respuesta en señales de frecuencia pues emplea un tubo de rayos catódicos y fibras ópticas que plasman las señales registradas en un papel especial de impresión, y en el cual se grafican simultáneamente marcas de voltaje y tiempo formando un cuadrículado en el que queda ubicada la señal registrada.

Posee un servomecanismo que controla la rapidez del papel de impresión, y con el cual se puede tener una amplia gama de velocidades de registro desde 2.5 mm/seg hasta 3000 mm/seg.

f) Módulo interfase.

Es un dispositivo electrónico que sirve para acoplar una señal transformada por ejemplo a voltaje entre la fuente generadora y el graficador.

Es el modelo 1884-IFM y se adapta al visicorder 1858, se utiliza en casos en donde la impedancia de la fuente es lo suficientemente baja, y los niveles de la señal son lo bastante altos de tal manera que no requieran amplificación en esta etapa, pues posee una sensibilidad de 1 V/div.

Toca ahora describir la forma en que se enlazan los equipos haciendo mención primeramente a la técnica de grabación.

En la figura 3.4 se parte de un termopar que es elemento generador de voltaje y cuya junta de unión se hace cuidadosamente ejerciendo una presión suave entre las puntas de hierro-constantán,

observando el efecto de presión y la unión por medio de un microscopio con una resolución de 25X. Para garantizar la unión se envolvió la punta con una capa fina de soldadura de estaño.

Debido a que el termopar detector sólo sirve como un detector o sensor de la llama frontal no es necesario referirlo a un sistema de compensación de temperatura, basta confirmar que los tres detectores usados tengan una respuesta semejante ante la presencia de la llama.

Las terminales libres del termopar se enlazan al equipo de amplificación en donde se eleva el voltaje generado en el termopar por efecto de temperatura al aproximarse la llama, dicho enlace se muestra en la figura 3.5.

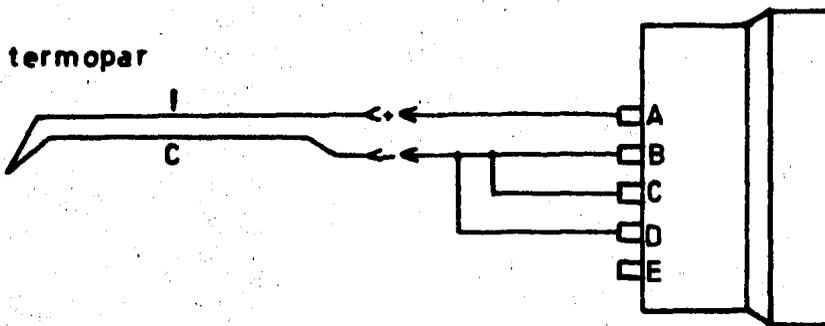


Fig 3.4 ENLACE TERMOPAR-AMPLIFICADOR

Originalmente el voltaje generado en el termopar es del orden de 4mV^{\dagger} aproximadamente cuando el frente de la llama toca la punta del termopar, debido a lo pequeño que resulta la señal no es posible grabarla directamente pues el ruido propio del equipo de grabación es de un orden mayor, es por esto que es necesario amplificar la señal en un factor de 200 con lo que se tiene una señal de salida del orden 1 V.

Continuando el proceso, en la terminal 3-15 del conector de salida del amplificador se recoge la señal amplificada para enviarse a la entrada del equipo de grabación en el canal respectivo del mismo como se puede apreciar en la figura 3.5, la interconexión se realiza mediante un cable coaxial sencillo con conector BNC en ambos extremos.

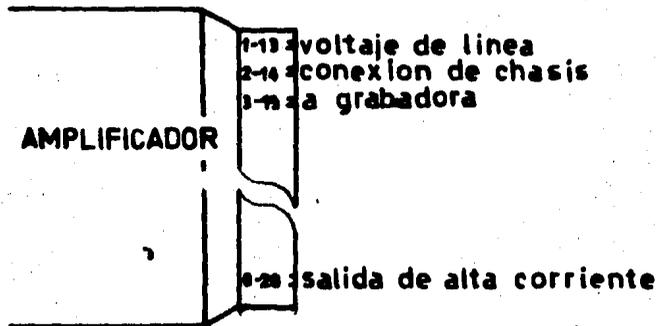


Fig 3.5 SALIDA DEL AMPLIFICADOR POR MEDIO DEL CONECTOR PL

[†]Nota: Este voltaje no tiene referencia a 0°C por lo tanto no es representativo de alguna temperatura específica.

Antes de introducir la señal al registro de grabación debe tenerse la seguridad de que los canales de la grabadora están debidamente calibrados y en el mismo nivel de registro, ya que de lo contrario alguna de las señales amplificadas puede quedar con algún grado de supresión y por lo tanto no tendrá semejanza con las demás y la prueba realizada quedará sin utilidad alguna.

Para grabar el fenómeno se elige una velocidad de cinta adecuada, cabe recordar que se emplean tres canales de la grabadora para registrar el paso del frente de la llama a través de tres termopares sensores equidistantes, por lo que el canal de grabación restante puede ser utilizado para grabar con voz algunos comentarios a lo largo del fenómeno, o bien, la fecha de realización, hora, condiciones ambientales o el modo de operación de los diferentes equipos electrónicos.

Simultáneamente a la realización de la prueba se conecta la sección de monitor de la grabadora con el osciloscopio con el objeto de observar la señal que se está registrando, así como cuidar que no se presente alguna anomalía y tomar una primera lectura del tiempo de propagación de la llama en el momento en que ocurre el experimento.

En la figura 3.6 se muestran los enlaces de los elementos correspondientes a la técnica de grabación.

Por lo que respecta a la técnica de graficación hay una variante a partir de la salida del amplificador, es decir que entre el

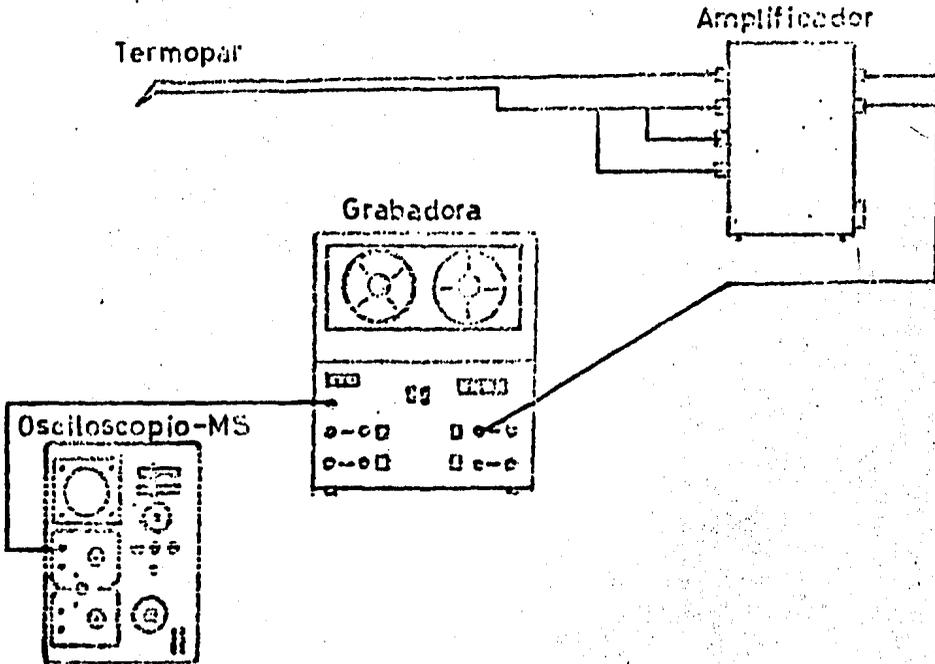
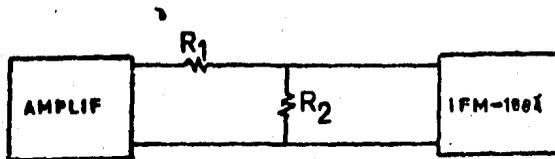


Fig 3.6 TECNICA DE GRABACION ENLACE DE EQUIPOS

amplificador ACCUDATA y el módulo 1884-IFM se debe realizar el siguiente enlace,



los valores de R_1 y R_2 dependen de la deflexión deseada en el trazo del oscilógrafo y se especifica por el fabricante del equipo.

El acceso de entrada al módulo interface puede ser por la parte frontal del mismo, o bien por la parte trasera del equipo 1858 Visicorder.

Una vez que la señal llega al módulo interfase queda registrada por el graficador y solo resta seleccionar la velocidad de avance del papel de registro, así como de los intervalos deseados en las referencias de tiempo de la gráfica, esto último se hace en los controles respectivos (servomecánismo) del oscilógrafo.

La técnica elegida es la de grabación por razones de disponibilidad de cinta de registro, y por ser una técnica comparativamente económica con respecto a la de graficación.

3.2c. SISTEMA DE MEDICION DE CONDICIONES INICIALES, CONTROL Y CALIBRACION DE EQUIPOS.

Se compone de aquellos elementos que sirven para establecer las condiciones de temperatura inicial del combustible, distancia entre termopares sensores del frente de la llama, espesor de la capa de agua y de combustible respectivamente, y otros elementos con los cuales se inspecciona semanalmente el estado en que se encuentran los equipos electrónicos y elementos transductores para así poder asegurar resultados confiables, se integra de los siguientes elementos:

a) Termómetro digital.

Es un termómetro modelo 2572 de YEW con selector de termopares y junta de compensación interna con una resolución de decimas de grado "C", y un tiempo de estabilización de respuesta de 1.5 seg. ante cambios abruptos de temperatura registrada.

Este aparato puede ser usado como indicador de la correcta preparación de los termopares, ya que con el podemos conocer si la junta de unión en los cables de termopar esta bien realizada, y en el caso en que los termopares han sido usados muchas veces en experimentación se puede verificar si hay algún cortocircuito o bien un termopar quemado.

b) Selector de termopares. Es un equipo que consta de dos bancos de conexión de termopares con una capacidad de 15 termopares por banco, modelo 2815-01 YEW que se acopla al termómetro digital modelo 2572, al hacer dicho acoplamiento se puede utilizar el circuito de compensación interna del termómetro y puede servir como compensador de un total de 30 termopares con lo que el alambrado de preparación de dichos transductores se reduce notablemente.

c) Plantilla de distanciamiento. Es una plantilla de acrílico con dos espejos separados 40 cm entre centros, sirve para colocar equidistantes a los termopares detectores del frente de la llama, dicha plantilla ha sido cuidadosamente preparada. Se optó por el método de espejo el cual no obstante de ser un medio de medición óptico es muy preciso y de fácil fabricación.

d) Potenciómetro. Equipo potenciómetro portátil de YEW modelo 2727 en el que se incorpora una fuente de potencia del orden de mV,

un galvanómetro y un compensador de termopares.

Las aplicaciones de este equipo portátil son de medición de voltaje de DC (1mv a 110 v), calibración de termopares, medición de temperatura por medio de termopar, medición de corriente directa, medición de resistencias y generador de voltajes de DC.

En este estudio dicho aparato se emplea como generador de DC para la calibración de los equipos de medición.

e) Medidor de nivel de agua. Es una pieza cilíndrica hueca con diámetro interior de 19 mm, espesor de pared 2 mm y altura de 50 mm, con marcas anulares con separaciones de 1 mm. Tiene el dispositivo un mecanizado de afinado en todas sus superficies y esta fabricado de acero-plata para evitar la oxidación del mismo.

f) Vernier de profundidades. Se emplea para medir el espesor del combustible, posee una resolución de 1/2 mm.

3.2d. SISTEMA DE MEDICION DE INCREMENTOS DE LA TEMPERATURA EN PUNTOS FIJOS DE COMBUSTIBLE Y MEDIO AMBIENTE.

Este sistema ha sido creado para utilizarse solamente en cuatro pruebas, debido a que el método empleado para esto es la graficación como se muestra en la figura 2.4b, y el papel de impresión empleado por el visicorder es de tipo especial que resulta muy difícil de conseguir actualmente.

El objetivo de esta pequeña serie de pruebas es conocer cual de los dos medios (líquido o gas) transmite más calor durante la propagación de fuego. Este estudio no puede hacerse simultáneamente con el de medición de velocidad de propagación por que para ambos es indispensable en su instrumentación contar con los amplificadores ACCUDATA, de los que se dispone solamente de tres unidades.

El beneficio de estas pruebas es que nos podemos introducir en las fases aire-combustible y sensor una propiedad importante como es la temperatura y que es de fundamental importancia en el fenómeno de combustión.

Los termopares sensores de temperatura se ubicarán en una línea imaginaria normal a la superficie de combustible a la distancia y posición que corresponde al último termopar detector del frente de la llama, como puede apreciarse en la figura 3.7.

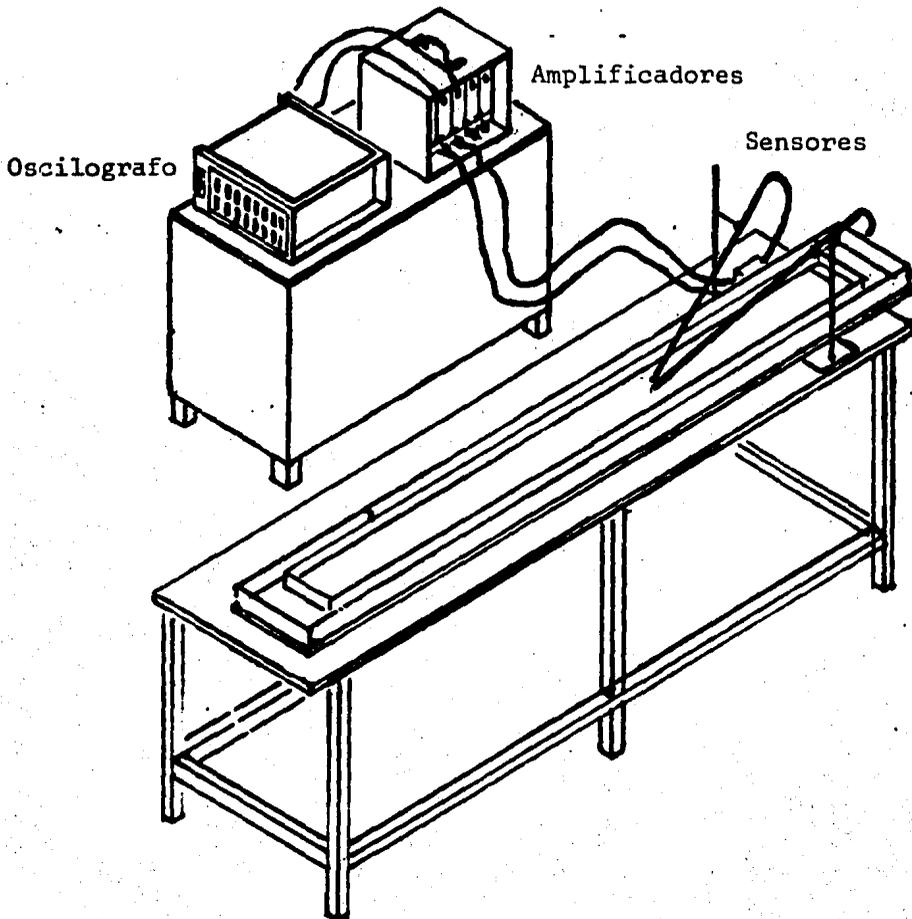


Fig 3.7 MEDICION DE INCREMENTOS DE TEMPERATURA

3.3 RESPUESTA Y CALIBRACION DE EQUIPOS.

La simulación tiene por objeto asegurar que los equipos están operando en los niveles deseados, esta prueba se realiza en los equipos de la técnica de grabación, por lo que el alambrado se muestra en la figura 3.8.

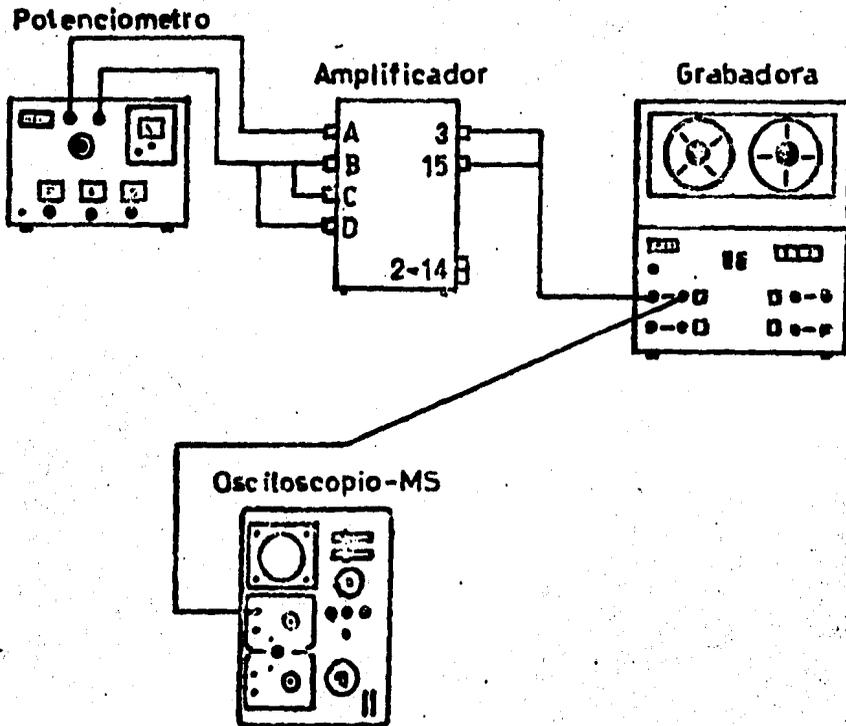


Fig 3.8 ALAMBRADO PARA VERIFICAR EL FUNCIONAMIENTO ADECUADO DE ALGUNOS EQUIPOS EMPLEADOS.

El proceso se realiza de la siguiente manera:

- i) En el potenciómetro (fuente de poder) se genera una señal de 2.5 mV con el equipo 2727 de YEW.
- ii) Dicha señal se envía al amplificador ACCUDATA 122-4, normal y sin supresión de señal de entrada, con una ganancia de 200.
- iii) Se observa en el osciloscopio el valor de voltaje de la señal amplificada que debe ser de 0.5 V.
- iv) Si no se obtiene dicho voltaje entonces se verifica el cero del amplificador, esto se puede hacer colocando en cero volt la señal del generador.
- v) Si la señal de cero volt generada por el equipo 2727 YEW no coincide con el observado en el osciloscopio al colocar en cero el interruptor de la señal de salida del amplificador se procede al ajuste del cero, colocando el interruptor de salida en NORM y girando el pivote de ZERO hasta que la salida del amplificador sea 0 V para una señal de entrada de 0 V y a su vez debe coincidir con el nivel cero del interruptor de salida del amplificador.
- vi) Se vuelve a generar la señal de 2.5 V y se graba la señal amplificada cuya magnitud debe ser de 0.5 V, esta señal se graba en los canales respectivos, y posteriormente se observa la señal ----

grabada en el osciloscopio.

vii) La magnitud del voltaje grabado debe ser de 0.5 volt, de no ser así se procede a la calibración del canal respectivamente de la grabadora. Para esto la grabadora debe operarse en el modo CAL y por medio de los pivotes de calibración de cada canal se procede al ajuste de los mismos, oprimiendo el botón correspondiente al canal que se ajusta en la sección de MONITOR de la grabadora.

viii) Una vez que la magnitud del voltaje grabado es el correcto (0.5 V) se puede confiar en la legitimidad de la señal registrada en el experimento.

A través de la secuencia anterior quedan listos los equipos que detectan el paso de la llama durante el experimento.

3.4 DISTRIBUCION DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS.

Para concluir, todos los sistemas ya mencionados se integran en un cuarto de experimentación con las dimensiones y distribución ---- especificados en el siguiente dibujo. (fig. 3.9)

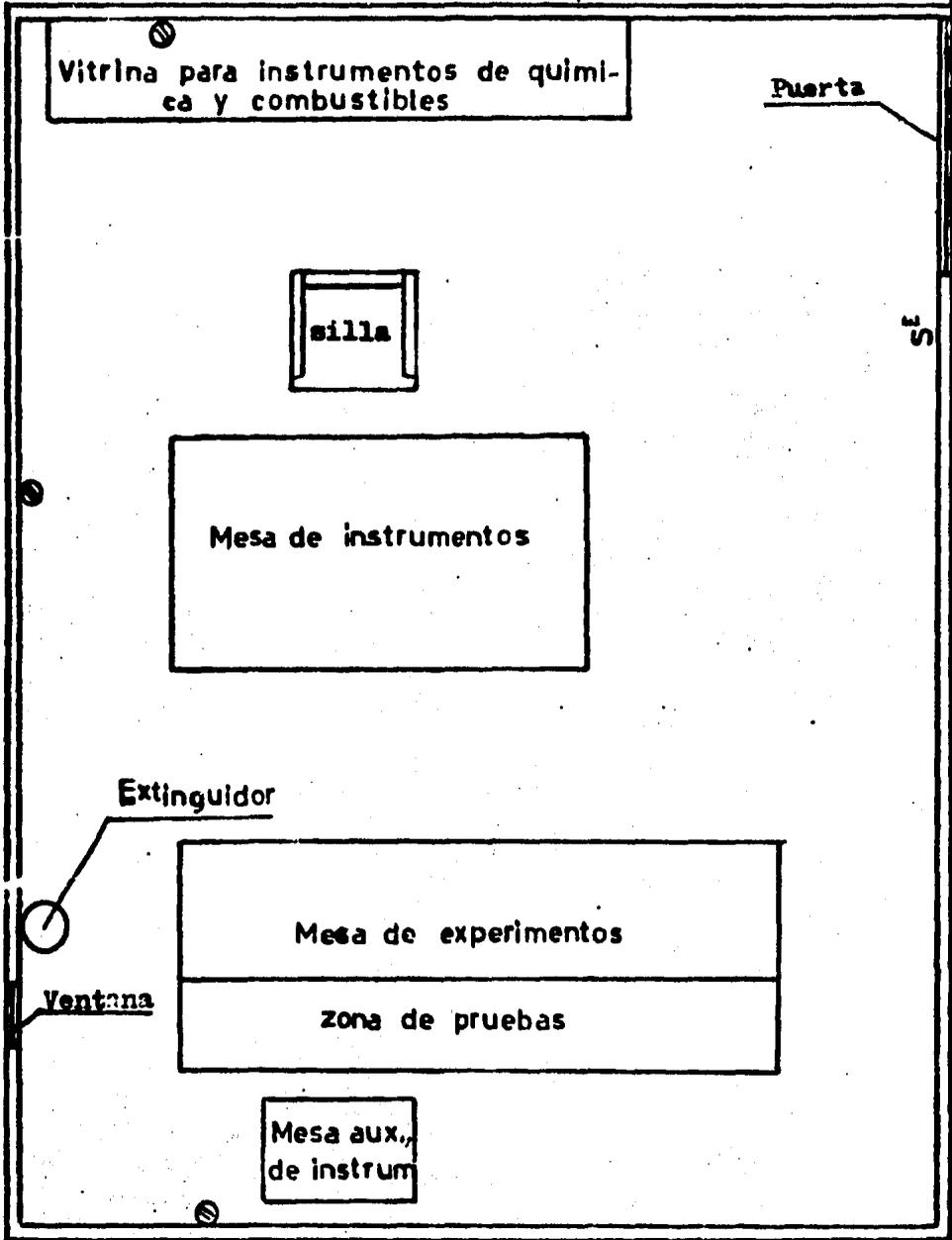


Fig 3.9 DISTRIBUCION DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS

CAPITULO 4

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA PROPAGACION DE LA LLAMA.

"La práctica experimental conduce a una mejor comprensión de los eventos concurrentes al fenómeno estudiado".

4.1 OBJETIVO DE LA EXPERIMENTACION.

Se trata de obtener la relación que existe entre la velocidad de propagación del fuego a través de la superficie de combustible y el espesor del volumen de combustible.

Por otro lado a partir de la observación del fenómeno aportar mejores estrategias para estudios semejantes tanto en el aspecto ambiental como en la instrumentación.

4.2 INTRODUCCION AL ESTUDIO EXPERIMENTAL.

En la sección 1.3 del capítulo 1, se hace referencia al número de Peclet a través de una longitud característica en el combustible, definiéndose dicho número como:

$$Pe = \frac{u\Delta x}{\alpha}$$

que corresponde a la relación de transferencia de calor convección/conducción.

Por estas razones entre otras, es necesario medir o tratar de determinar u y Δx , α se estima en aproximadamente $0.0008 \text{ cm}^2/\text{seg}$ para varios combustibles líquidos orgánicos.

También con otra serie de pruebas estudiar el movimiento de los fluidos, y la obtención de gráficas de temperatura contra tiempo en el volumen de combustible en puntos fijos del mismo.

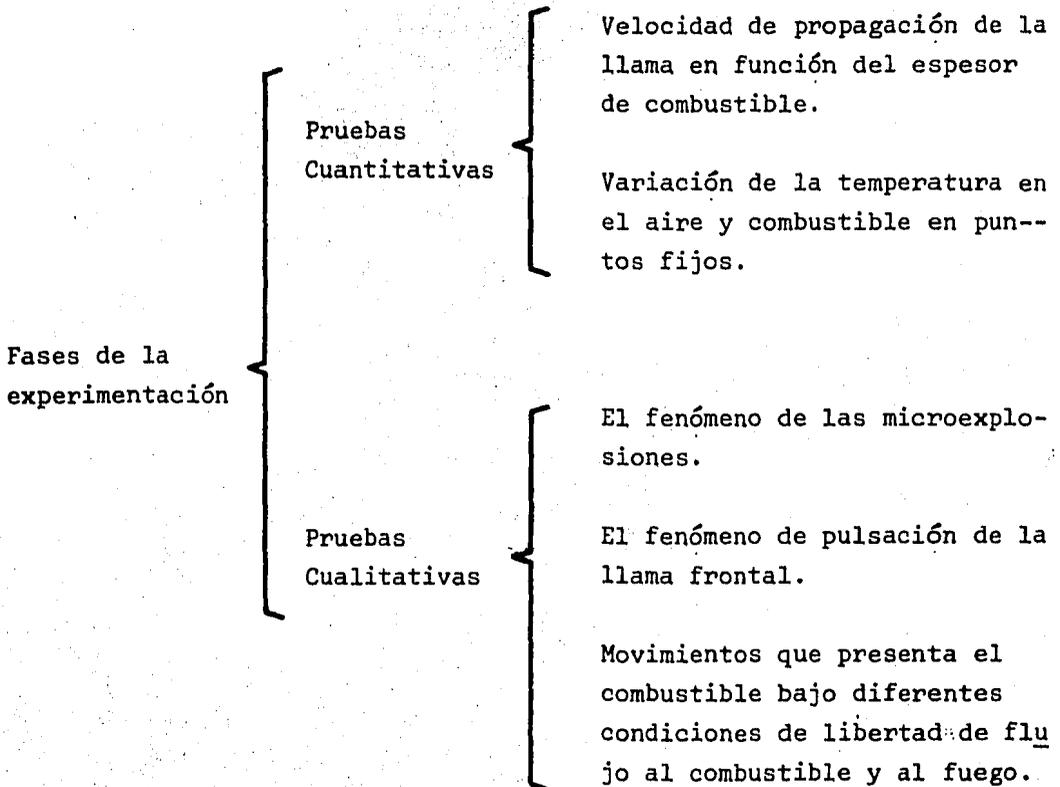
4.3 FASES DE LA EXPERIMENTACION.

El estudio experimental ha sido dividido en dos fases, una de pruebas cuantitativas cuya función es la obtención de resultados numéricos con el fin de tener datos medidos del fenómeno.

La segunda fase consiste en series de pruebas visuales que ayuden a una mejor conceptualización del fenómeno de propagación de fuego.

En el cuadro sinóptico que se muestra a continuación quedan

resumidas las pruebas a realizar:



4.4 DESARROLLO DE PRUEBAS CUANTITATIVAS.

En el capítulo anterior se dio una explicación de los distintos sistemas y equipos utilizables en la fase experimental, toca aquí de tallar la forma en que se realizan los experimentos, por lo que en la preparación de cada prueba correspondiente a la propagación de fuego

en función del espesor de combustible la secuencia es la siguiente:

- a) Se nivela la plancha de quemado.
- b) A continuación son colocadas primeramente la charola de contención e inmediatamente la charola de quemado.
- c) Se verifica la horizontalidad de los elementos anteriores, si hay algún desnivel se corrige.
- d) Se vierte agua en la charola de quemado hasta tener el espesor deseado, se vierte también el agua en la charola de contención.
- e) A continuación es vaciado el combustible en la charola de quemado empleando el distribuidor de combustible, se toman simultaneamente las temperaturas en el agua y en el combustible para verificar la obtención de una temperatura unifirome e igual o semejante en ambos líquidos.

Las cantidades de agua y combustible para la charola de quemado se preestiman de la siguiente forma.

$$\Psi_{\text{agua}} = B \times e_{\text{agua}} \quad \text{y} \quad \Psi_{\text{comb}} = B \times e_{\text{comb.}}$$

Se verifican los espesores con el medidor de nivel de agua y el vernier de profundidades.

f) Se retira el distribuidor y se toman simultaneamente las temperaturas en el combustible y agua (esto con el fin de estar moni
toreando dichas temperaturas)

El registro de temperaturas se realiza mediante termopares tipo J calibre 30, están conectados a un selector de termopares que a su vez esta interconectado a un termometro digital. Este conjunto de equipos de medición está colocado sobre un carro portátil y es de fá
cil desmonte pues debe ser retirado en el momento de iniciar la prue
ba de combustión debido a que es un equipo muy delicado.

g) Se colocan los termopares sensores del frente de las llamas con intervalos de separación de 30 cm, y posicionando el primer termo
par detector a 40 cm del extremo en el cual se inicia la combustión, colocándose a lo largo de la línea longitudinal central imaginaria en la charola.

Asímismo se colocan a 4 cm sobre la superficie del combustible.

Para lograr el posicionamiento anterior se hace uso de la planti
lla de posicionamiento y de las agujas de altura que están soldadas a los reguardos de los termopares.

h) Se coloca la barrera de confinamiento de la zona inicial de combustión a 10 cm del extremo de ignición con lo que se tiene un área de ignición de 200 cm².

Se prepara el extinguidor de CO_2 y se da la última inspección de los equipos electrónicos para verificar que todo este correcto.

i) Se inflama el combustible confinado por medio de un soplete de propano, y una vez que el fuego se puede sustentar es retirada la barrera en este instante se pone en funcionamiento el sistema de medición del paso de la llama, y se observa a través del osciloscopio que los eventos se esten registrando correctamente para cada termopar detector.

4.4a. MEDICION DE LA VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LA LLAMA EN FUNCION DEL ESPESOR DE COMBUSTIBLE.

El formato de la hoja de registro de datos debe contener la siguiente información.

1. Fecha y hora en que se realiza la prueba.
2. Temperatura ambiente.
3. Temperatura del agua.
4. Temperatura del combustible.
5. Espesor del agua.
6. Espesor del combustible.
7. Distancia entre termopares.
8. Primer intervalo de tiempo.

9. Segundo intervalo de tiempo.
10. Primera velocidad promedio.
11. Segunda velocidad promedio
12. Velocidad promedio de las anteriores y observaciones.

Una vez concluida la prueba de combustión se procede a la información en la cinta de grabación, empleando para este objetivo la grabadora, el osciloscopio y un cronómetro de la siguiente forma.

Conectando los canales de salida de la grabadora que registraron la señal de cada termopar (canales 1, 2 y 3 para este estudio) al osciloscopio como se ilustra en la figura 4.1 se tienen entonces en el osciloscopio 3 haces de barrido que coinciden en el mismo punto de la pantalla, en tanto que el cuarto haz de barrido se encuentra posicionado en el nivel de voltaje de referencia, es decir el voltaje equivalente al que se genera en cada termopar cuando la llama frontal lo toca. Todos los módulos de deflexión vertical del osciloscopio deben estar en la misma sensibilidad (# V/div).

Si visualizamos la secuencia de barrido como una serie de curvas generadas por los cuatro haces se observaría el comportamiento ilus--trado en la figura 4.2, y a partir de la cual se explica a continua--ción la forma en que se realizan las mediciones con sus variaciones respectivas.

Fig 4.1 ESTUDIO DE LA SEÑAL GRABADA

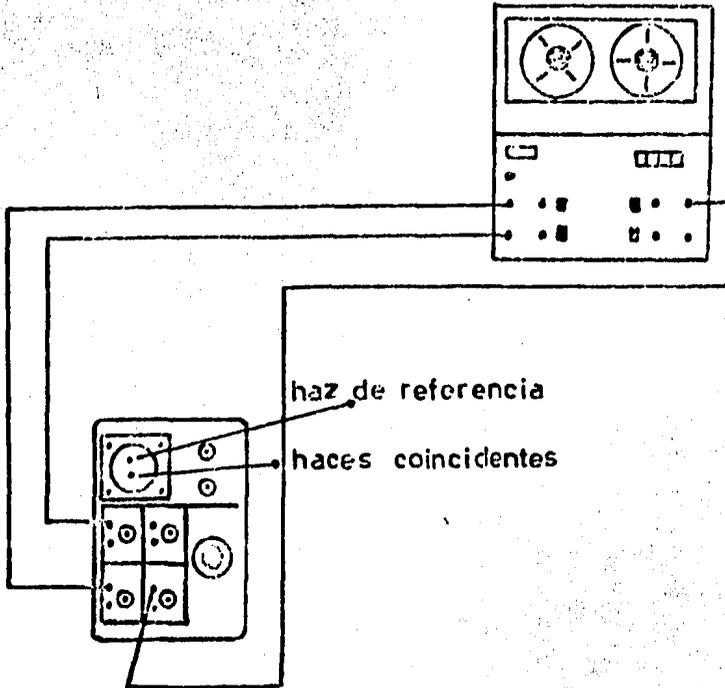
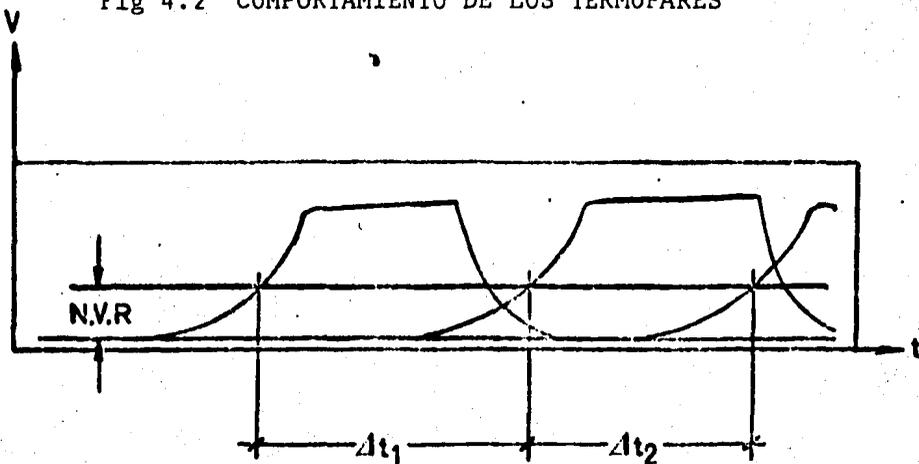


Fig 4.2 COMPORTAMIENTO DE LOS TERMOPARES



De la figura 4.2 se tiene que:

N.V.R.: Nivel de voltaje de referencia.

Δt_1 : Tiempo transcurrido para que la llama frontal avance del primero al segundo termopar.

Δt_2 : Tiempo transcurrido para que la llama frontal llegue del segundo al tercer termopar.

Si consideramos que la distancia entre termopares es una magnitud constante e igual a "d" para ambos segmentos podemos obtener dos velocidades promedio que son:

$$\bar{v}_1 = \frac{d}{\Delta t_1} \quad \text{y} \quad \bar{v}_2 = \frac{d}{\Delta t_2}$$

por lo que la velocidad promedio será

$$\bar{v}_{\text{prom}} = \frac{d}{2(\Delta t_1 + \Delta t_2)}.$$

Es importante hacer notar que el hecho de establecer un N.V.R., reduce notablemente la incertidumbre en la determinación de la magnitud del voltaje originado en el termopar cuando la llama frontal lo cruza.

Cabe mencionar que el cronómetro empleado da valores en décimas de segundo, y con el cual se toma un solo intervalo de tiempo dividido en dos partes. Aclarando, lo anterior se guarda en memoria el tiempo transcurrido del primero al segundo termopar sin interrumpir

la cuenta y se detiene el cronómetro cuando la llama toca el tercer termopar.

El intervalo de tiempo Δt_1 se lee directamente a través de la memoria del cronómetro. Por lo que respecta a Δt_2 para obtenerlo se resta al tiempo total transcurrido el tiempo Δt_1 .

Una observación muy importante es asegurarse que la velocidad de la cinta magnética sea la misma con la que se registró el fenómeno, pues de lo contrario a los intervalos de tiempo se les debe corregir multiplicándolos por el siguiente factor de escala:

$$\frac{w_2}{w_1} = f.e$$

en donde

w_2 = Velocidad de reproducción en plg/seg.

w_1 = Velocidad de grabación en plg/seg.

f.e = Factor de escala ,

con lo que

$$\Delta t_{1(\text{real})} = (f.e)(\Delta t_1)_{\text{cronom}}$$

y

$$\Delta t_{2(\text{real})} = (f.e)(\Delta t_2)_{\text{cronom}} .$$

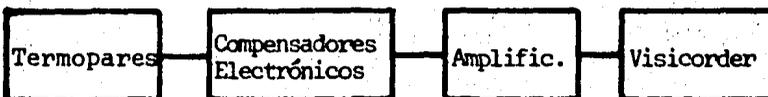
4.4b. VARIACION DE LA TEMPERATURA EN UN PUNTO FIJO DEL COMBUSTIBLE Y MEDIO AMBIENTE.

La preparación de este tipo de pruebas es semejante a la ya explicada, es decir se sigue el mismo procedimiento pero hasta el inciso (f), a partir del cual se realiza lo siguiente:

g) Se posicionan los termopares que registran la variación de la temperatura en el combustible y aire a una distancia del extremo de ignición de 130 cm (que es el sitio correspondiente al posicionamiento del último termopar que para las pruebas anteriores registraba el paso de la llama frontal, así, un termopar tipo K se coloca en la masa combustible y un termopar tipo J es colocado en el aire a aproximadamente 9 mm sobre la superficie del combustible.

h) Se coloca la barrera de confinamiento, para así iniciar la prueba correspondiente.

Por lo que respecta a la instrumentación anterior requerida, la técnica de medición empleada es semejante a la que se ilustra en la figura 3.3b (capítulo 3), pero con la siguiente modificación:



Pese a que la cantidad de pruebas propuestas a realizar es de solamente cuatro, es útil la realización de las mismas para poder observar que facultad posee cada medio para permitir el flujo de calor en estas condiciones.

La información que deben contener estas gráficas es:

1. Fecha de realización de la prueba y hora.
2. Temperatura ambiente.
3. Temperatura del combustible.
4. Temperatura del agua.
5. Espesor de combustible.
6. Espesor de agua.
7. Distancia de los detectores con respecto a la barrera confinadora.

Mediante la graficación de la señal se tiene una forma bastante fácil de obtener el incremento de temperaturas en al aire y en el com bustible con respecto al tiempo.

4.5 DESARROLLO DE PRUEBAS CUALITATIVAS.

Estas pruebas son un complemento del análisis cuantitativo ya planteado, su importancia radica en que a partir de dichas pruebas

pueden ser observados algunos detalles que durante el desarrollo del experimento pasan desapercibidos, asimismo pueden dar más claridad a cuestiones como movimiento del combustible, etc., y así ser de utilidad para las conclusiones del presente trabajo.

4.5a. EL FENOMENO DE LAS MICROEXPLOSIONES.

Al presentarse inesperadamente éste fenómeno en el desarrollo experimental (como puede apreciarse en la sección de resultados) fué deseable incluirlo en el trabajo, la primera razón era lo perjudicial que resultaba en el desarrollo de un experimento, ya que en cierta medida representaba un efecto no controlable, y por lo mismo no deseable. ---

Por los motivos anteriores se preparo un modelo de combustión con charolas de menores dimensional (la de quemado de 51.5 X 10.5 X 2.5 cm, y la de contención de 65.5 X 19.5 X 2.5 cm), con estas condiciones se esperaba que las microexplosiones fueran de menor alcance, y por lo mismo más controladas para lo cual se sigue la siguiente secuencia experimental.

1. Se preparan cuatro milímetros de espesor de combustible o bien un espesor mayor para garantizar la inflamación y propagación de la llama a través del combustible.

2. Dicha capa de combustible reposa sobre una capa de agua de 15 mm. La charola de contención posee un espesor de 20 mm de agua.

3. Se produce la inflamación del combustible hasta lograr la combustión desarrollada, de esta manera se deja al sistema en un proceso de combustión plena para tener una vaporización rápida del combustible y con ello una disminución pronta del espesor del mismo.

4. Dadas las condiciones anteriores se procede a la confinación de la zona en combustión a la región central de la charola de quemado por medio de placas de asbesto que extinguen el fuego sobre la superficie del combustible en donde son colocadas.

Con esto se reduce aún más el área de explosiones dando la posibilidad de una mejor observación del fenómeno. Este modelo se ilustra en la figura 4.3.

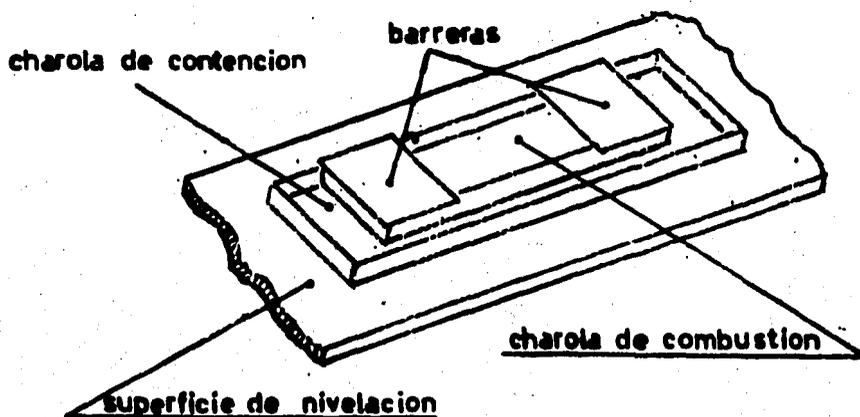


Fig 4.3 OBSERVACION DEL FENOMENO DE LAS MICROEXPLOSIONES

4.5b. EL FENOMENO DE PULSACION DE LA LLAMA FRONTAL.

Durante su recorrido de propagación, la llama frontal realiza pausas es decir que su avance no es en forma continua.

Para estudiar este fenómeno se prepara el sistema de experimentación correspondiente al de medición de velocidad de propagación.

4.5c. MOVIMIENTOS QUE PRESENTA EL COMBUSTIBLE BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE LIBERTAD DE FLUJO AL COMBUSTIBLE Y AL FUEGO.

Con el fin de poder apreciar algún movimiento longitudinal del fluido, o bien alguna manifestación de movimiento en general del fluido se proponen las siguientes configuraciones:

a) Ignición central del combustible.

Usando una configuración de los elementos de experimentación idéntica al del estudio de microexplosiones, se tiene una configuración que permite flujo al combustible hacia los flancos pero impide el flujo al fuego.

De esta forma se espera observar el comportamiento del combustible con el fuego.

b) Ignición central del combustible.

La variante que presenta esta configuración es que se emplean las charolas de contención y de quemado de las mayores dimensiones. También se prepara una barrera central y se colocan a los lados de dichas barreras un juego de placas una de aluminio y la otra de asbesto, con esto se pretende dar la posibilidad al combustible de tener un movimiento con más libertad y espacio. Esta configuración se muestra en la figura 4.4.

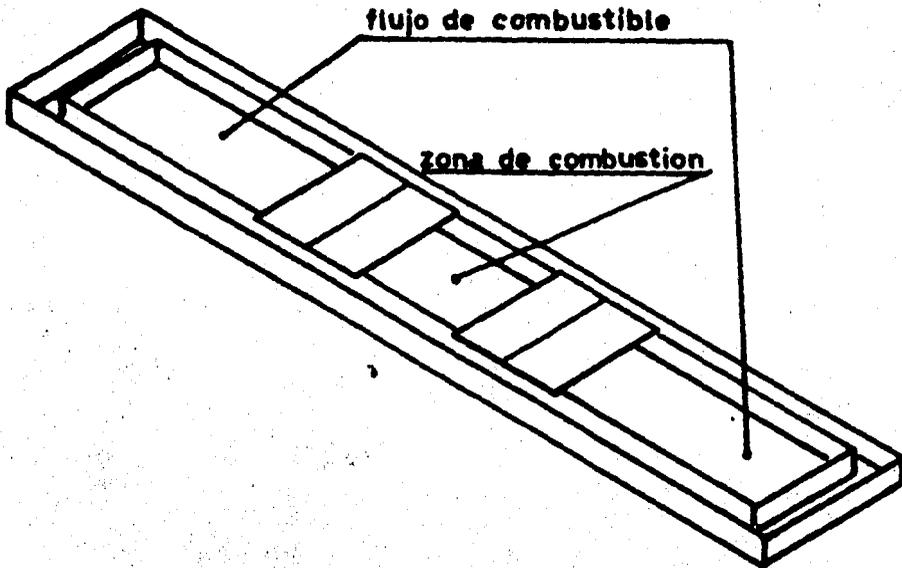


Fig 4.4 PRUEBAS DE IGNICION CENTRAL DEL COMBUSTIBLE

CAPITULO 5

RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUCCION.

En este capítulo se trata la interpretación de los resultados en forma de módulos y se dividen en tres partes que son:

1) Resultados.

Se presentan los resultados obtenidos para cada familia de pruebas realizadas de las llamadas pruebas cuatitativas y las cualitativas.

2) Conclusiones.

En la presentación de las concluiones se toman en cuenta los resultados obtendios del estudio experimental y los correspondientes al APENDICE B.

3) Recomendaciones.

Aqui se comentan algunas ideas sobre una serie de mejoras que redundarán en un estudio experimental más seguro y eficiente.

5.2 RESULTADOS

5.2a. VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LA LLAMA EN FUNCION DEL ESPESOR DE COMBUSTIBLE.

Como puede notarse de los resultados de la tabla I, un factor que en cierta forma no fué totalmente controlado corresponde a la temperatura ambiente, sin embargo éste como algunos otros referidos a temperatura fuerón colocados en un rango aproximado entre unos y otros, sin embargo pienso que la variación de 1 ó 2 grados centígrados no es tan significativo en los resultados debido a que se esta trabajando muy por debajo de la temperatura de inflamación del combustible.

En la gráfica 1 se observan tres zonas que corresponden a la no propagación de la llama, una intermedia que se caracteriza por la aparición de pequeñas explosiones llamadas "microexplosiones", y una tercera zona de combustión sin microexplosiones.

Algunas características asociadas a cada zona son:

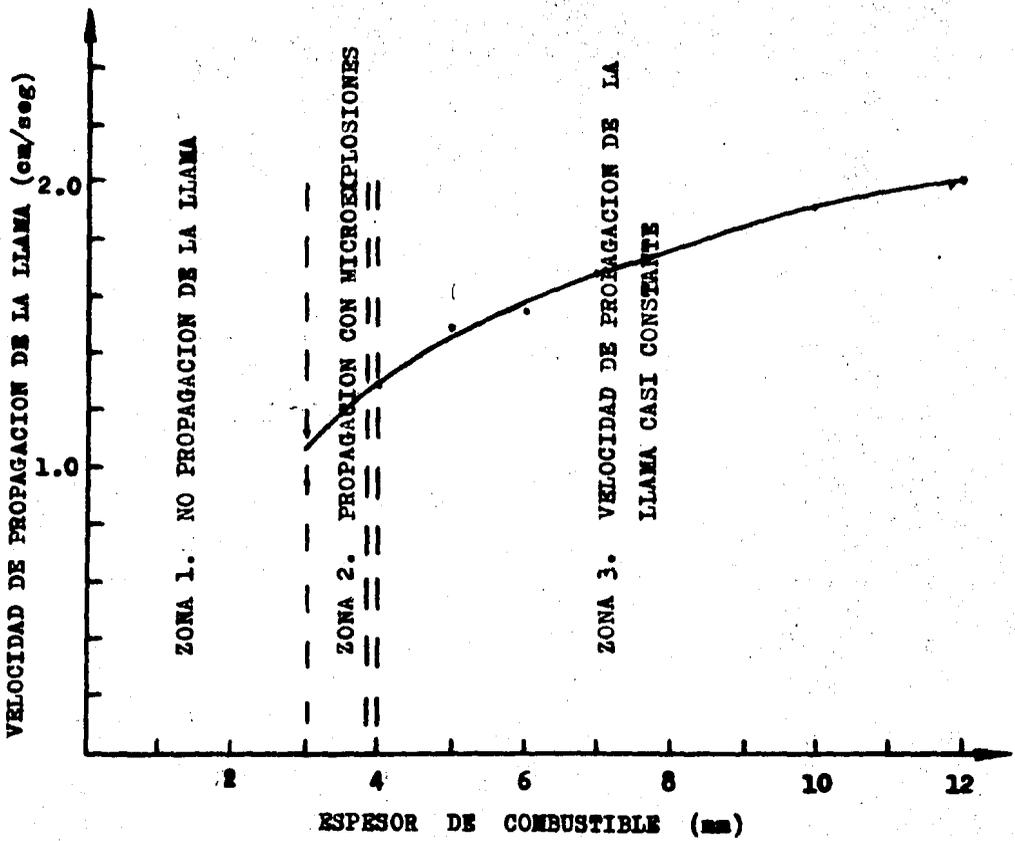
- 1) Para la zona de no propagación esto puede deberse al efecto producido por la pulsación de la llama en la región de inflamación del combustible, y consiste en una onda de presión en forma pulsante

TABLA I

FECHA	HORA	T° amb ($^{\circ}$ C)	T° agua ($^{\circ}$ C)	T° com ($^{\circ}$ C)	ESPEJOR DE AGUA (mm)	ESPEJOR DE COPES (mm)	DISTANCIA ENTRE TERMOPARES (cm)	At_1 (seg)	At_2 (seg)	Av_1 ($\frac{cm}{seg}$)	Av_2 ($\frac{cm}{seg}$)	Av_{prom} ($\frac{cm}{seg}$)	OBSERVACIONES
7-7-53	10:00	19.0	18.5	18.3	17.0	3.0	30	33.03	29.84	0.91	1.01	0.96	COMBUSTION CON MICROEXPLOSIONES
8-7-53	10:15	19.2	18.4	18.5	17.0	3.0	30	33.40	30.25	0.90	0.99	0.95	NOTABLE CANTIDAD DE RESIDUOS DE CARBON EN EL COMBUSTIBLE AL FINALIZAR LAS PRUEBAS.
9-7-53	10:15	19.0	17.5	17.9	45.0	3.0	30	31.29	22.94	0.96	1.31	1.13	SE INCREMENTA NOTABILMENTE LA PENDIENTE EN LA SUP. DEL COMBUSTIBLE.
10-7-53	10:20	19.7	17.3	17.7	45.0	3.0	30	32.03	23.13	0.94	1.30	1.12	
11-7-53	10:25	19.0	17.2	17.6	45.0	4.0	30	31.14	18.48	0.96	1.62	1.29	NO HAY MICROEXPLOSIONES.
12-7-53	10:30	19.0	17.5	17.7	45.0	4.0	30	31.65	18.40	0.95	1.63	1.29	POCOS RESIDUOS DE CARBON.
13-7-53	10:35	18.0	16.6	17.1	45.0	5.0	30	23.21	18.00	1.29	1.67	1.48	SE VAN INCREMENTANDO LAS DOS VELOCIDADES CALCULADAS.
14-7-53	10:40	18.5	17.3	17.3	45.0	5.0	30	23.12	18.40	1.30	1.63	1.47	DISMINUYE LA PULSACION.
15-7-53	10:45	16.0	16.0	16.3	45.0	6.0	30	21.92	17.40	1.37	1.72	1.54	DISMINUYE LA PULSACION.
16-7-53	10:50	17.0	16.5	17.0	45.0	6.0	30	22.03	17.55	1.36	1.71	1.53	CASI NO TIENE PENDIENTE EL COMBUSTIBLE EN LA SUPERFICIE.
17-7-53	10:55	16.5	15.1	15.7	45.0	7.0	30	18.55	17.21	1.62	1.74	1.68	
18-7-53	10:50	17.5	15.5	15.8	45.0	7.0	30	18.52	17.15	1.62	1.75	1.68	
19-7-53	10:20	18.6	17.6	17.8	45.0	10.0	30	16.52	15.05	1.82	1.99	1.91	
20-7-53	10:45	17.5	19.6	19.6	45.0	12.0	30	14.78	14.66	2.03	2.05	2.04	
21-7-53	10:00	19.0	18.6	18.4	45.0	12.0	30	15.06	14.42	1.99	2.08	2.04	

APARTE DE LAS PRUEBAS ANTERIORES SE HICIERON OTRAS MAS PARA DETERMINAR EL LIMITE DE NO PROPAGACION DE LA LLAMA, ASI COMO EL LIMITE DE LA ZONA CON MICROEXPLOSIONES

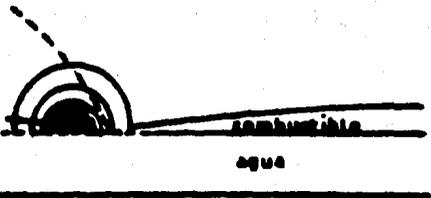
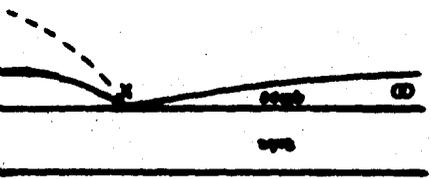
Gráfica 1. COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL DEL DIESEL
A TEMPERATURA AMBIENTE



que tiende a expulsar al combustible lejos de la zona en combustión.

Sumado al efecto anterior se puede tener un flujo en el combustible inducido por un gradiente en la tensión superficial de tal forma que el combustible en la superficie se aleja del área en llamas con una velocidad mayor que la que en ese instante es capaz de desarrollar la llama.

Lo anterior se puede ilustrar gráficamente de la siguiente forma:

CAUSA	EFECTO
<p>Pulsación por la inestabilidad de la llama.</p>	
<p>Gradiente en la tensión superficial debida a un $\Delta T = T_x - T_{\infty}$</p>	

Es posible que lo anterior ocurra ya que una vez que el fuego se ha extinguido en la zona de ignición del combustible, éste tiende a

retornar lentamente hasta volver a formar una capa de espesor constante.

2) Para la región de combustión con microexplosiones que va de 3.0 mm a 3.8 mm aproximadamente, se caracteriza por la aparición de dichas explosiones en la zona de combustión desarrollada o de premezclado la cual debido a la evaporación del combustible que excede a la propagación del fuego produce que antes de que sea registrado el paso de la llama suceda ese fenómeno no deseable.

Otra característica de esta zona es la gran aceleración del frente de fuego, así como la formación de una pendiente en la superficie del combustible en el sentido longitudinal de la charola de combustión.

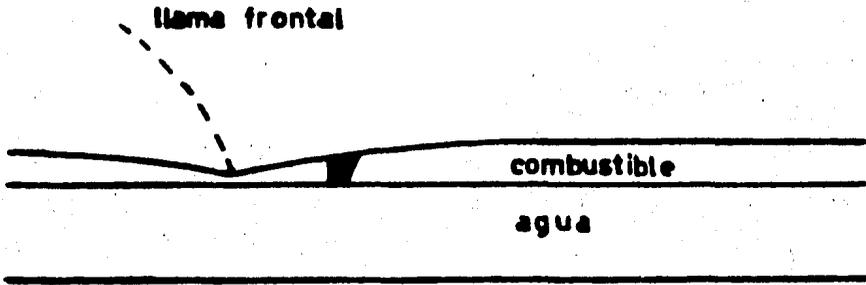
También se asocia a estos límites una gran cantidad de residuos de carbón en el seno del combustible al finalizar el experimento, así como una mayor pulsación de la llama frontal.

3) Luego se tiene una tercera región que va de los 4.0 mm a los 12 mm, por lo que respecta a este estudio, en la cual se tiene que la aceleración de la llama frontal va disminuyendo conforme aumenta el espesor del combustible.

Se puede apreciar en los experimentos que la pendiente en la superficie del combustible se hace casi nula, los residuos de carbón en la superficie del combustible (y en general en el seno de combustible) van disminuyendo en proporción notable para pequeñas variaciones en el espesor de combustible.

Una posible explicación al hecho de casi no aceleración en la llama frontal, es la formación de una capa límite mecánica dentro o en el espesor de combustible, de tal forma que se tiene un flujo de combustible casi constante (en velocidad) que abastece de combustible precalentado a la zona que antecede al frente de la llama, como se expresa en el dibujo comparativo de la figura 5.1.

(a) Perfil de velocidades poco desarrollado



(b) Perfil de velocidades desarrollado

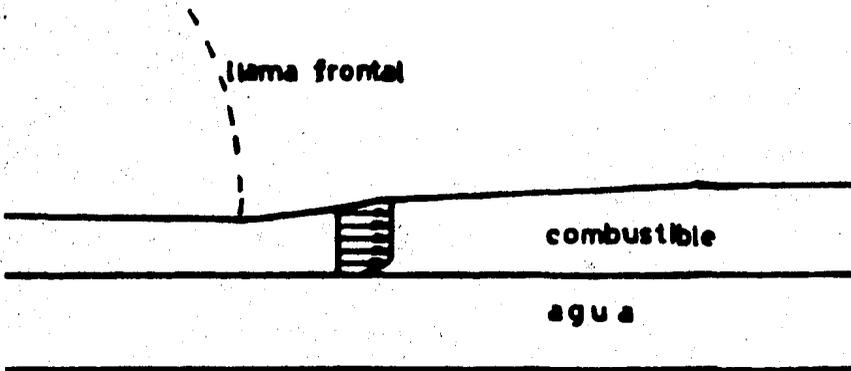


Fig 5.1 PERFILES DE VELOCIDAD PARA DOS ESPESORES DE COMBUSTIBLE

A N E X O

De un ajuste estadístico de datos se obtiene la curva $V_F = 1.9246 + 0.7211 \ln(e_c)$ con un ajuste del 97.22%, como puede observarse en la Tabla I para un espesor de combustible de 10 mm se tiene una velocidad de propagación de aproximadamente 1.9246 (cm/seg).

Asimismo después de 10 mm de espesor la diferencia entre ΔV_1 y ΔV_2 tiende a cero.

Por otro lado si derivamos V_F con respecto al espesor de combustible se obtiene que,

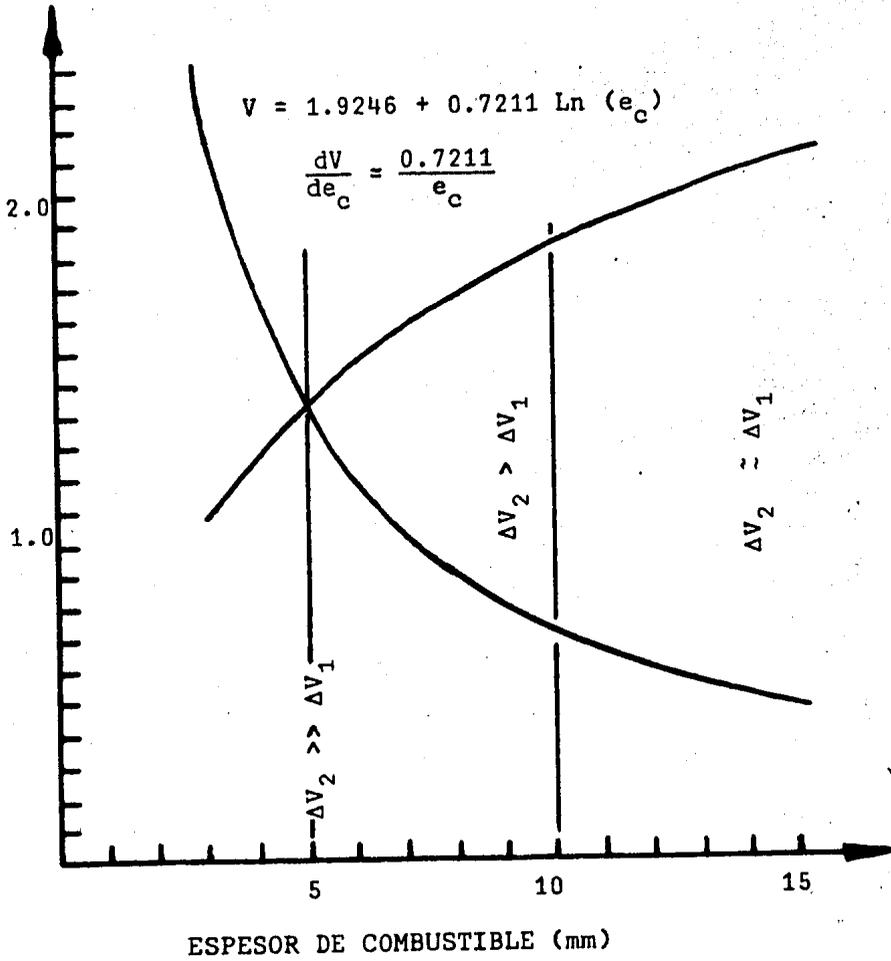
$$V_F' = \frac{dV_F}{de_c} = \frac{0.7211}{e_c}$$

con esto podemos observar la variación del proceso acelerativo de la llama con respecto al espesor de combustible.

Analizando las curvas correspondientes a V_F y a V_F' es posible caracterizar la curva de velocidad de propagación de la llama contra espesor de combustible como se muestra en la gráfica del anexo.

GRAFICA DEL ANEXO

Velocidad de propagación de la llama (cm/seg)
 Variación del proceso acelerativo en la propagación (seg^{-1})



Nota. En la ecuación que corresponde a V_F para obtener la velocidad de propagación en cm/seg se debe manejar a e_c en centímetros.

5.2b. INCREMENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS FASES GAS Y LIQUIDA
EN UN PUNTO FIJO.

A primera vista se tiene que el combustible es el medio transmisor de calor predominante, debido a un mecanismo de transporte convectivo. Sin embargo una vez que la llama cruza la localidad en cuestión se aprecia un incremento mayor en la temperatura en el gas que en combustible, así como una disminución de la temperatura del combustible.

El defasamiento que existe entre la llama frontal y la longitud Δx característica del efecto mecánico varia aproximadamente según cálculos de la siguiente forma:

$$\Delta x = \Delta v_{\text{prom}} \times t$$

$$\Delta x_{4\text{mm}} = 1.29 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 11.2 \text{ seg.}$$

$$\Delta x_{5\text{mm}} = 1.48 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 10.5 \text{ seg.}$$

$$\Delta x_{6\text{mm}} = 1.54 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 10.3 \text{ seg.}$$

$$\Delta x_{10 \text{ mm}} = 1.91 \frac{\text{cm}}{\text{seg}} \times 8.7 \text{ seg.}$$

Obteniéndose los siguientes valores:

$$\Delta x_{4\text{mm}} \doteq 14.45 \text{ cm.}$$

$$\Delta x_{5\text{mm}} \doteq 15.54 \text{ cm.}$$

$$\Delta x_{6\text{mm}} \doteq 15.86 \text{ cm.}$$

$$\Delta x_{10\text{mm}} \doteq 16.62 \text{ cm.}$$

Cada una de las cantidades anteriores representa una longitud característica relacionada con la cantidad de movimiento horizontal que antecede a la onda térmica (llama frontal).

Como la longitud característica va creciendo, se va creando en la superficie del combustible una zona propicia para que la llama frontal avance uniformemente.

Asimismo se puede apreciar en las gráficas 2, 3, 4, 5 que el defasamiento en el tiempo entre la onda mecánica y la térmica va disminuyendo, también se puede apreciar que la pendiente en el registro de la llama se hace más vertical.

Temp. amb. 20°C

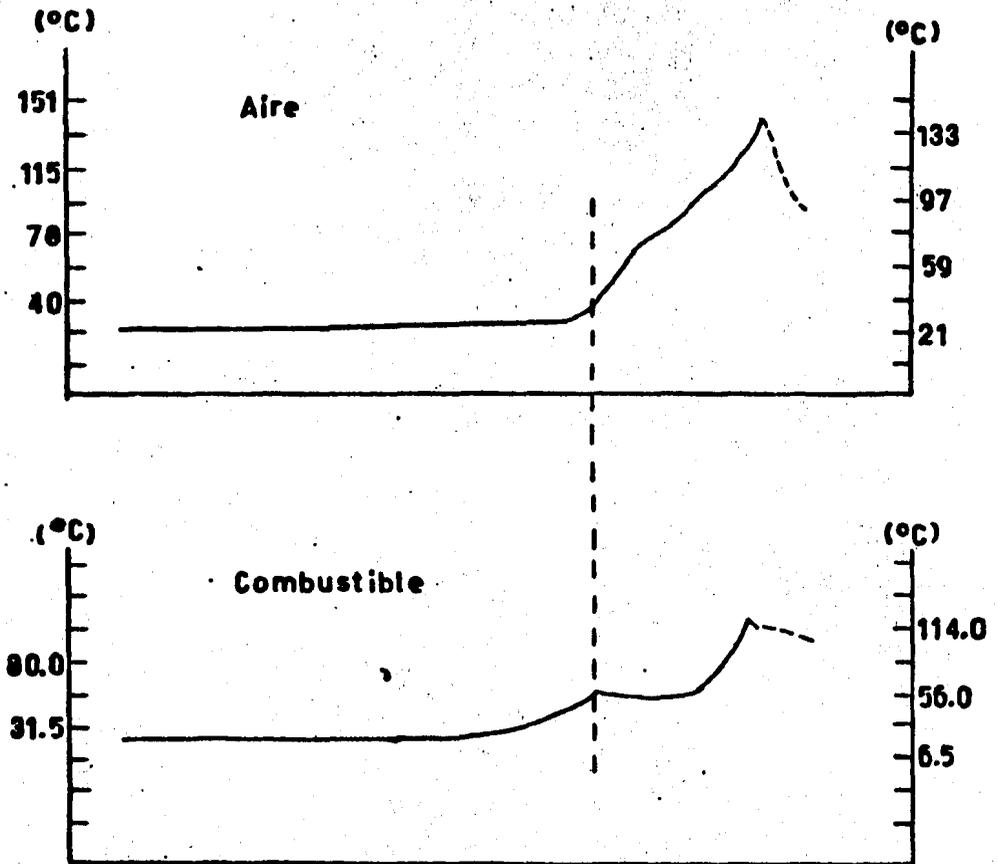
Temp. comb. 18.8°C

Temp. agua 18.0°C

Espesor comb. 4 mm

Espesor agua 45 mm

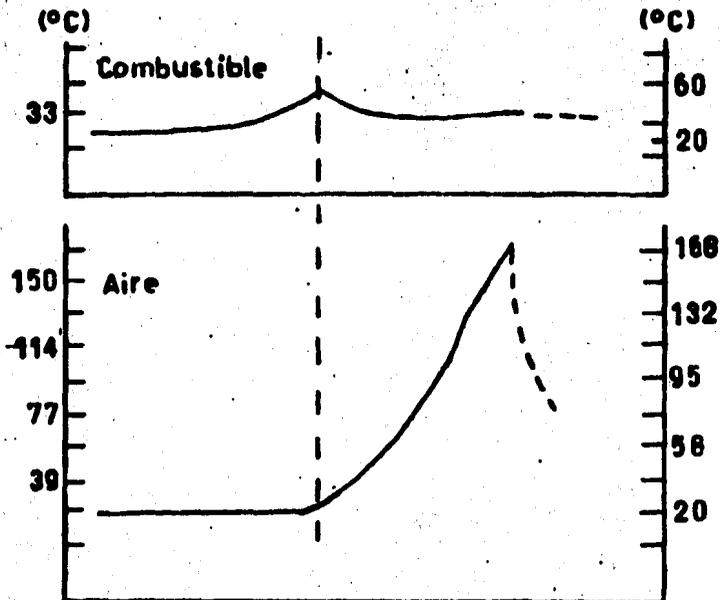
$\Delta t = 11.2$ seg



Gráfica 2. INCREMENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS FASES GAS Y COMBUSTIBLE

Temp. amb. 21°C
 Temp. comb. 19.8°C
 Temp. agua 19.2°C
 Espesor comb. 5 mm
 Espesor agua .45 mm

$\Delta t = 10.5 \text{ seg}$



Gráfica 3. INCREMENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS FASES GAS Y COMBUSTIBLE.

Temp. amb. 19°C

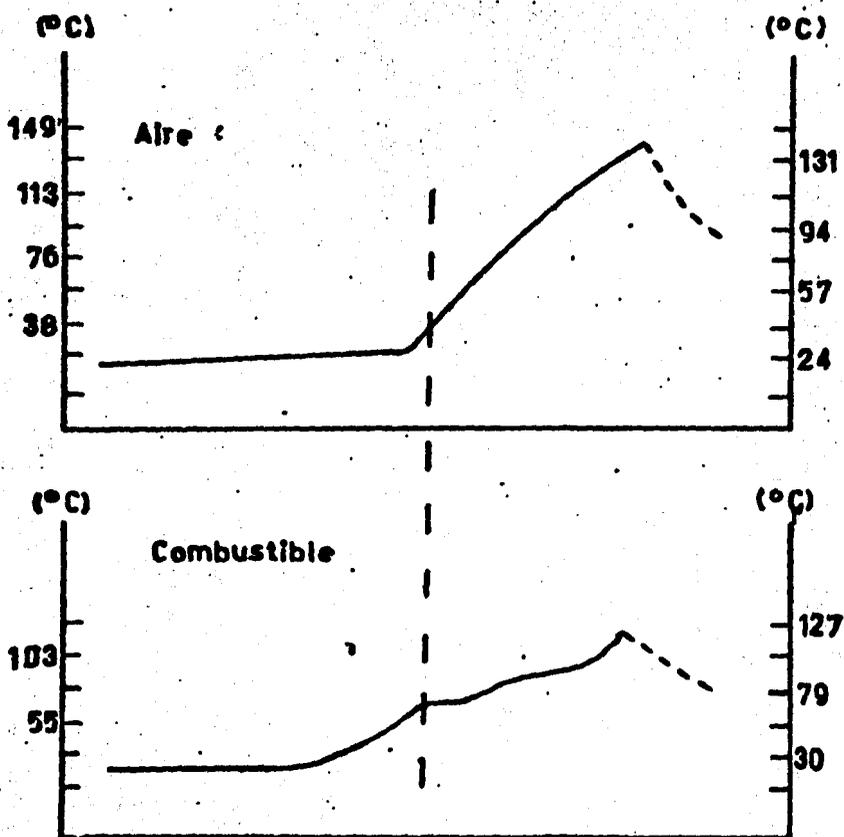
Temp. comb. 17.9°C

Temp. agua 17.4°C

Espesor comb. 6 mm

Espesor agua 45 mm

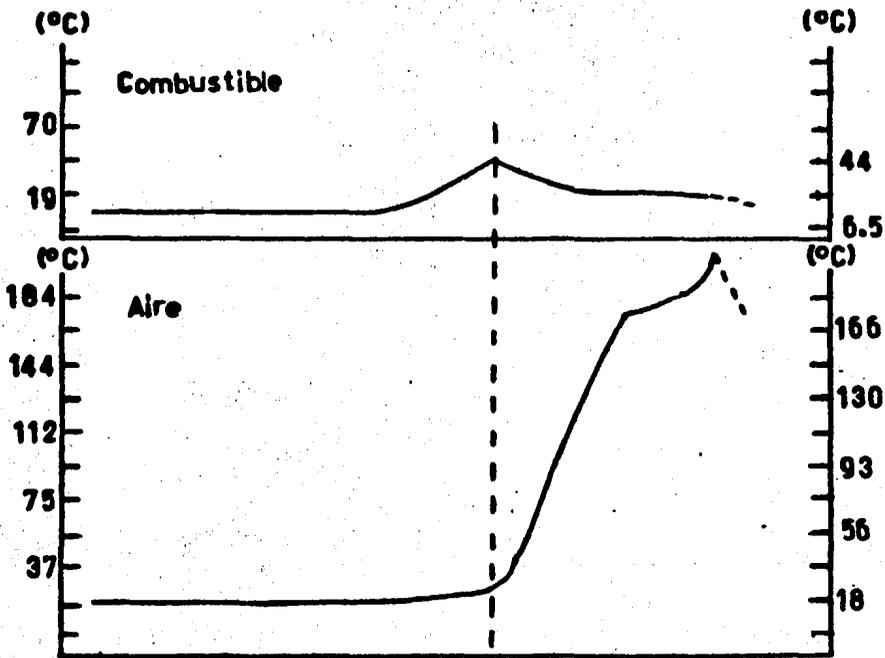
$$\Delta t = 10.3 \text{ seg}$$



Gráfica 4: INCREMENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS FASES GAS Y COMBUSTIBLE.

Temp. amb. 17.5°C
 Temp. comb. 16.4°C
 Temp. agua 16.0°C
 Espesor comb. 10.0 mm
 Espesor agua 45.0 mm

$\Delta t = 8.7$ seg



Gráfica 5. INCREMENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS FASES GAS Y COMBUSTIBLE.

5.2c. EL FENOMENO DE LAS MICROEXPLOSIONES.

Las microexplosiones pueden deberse a un proceso que empieza con la formación de pequeñas burbujas de combustible (o probablemente combustible y agua) en la superficie del mismo, debido al adelgazamiento del espesor de combustible por efecto de evaporación, así al formarse una finisima capa de combustible con una temperatura mayor de 100°C se origina la nucleación en la superficie del agua dando así origen a las microexplosiones.

Dicha nucleación ocurre en la interfase agua-combustible como resultado de un violento y repentino incremento en la temperatura de la interfase, esto fue observado introduciendo dos termopares en lugares ligeramente arriba y abajo de la interfase como puede apreciarse en la figura 5.2

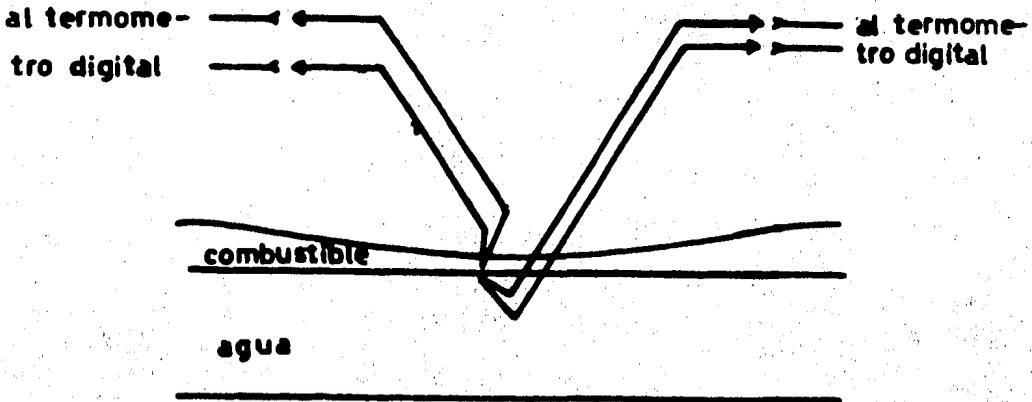


Fig 5.2. MONITOREO DE TEMPERATURA EN LA INTERFAZ COMBUSTIBLE- AGUA

Durante la reacción de microexplosiones se registraron temperaturas de 120°C y 60°C en el combustible y agua respectivamente.

Asimismo mediante mediciones de temperatura en el agua fué posible observar que mientras en la superficie del combustible se alcanza más de 130°C en el fondo del volumen de agua se tiene prácticamente la temperatura inicial de la misma, por ello es posible que en el agua exista una estratificación de temperaturas.

5.2d. EL FENOMENO DE PULSACION DE LA LLAMA FRONTAL.

Como puede observarse en la tabla I, la pulsacion de la llama es tá ligada en una proporción inversa al espesor de combustible.

La conjetura establecida por Dryer y Newman es adecuada sin embargo, cabe decir que este fenómeno no es fundamentalmente superficial.

Ahora bien, observando dos hechos que son los incrementos en la velocidad inicial de la llama y la pendiente en la superficie del com bustible, es posible pensar que el proceso acelerativo de la llama es tá ligado al desarrollo del perfil de velocidad del combustible de tal forma que dicho proceso acelerativo va disminuyendo conforme el espesor aumenta en condiciones iniciales, los siguientes dibujos tratan de explicar esto (figs. 5.3 (a) y 5.3 (b))

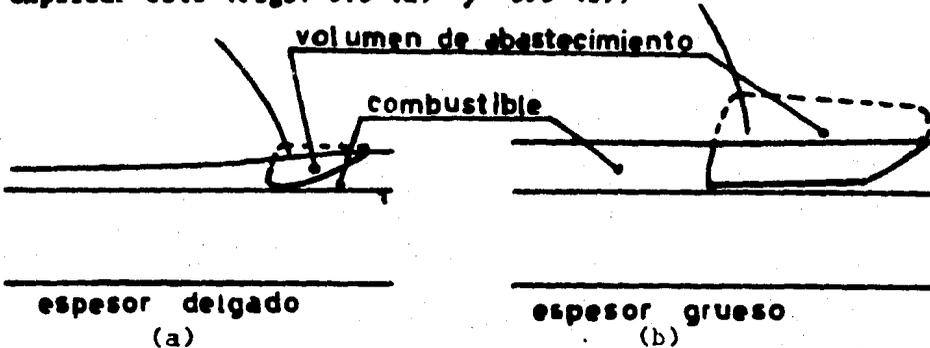


Fig 5.3 RELACION DEL ESPESOR DE COMBUSTIBLE CON EL VOLUMEN DE ABASTECIMIENTO

A su vez esto puede deberse a las condiciones de flujo desarrollado a través de un espesor crítico de combustible, influyendo

también en alguna medida el gradiente en la tensión superficial del combustible.

En cierta forma es posible pensar que con una delgada capa de combustible del orden de 3.5 mm no puede el combustible obtener un perfil desarrollado de velocidad por que se lo impide la tensión superficial en la interfase agua-combustible, no sucediendo así para espesores mayores del orden de 8 mm.

Por otro lado, lo anterior se puede confirmar a partir de la variación de la temperatura de la llama con respecto al tiempo en las gráficas de variación de la temperatura en un punto fijo, pues como puede apreciarse a medida que el espesor de combustible aumenta la pendiente de las gráficas de temperatura contra tiempo se hace más vertical y esto manifiesta la forma de avance continuo por parte de la llama.

5.2e. MOVIMIENTOS QUE PRESENTA EL COMBUSTIBLE BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE LIBERTAD DE FLUJO AL COMBUSTIBLE Y AL FUEGO.

a) Ignición central de combustible.

Empleando las charolas con que se estudiaron las microexplosiones es posible observar el flujo de combustible, con este primer modelo se observa la siguiente conducta del fluido (figura 5.4)

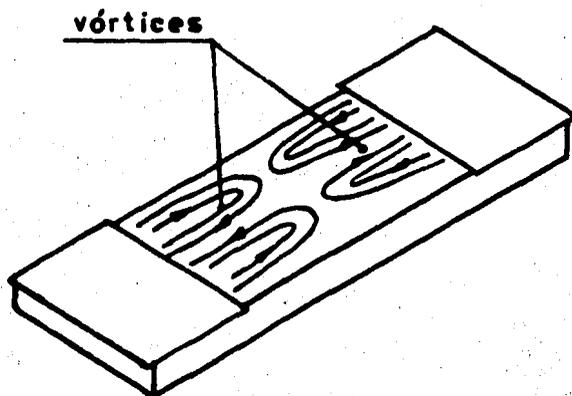


Fig 5.4 CONFIGURACION EMPLEADA PARA EL ESTUDIO DE VORTICES

Esta configuración se tiene para fuego plenamente desarrollado en la región central, además el combustible en la zona de combustión casi no tiene intercambio con el resto del mismo, lo anterior se concluye ya que después de un adelgazamiento de la capa del mismo por efecto de vaporización sobrevienen las explosiones y finalmente la extinción de

la llama, quedando una gran cantidad de combustible que vuelve a configurar una capa de espesor constante.

La conducta del combustible puede ser causada por efectos de presión de los gases.

b) Ignición central de combustible.

Con esta configuración se da más libertad al flujo de combustible observándose una formación de líneas de trayectoria bastante interesante como se muestra en la figura 5.5

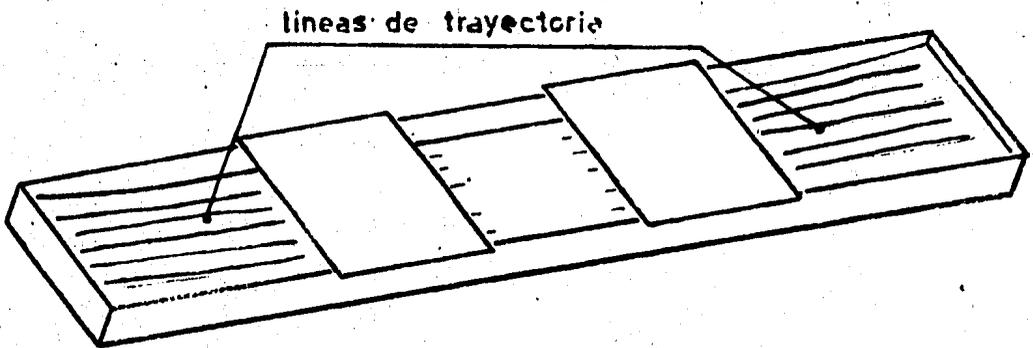


Fig 5.5 FÓRMACION DE LINEAS DE TRAYECTORIA Y OBSERVACION DE LA PENDIENTE EN LA SUPERFICIE DEL COMBUSTIBLE

Las líneas mencionadas se van configurando con el paso del tiempo a lo largo del recipiente, y una vez que han abarcado toda la longitud del recipiente parece observarse una circulación de combustible hacia la llama en la interfase combustible-agua, esto sugiere una

recirculación en planos verticales pero con la característica de que la cantidad de materia que sale de la región en combustión es mayor que la que entra, esto se concluye debido a que la pendiente en la superficie del combustible se incrementa con el paso del tiempo, como se aprecia en la figura 5.6

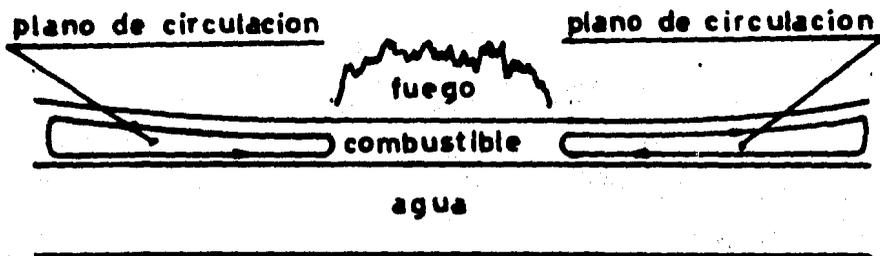


Fig 5.6 FORMACION DE PLANOS DE RECIRCULACION VERTICALES A TRAVES DEL COMBUSTIBLE

IGNICION DEL COMBUSTIBLE EN UN EXTREMO DE LA CHAROLA.

Con esta configuración puede apreciarse mejor la recirculación de la figura anterior por parte del combustible, también se observa que dicho movimiento recirculante en el combustible se produce

inicialmente en una región cercana a la llama pero ocupa más espacio conforme el tiempo transcurre, este desarrollo se muestra en las figuras (5.7 (a) y 5.7 (b))

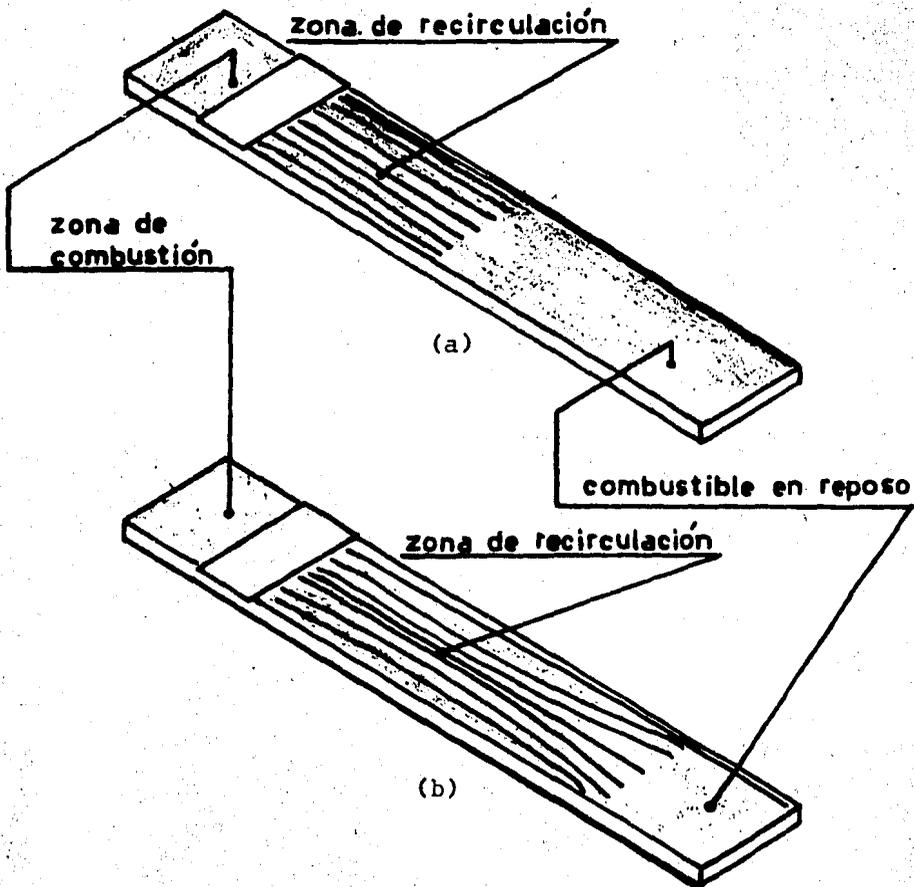


Fig 5.7 EXTENSION DE LA ZONA DE RECIRCULACION
CON EL PASO DEL TIEMPO

5.3 CONCLUSIONES.

Es interesante evaluar el orden de magnitud de algunos números adimensionales tales como Reynolds, Froude, Prandt, Peclet y Grashoff.

Haciendo uso de los resultados obtenidos experimentalmente y del apéndice B podemos formar la tabla II.

T A B L A II

Espesor de comb (mm)	$\bar{A}\bar{v}$ (cm/seg)	$\bar{A}\bar{x}$ (cm)	AT (°C)	$\beta \times 10^{-6}$ (°C ⁻¹)	$\nu \times 10^{-3}$ (cm ² /seg)	$\alpha \times 10^{-3}$ (cm ² /seg)
4.0	1.29	14.45	41.2	505.530	28.5	0.780
5.0	1.48	15.54	40.2	500.830	28.5	0.780
6.0	1.54	15.86	42.1	500.830	28.5	0.780
10.0	1.91	16.62	33.6	507.470	34.00	0.795

En base a la tabla superior podemos evaluar dichos números recordando que:

$$Re = \frac{(\Delta\bar{v})(\Delta\bar{x})}{\nu}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

$$Fr = \frac{(\Delta\bar{v})^2}{g \Delta\bar{x}}$$

$$Pe = Re \times Pr$$

$$Gr = \frac{\beta \Delta T g (\Delta x)^3}{\nu^2}$$

$$Pe = \frac{(\Delta\bar{v})(\Delta x)}{\alpha}$$

Recordando también que el coeficiente de expansión volumétrica puede ser evaluado de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\Delta V}{\Delta T} \right)_P$$

La tabla III ilustra los valores correspondientes a dichos números:

T A B L A III

Re	Fr (X 10 ⁻⁶)	Pr	Pe (X 10 ⁺³)	Gr (X 10 ⁻⁹)
654.05	117.393	36.538	23.900	758.974
806.99	143.682	36.538	29.486	912.533
857.00	152.430	36.538	31.313	713.827
933.65	223.752	45.074	39.930	664.284

Es muy probable que el gradiente en la tensión superficial origine que el combustible en la superficie desarrolle una mayor velocidad que las regiones más profundas, dándose dicho perfil en un régimen laminar.

Asimismo la razón de la difusividad del momentum (ν) a la difusividad térmica (α) es del orden de 40, esto se puede apreciar de las gráficas de incremento de la temperatura en el gas y en el combustible a través de la pendiente de dichas curvas hasta el momento en que aparece la llama (pico en la gráfica correspondiente al combustible $\approx 55^\circ\text{C}$), para el fenómeno de propagación en fase líquida es de esperar este tipo de magnitudes no así en la fase de gas en donde $Pr=0(1)$.

La conducta de la disminución de la temperatura del combustible en el punto definido por la posición del termopar dentro del combustible puede ser explicada en términos de efectos de fuerzas de empuje, de tal forma que el combustible subsuperficial cercano a la superficie se desplaza en el sentido de la propagación de la llama y el combustible que se encuentra en capas más profundas tiende a ocupar el lugar vacante.

Por otro lado se confirma que la propagación de la llama es de tipo difusivo pues se puede estimar a grosso modo el tiempo de mezclado y el tiempo de reacción, observándose que el primero es del orden de 9 segundos y el segundo de 2 a 3 segundos aproximadamente (tomando como referencia el tiempo que demora la llama en alcanzar 60°C en promedio).

5.4 RECOMENDACIONES

Recomendaciones respecto a estudios de la velocidad de propagación de la llama para este tipo de estudios.

Para poder hablar de velocidad de propagación de la llama es necesario definir algunos aspectos para considerar bueno un experimento realizado, dichos aspectos son:

- 1) No debe haber una cantidad significativa de residuos quemados en el combustible al final de cada prueba.

Cuando esto se presenta es bastante seguro que la respuesta de cada termopar se da en forma diferente, es necesario ver que esto no es inherente al transductor sino al fenómeno de propagación de la llama, y dicha respuesta como se ha visto en este trabajo está ligada al proceso acelerativo de la llama que se propaga.

Para ejemplificar esto, se presenta la forma en que fué observada la variación de la señal registrada en cada detector-transductor y en dicha señal grabada se puede medir un periodo de tiempo de finido por un parámetro llamado "psi" (Ψ), graficamente se tiene la siguiente conducta de cada termopar (figura 5.8).

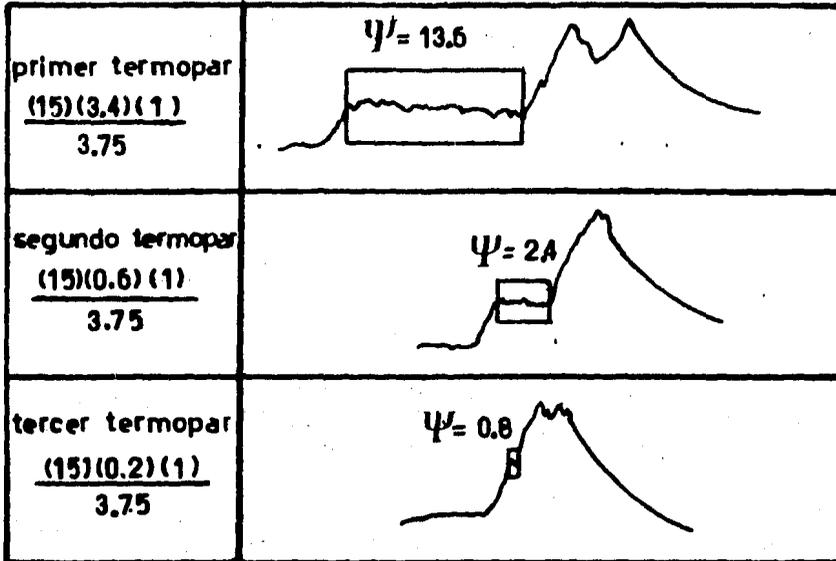


Fig 5.8 VARIACION DEL PARAMETRO Ψ PARA CADA TERMOPAR DURANTE UNA PRUEBA

Los valores aproximadamente de psi para los espesores de 3, 4, 5 y 6 mm se dan a continuación:

Para 3 mm se tiene

$$\Psi_1 = 13.6 \text{ seg.}$$

$$\Psi_2 = 2.4 \text{ seg.}$$

$$\Psi_3 = 0.8 \text{ seg.}$$

Para 4 mm se tiene

$$\Psi_1 = 3.2 \text{ seg.}$$

$$\Psi_2 = 0.8 \text{ seg.}$$

$$\Psi_3 = \text{casi cero.}$$

Para 5 y 6 mm los valores son prácticamente cero.

2) Es recomendable realizar pruebas como las correspondientes a la variación de la temperatura en un punto fijo en el combustible y gas, para definir más adecuadamente y con mas fundamentos la referencia de voltaje que corresponde a la temperatura de la llama frontal para el combustible específico.

A continuación en la figura 5.9 (a), (b) se presentan dos opciones bastante factibles en el aspecto de instrumentación de posible empleo:

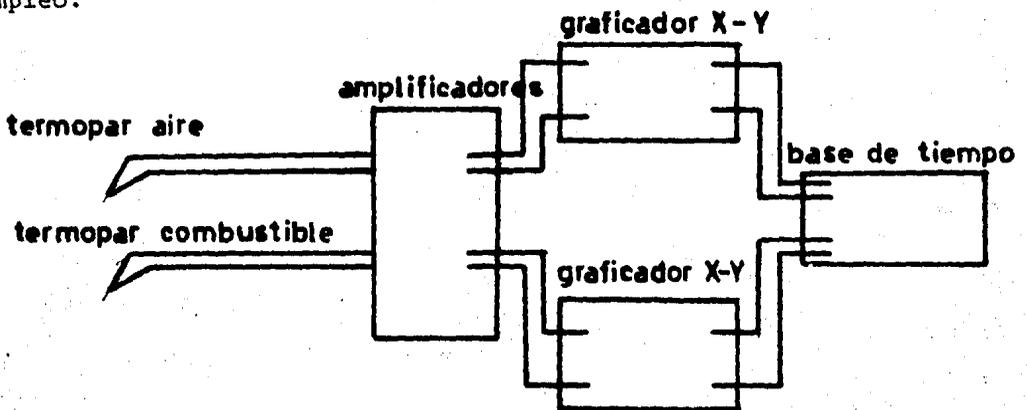


Fig 5.9 (a) ESTUDIO DE GRAFICADORES

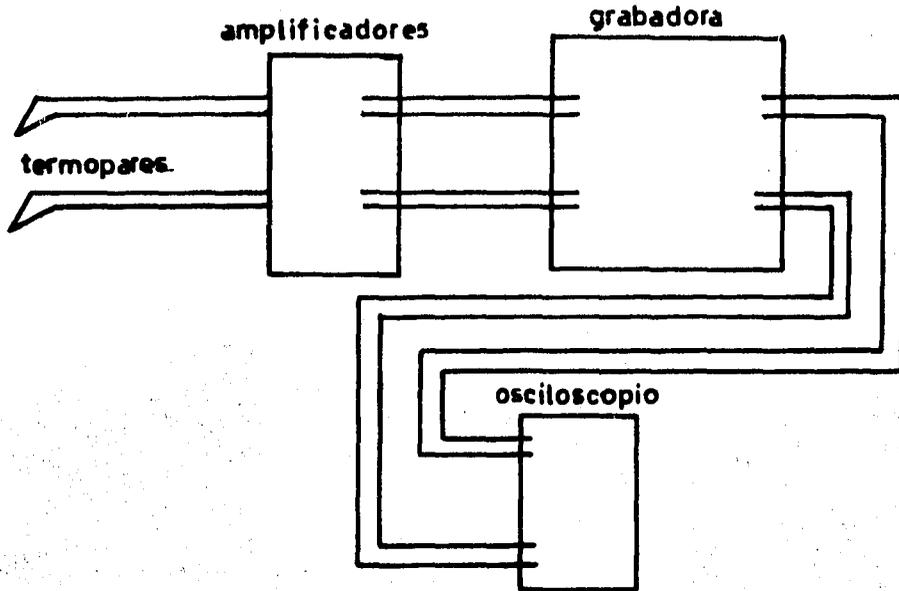


Fig 5.9 (b) ESTUDIO CON GRABADORA Y OSCILOSCOPIO

Las recomendaciones en la instrumentación electrónica son:

- 1) Es deseable introducir dos modificaciones que mejorarán la adquisición de datos, esto consiste en:
 - a) Inyectar una señal en el cuarto canal de la grabadora con el voltaje correspondiente al producido por la llama frontal al cruzar el termopar, considerando por supuesto el factor de amplificación de la señal original de tal forma que se pueda tener la referencia de voltaje junto con toda la historia del experimento como se ilustra

en la figura 5.10.

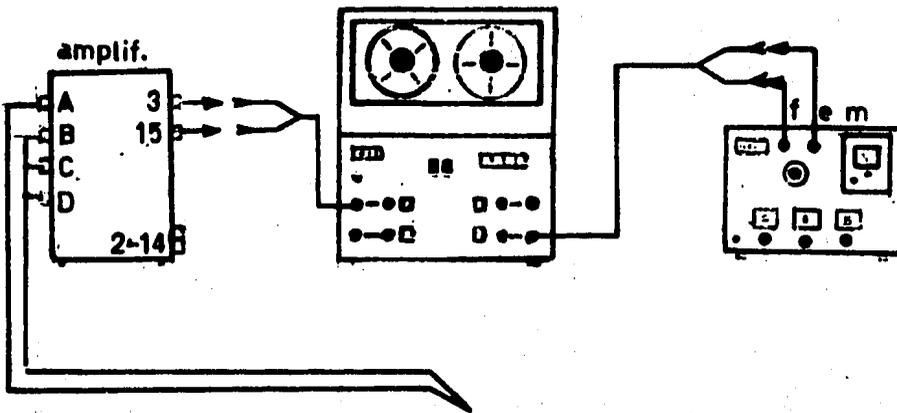


Fig. 5.10 INYECCION DE UNA SEÑAL DE VOLTAJE EQUIVALENTE A LA CAUSADA POR LA LLAMA AL PASAR POR EL DETECTOR.

b) El estudio de gabinete de las señales será mucho mejor, si el nivel de disparo en el osciloscopio se hace externo y del valor del voltaje equivalente al producido por la llama frontal como se ilustra en la figura 5.11, esto reduce notablemente la incertidumbre en la medición de los intervalos de tiempo.

Por otro lado también es necesario contar con un equipo básico para separar las fracciones de combustible y agua, con el fin de recuperar el combustible y no contaminar drenajes, y darle algún uso al combustible no quemado.

Para esto deberán estimarse aproximadamente los volúmenes a manejar tanto de agua como de combustible.

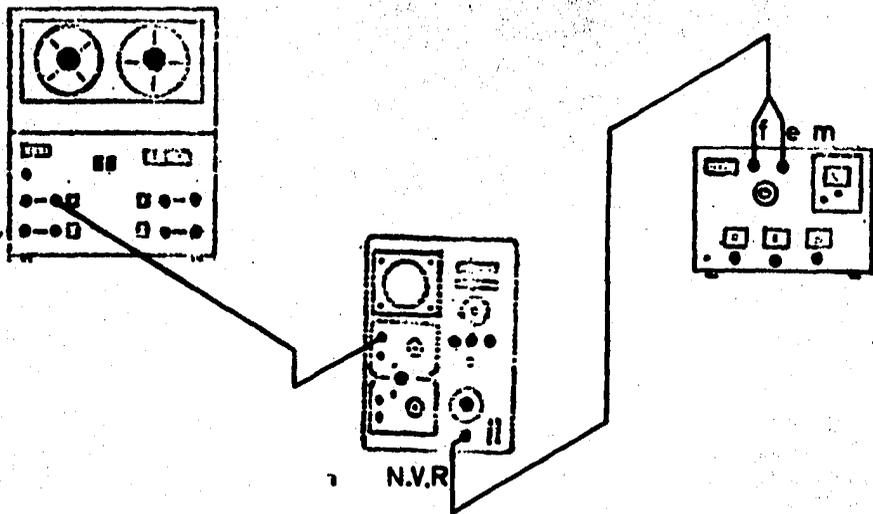


Fig 5.11 ESTUDIO DE LA SEÑAL GRABADA CON DISPARO EXTERNO EN EL OSCILOSCOPIO

APENDICE A

CARACTERISTICAS	ANALISIS TIPICO	METODO ASTM
Color ASTM	2.000	D-1500-64
Peso especific a 20/4 C	0.852	D-1289-67
Temp de inflamacion C	77	D- 93-73
Temp de congelacion C	6	D- 97-66
Viscosidad S.U.S. a 37.8 C	38	D- 88-56
Azufre Tot % en peso	1.00	D- 129-6
Indice de Cetano	52	D- 976-66
Carbon Ramsbottom (En 10 % residuo), % peso	1.00	D- 129-64
Aqua y Sedimento,% vol	0.05	D-1796-68
Destilacion		D- 86-67
Temp inic de ebullicion C	185	
10% destila a C	225	
50% destila a C	287	
90% destila a C	344	
Temp final de ebullicion C	371	
Poder calorifico neto Kcal/kg	10680	

APLICACIONES

Combustible automotriz
e industrial

MANEJO

Autotanques y
carrotaques

A P E N D I C E B

Los datos proporcionados por PEMEX pueden servir para obtener la clasificación en grados API correspondientes al diesel, pero haciendo las siguientes consideraciones:

Peso específico a 20/4°C lo podemos considerar que es aproximadamente del orden del peso específico a 60/60°F.

La consideración anterior se fundamenta en que el peso específico del agua a 4°C es igual a 1.000 000 en tanto que el peso específico a 60°F es igual a 0.999 . Luego entonces la variación del peso específico del combustible será insignificante.

Por otro lado hay que recordar que dicho destilado varia en un rango acorde a las suposiciones hechas, por lo que la aproximación anterior puede considerarse buena.

Aceptando lo anterior, para obtener los grados API para el diesel se tiene la siguiente conversión:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{peso específico a } 60/60^{\circ}\text{F}} - 131.5$$

Del apéndice A se tiene que el peso específico del diesel a 20/4 (°C) es de 0.852, tomando la consideración anterior, se tiene

que

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{0.852} - 131.5$$

El valor correspondiente es $^{\circ}\text{API} = 34.58$, del libro de Kern (pag 926) para viscosidades de petroleo tenemos dos opciones que son:

34 $^{\circ}$ API que corresponde a crudo continental.

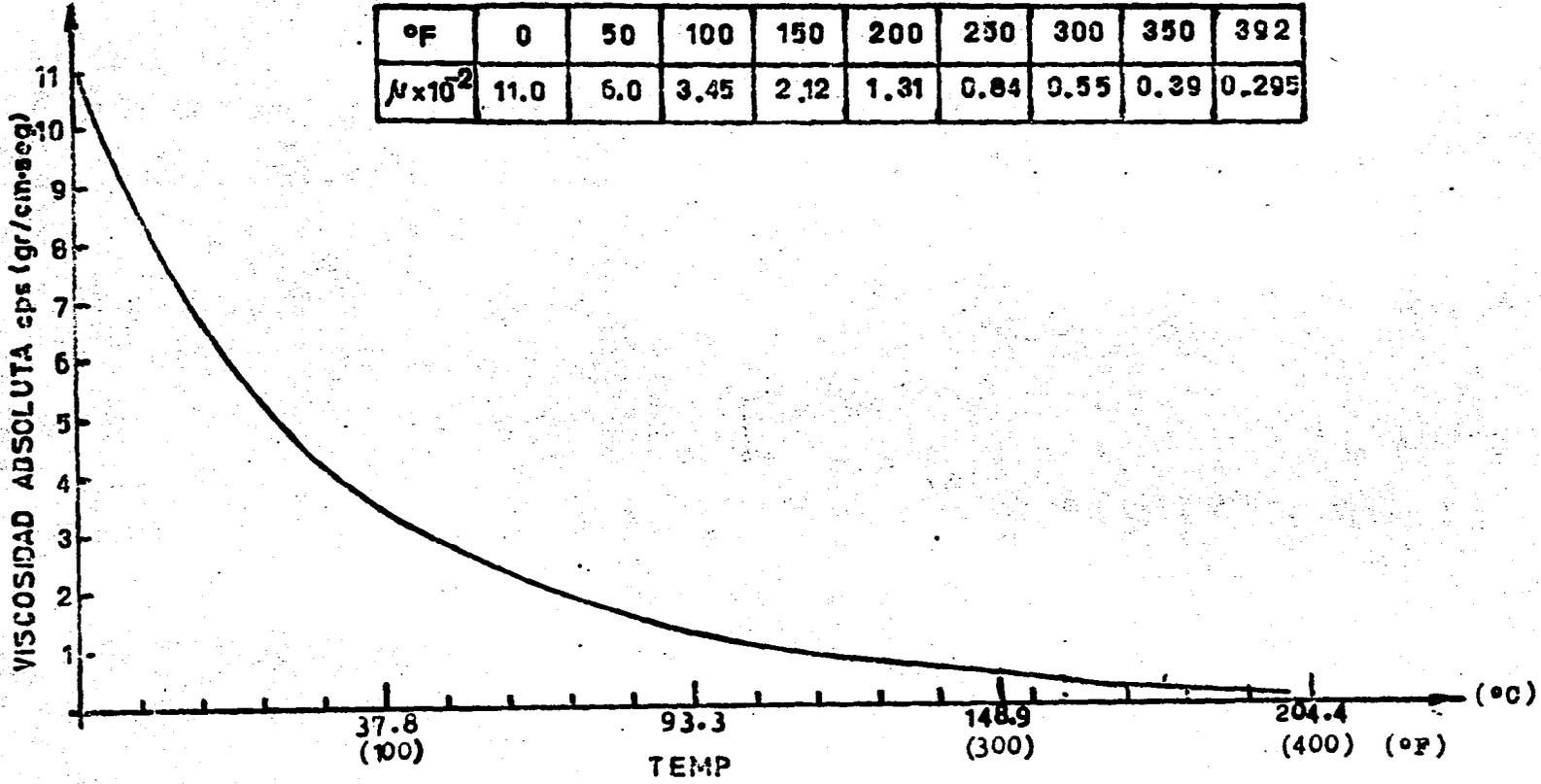
35 $^{\circ}$ API que corresponde a destilado.

El criterio a seguir es considerar que el diesel corresponde a 35 $^{\circ}$ API.

Tomando como fundamento lo anterior se procede a formar las gráficas de viscosidad absoluta, gravedad específica, viscosidad cinemática, difusividad térmica, densidad en Lb/pie^3 correspondiente a destilado o sea 35 $^{\circ}$ API.

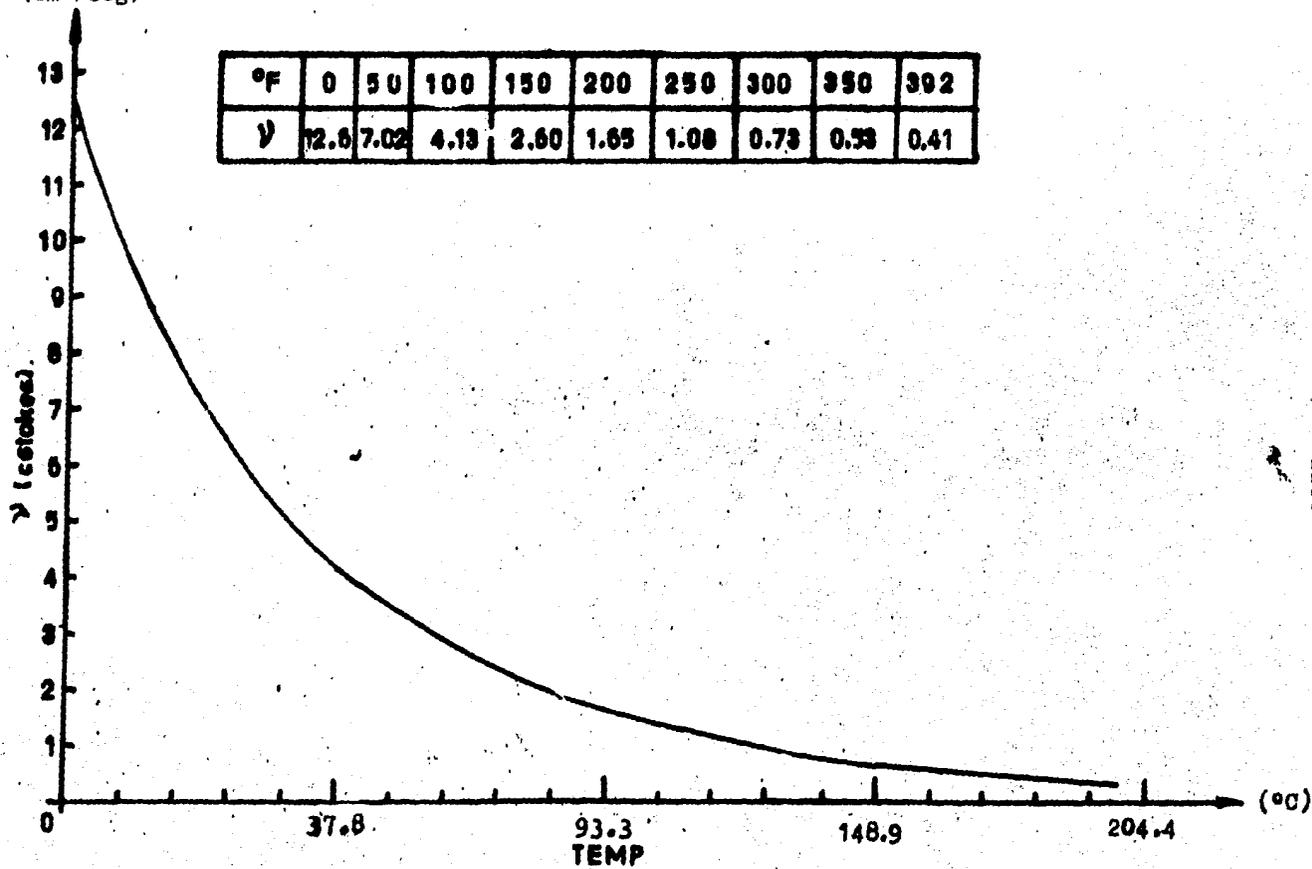
GRAFICA DE VISCOSIDAD ABSOLUTA PARA COMBUSTIBLES 35° API.

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	392
$\mu \times 10^{-2}$	11.0	6.0	3.45	2.12	1.31	0.84	0.55	0.39	0.295



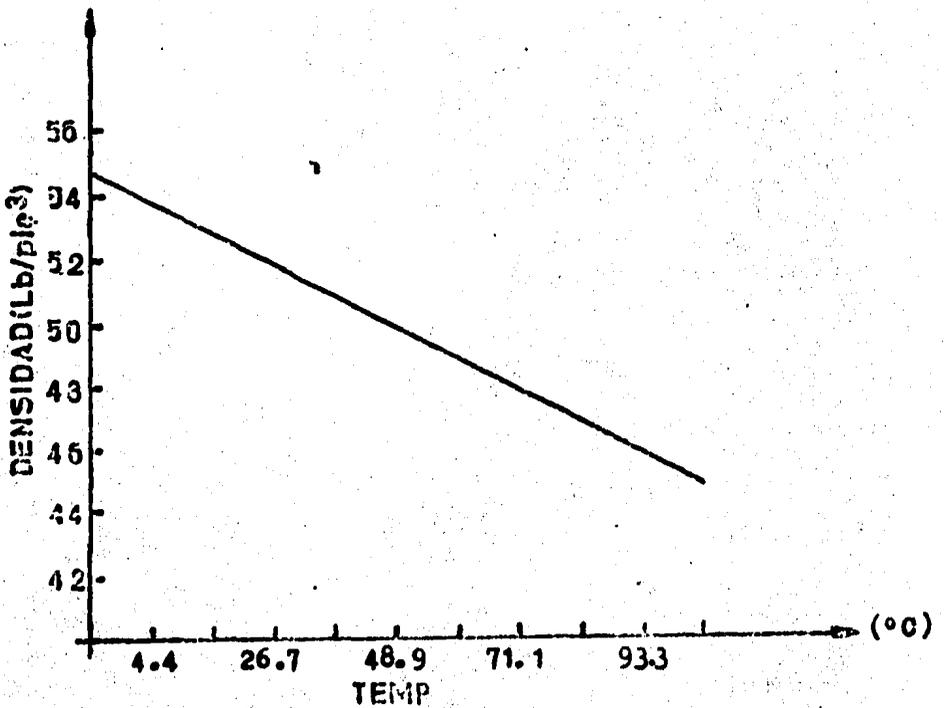
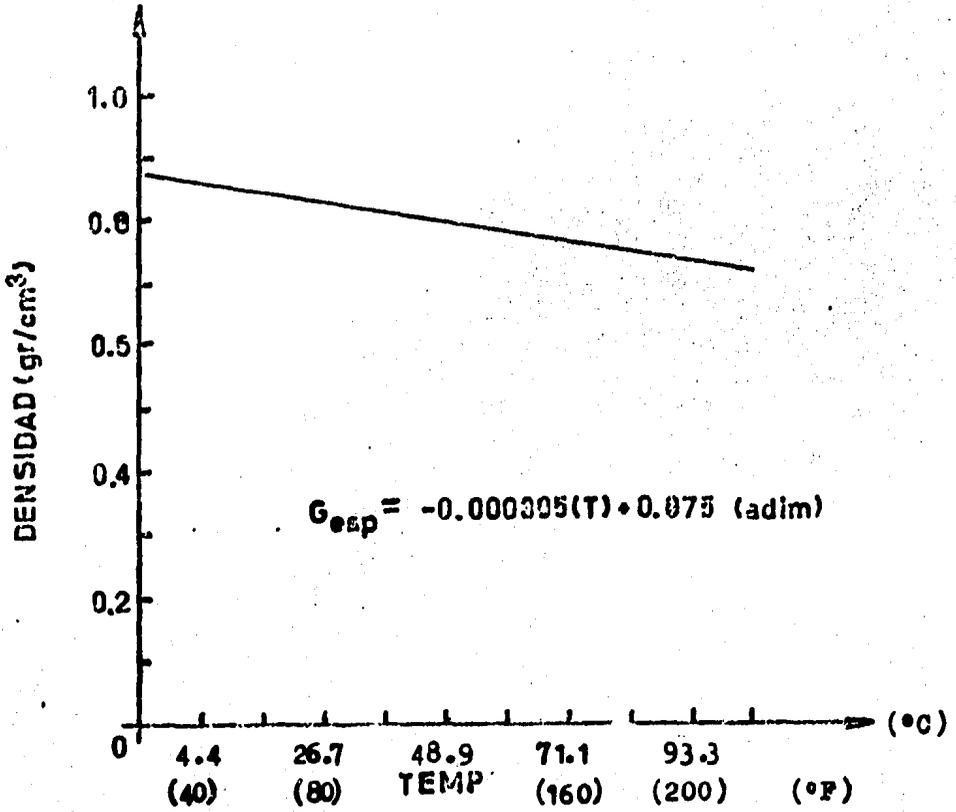
GRAFICA DE VISCOSIDAD CINEMATICA PARA COMBUSTIBLE 35° API.

(cm²/seg)

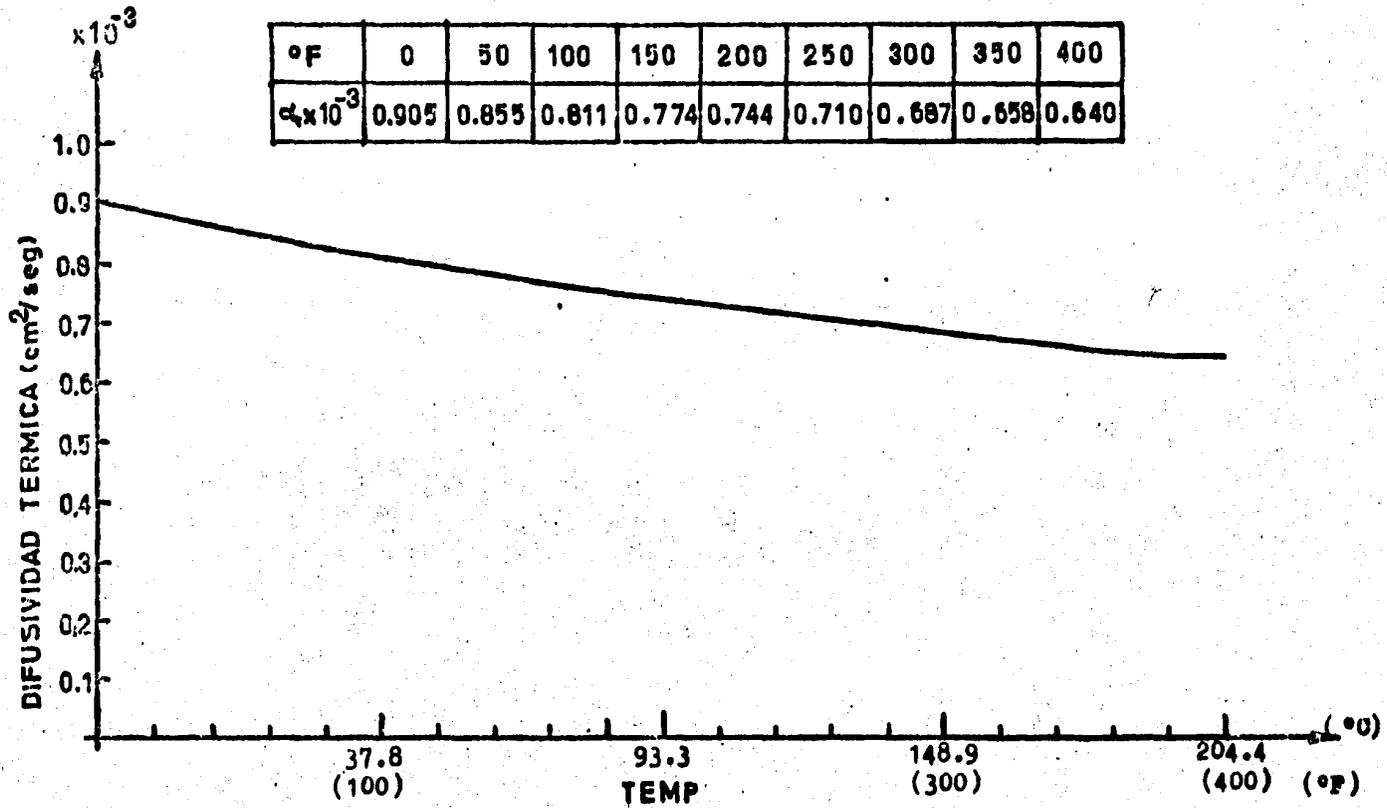


116

GRAFICA DE GRAVEDAD ESPECIFICA Y DENSIDAD PARA COMB 15° API.



GRAFICA DE DIFUSIVIDAD TERMICA PARA COMBUSTIBLE 35° API.



Memoria de Cálculos

La viscosidad absoluta se obtiene de la figura 14 pag. 928 del libro de Kern, obteniéndose los siguientes valores:

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	392
μ cps	11.0	6.0	3.45	2.12	1.31	0.84	0.55	0.39	0.295

La gravedad específica para destilado a 35°API se obtiene de la gráfica de gravedad específica a 60°/60° contra temperatura, figura 6 pag 914 libro de Kern, los valores correspondientes son:

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	392
gravedad es- pec. a 60/60	0.875	0.855	0.835	0.815	0.795	0.775	0.755	0.737	0.717

Luego entonces la viscosidad cinemática la obtenemos de la razón de la viscosidad absoluta a la gravedad específica*, ya que en este caso la gravedad específica es igual a la densidad del combustible en gr/cm^3 .

* ambas a la misma temperatura.

Es decir que

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	392
v stokes	12.57	7.02	4.10	2.60	1.65	1.08	0.73	0.53	0.41

A partir de la gravedad específica a 60°/60°F podemos obtener la densidad en Libras/pie³ para el destilado 35°API, recordando que la densidad del agua es de 62.5 Lb/pie³, por lo tanto la densidad del combustible es igual al producto de la gravedad específica por la densidad del agua, es decir:

$$\rho_{\text{comb}} = 62.5 \left(\frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3} \right) \times \text{gravedad específica a } 60^\circ/60^\circ\text{F}$$

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	392
ρ Lb/pie ³	54.69	53.44	52.19	50.94	49.69	48.44	47.19	46.06	44.81

La conductividad térmica para destilado 35°API la obtenemos de la figura 1 pag 908 libro de Kern con los siguientes valores

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	400
K(BTU/hr (pie ²) (°F/pie))	0.0802	0.079	0.0779	0.0767	0.0755	0.0742	0.0731	0.0719	0.0708

El calor específico para destilado 35°API lo obtenemos de la figura 4 página 911 Libro de Kern, para lo que se calcula previamente el factor de caracterización

El factor de caracterización es una constante que se define como la razón de la raíz cúbica del promedio de los puntos de ebullición absolutos a las gravedades específicas, esto es:

$$k = \frac{T_B^{1/3}}{S}$$

en donde

T_B : Punto de ebullición promedio en grados Rankine

S: Gravedad específica a 60°/60°F

$$T_B = \frac{\text{Temp. inic. de ebullición} + \text{Temp. final de ebullición}}{2}$$

$$T_B = \frac{T_{ie} + T_{fe}}{2}$$

del apéndice A

$$T_{ie} = 185^{\circ}\text{C} = 85^{\circ}\text{R}$$

$$T_{fe} = 371^{\circ}\text{C} = 1159.8^{\circ}\text{R}$$

$$\text{Luego entonces } k = \frac{(1159.8 + 825)^{1/3}}{2^{1/3}(0.852)}$$

finalmente $k = 11.707$

Entrando en la gráfica auxiliar de la figura 4 con $k = 11,707$ e intersectando la curva de la gráfica se encuentra un factor de corrección de 0.995 aprox. Es decir que el c_p para el combustible debe multiplicarse por dicho factor de corrección..

Se tiene que el calor específico para destilado 35°API varía según la siguiente tabla:

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	400
$C_p(\text{BTU}/(\text{Lb})(^{\circ}\text{F}))$	0.420	0.448	0.477	0.505	0.530	0.560	0.585	0.615	0.640
C_p corregido	0.418	0.446	0.475	0.502	0.527	0.557	0.582	0.612	0.637

Para no tener problemas con la conversión en la obtención de la difusividad térmica, además de no involucrar más errores de cifra por dicha conversión se calcula a continuación la difusividad térmica en pie^2/hr , de la siguiente forma

$$\alpha = \frac{K}{\rho c_p} = \frac{\frac{\text{BTU pie}}{\text{hr-pie}^2 \text{ OF}}}{\frac{\text{Lb}}{\text{pie}^3} \frac{\text{BTU}}{\text{Lb F}}} = \frac{\text{BTU-pie}^3 \text{ OF}}{\text{hr-pie}^2 \text{ OF BTU}}$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho c_p} \left[\frac{\text{pie}^2}{\text{hr}} \right]$$

y posteriormente se convierte a $\alpha \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{seg}} \right]$ lo que resulta más fácil.

Los resultados son:

°F	0	50	100	150	200	250	300	350	400	
α $\left[\frac{\text{pie}^2}{\text{hr}} \right]$	3.508	3.315	3.142	2.999	2.883	2.75	2.662	2.551	2.48	X 10 ⁻³
α $\left[\frac{\text{cm}^2}{\text{seg}} \right]$	0.905	0.855	0.811	0.774	0.744	0.710	0.687	0.658	0.64	

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

Francis Wilfrid, "Los Combustibles y su Tecnología".

"Combustion Handbook", The North American Manufacturing Co.

Irving Glassman, "Combustion", Edit. Academic Press.

Frank M. White, "Fluid Mechanics", Edit. McGraw-Hill Book Co.

F.A. Williams, "Mechanism of Fire Spread", Department of Applied Mechanism and Engineering Sciences, University of California, San Diego, La Jolla California.

W.A. Sirignano, "A Critical Discussion of Theories of Flame Spread Across Solid and Liquid Fuels", Combustion Science and Technology, 1972, Vol. 6.

K. Akita and O. Fujiwara, "Pulsating Spread Along the Surface of Liquid Fuels", Combustion and Flame, 1971, Vo. 17.

F.L. Dryer and J.S. Newman, "Flame Spread Over Liquid Fuels, The Mechanism of Flame Pulsation", Presentado en: Fall Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute, La Jolla, California, 1976, Paper No. WSCI-76-48.

Kern, "Procesos de Transferencia de Calor".

Giuliano Salvi, "Procesos de Combustión".

E.M. Twardus, T.A. Brzustowski, "The Burning of Crude Oil Spilled on Water", Archivum Combustion, Vol. I, University of Waterloo, Canada, 1981.

R E F E R E N C I A S

1. W.A. Sirignano and I. Glassman, "Flame Spreading Above Liquid Fuels: Surface Tension-Driven Flows", Combustion Science and Technology, 1970, Vol. 1.
2. Warren W. Hillstrom, "Flame Spreading Over Liquid Fuels", Combustion Science and Technology, 1975.
3. R. Mackinven, J.G. Hansel and I. Glassman, "Influence of Laboratory Parameters of Flame Spread Across Liquid Fuels", Combustion Science and Technology, 1970, Vol. 1.