



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO



Facultad de Estudios Superiores  
CUAUTITLAN

VALIDACION DE UNA METODOLOGIA EXPERIMENTAL  
PARA CARACTERIZAR FLUIDODINAMICAMENTE  
QUEMADORES USADOS EN GENERADORES DE VAPOR

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A :  
JOSE LUIS CORDERO TERCERO

ASESORES:

M. I. JOSE OSCAR MARTINEZ FLORES (IIE)

ING. J. ANTONIO SANCHEZ GUTIERREZ (FES-C)

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

JUQUILA, OAXACA, OAXACA, ESTADO DE MEXICO.

1996

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis 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.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.  
FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE  
EXAMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JAIME KELLER TORRES  
DIRECTOR DE LA FEB-CUAUTITLAN  
P R E S E N T E .

AT'N: Ing. Rafael Rodríguez Ceballos  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la F.E.S. - C.

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS TITULADA:

Validación de una metodología experimental para caracterizar  
fluidodinámicamente quemadores usados en generadores de vapor.

que presenta el pasante: José Luis Cordero Tercero  
con número de cuentas: 8410312-3 para obtener el TITULO de:  
Ingeniero Mecánico Electricista .

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 9 de Enero de 1996

PRESIDENTE	Ing. Daniel Hernández Pecina	<i>[Firma]</i> 9/1/96
VOCAL	Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez	<i>[Firma]</i> 9/1/96
SECRETARIO	Ing. Carlos Crocco Penneyra	<i>[Firma]</i> 15-1-96
PRIMER SUPLENTE	Ing. Bernardo Muñoz Martínez	<i>[Firma]</i> 18-I-96
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. Emilio Juárez Martínez	<i>[Firma]</i> 18/1/96

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO (UNAM)**, expreso mi más sincero agradecimiento y de manera muy especial a la **FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES. CUAUTITLAN (FES-C)** por haberme brindado la oportunidad del saber durante todo el tiempo que llevo mi formación profesional en las aulas de clases.

**Al INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS (IIE)** por todas las facilidades prestadas durante el desarrollo del presente trabajo de tesis.

A mis asesores:

**M. I. José Oscar Martínez Flores (IIE)**, por su amistad, consejos y dirección en el buen desarrollo de este trabajo.

**Ing. José Antonio Sánchez Gutiérrez (FES-C)**, por su apertura y disponibilidad en la revisión de este trabajo.

A todos los investigadores y técnicos del departamento de Sistemas de Combustión del IIE.

A todos mis profesores por su paciencia y conocimientos transmitidos.

## DEDICATORIAS

A DIOS.

*Por haberme dado la vida y con ella  
el don de aprender, amar y luchar.*

*A mis padres.*

*Juanita y Luis, porque desde siempre han  
procurado el bienestar y el porvenir de  
nosotros, sus hijos, a consta de sus  
privaciones, del sudor de su frente y de  
sus lágrimas y que ahora también  
reciben sus frutos. Por todo esto y por  
todo su amor... infinitas gracias.*

*A mis hermanos.*

*Guadalupe, Alicia y Victor, porque siempre  
hemos compartido todos los momentos felices  
y amargos, y aún sin ser tan expresivos,  
siempre hemos estado juntos. Los querré  
siempre.*

*A la familia Tercero Mendoza.*

*A ustedes que siempre me han apoyado desinteresadamente desde pequeño encaminándome hacia el logro de mis metas, por sus consejos y su cariño... mil gracias.*

*A Ivonne.*

*A ti Chaparrita, por tu comprensión, tu motivación y tu confianza que han sido un complemento importante durante todo este tiempo. A ti que me has mostrado que siempre existirán matices que descubrir en la vida y que siempre existirán cada vez más metas que lograr. Con todo cariño... gracias.*

*A mis amigos de siempre.*

*Alfonso, Luis, Gerardo, Rubén, Juan, Gonzalo, Rafael y Adán, por todos los bellos recuerdos que siempre compartiremos de nuestro pasar en facultad y por la gran amistad que siempre nos ha unido encaminada al fortalecimiento de nuestro carácter, primero como estudiantes y ahora como hombres de bien.*

*A la memoria de mi abuelo, Sr. Jesús Tercero Miranda.*

*A ti abue, con todo mi amor, porque siempre te preocupaste en que yo realizara este trabajo y por enseñarme con tu ejemplo que la única forma que nos da las más grandes satisfacciones en la vida es la honradez, la perseverancia y el trabajo.*

**VALIDACION DE UNA METODOLOGIA EXPERIMENTAL  
PARA CARACTERIZAR FLUIDODINAMICAMENTE  
QUEMADORES USADOS EN GENERADORES DE VAPOR**



## INDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 1 INTRODUCCION Y OBJETIVOS.</b>	
<b>1.1 Generalidades.</b>	<b>3</b>
1.1.1 Centrales de generación.	3
1.1.2 Tipos de centrales de generación.	3
1.1.3 Transformaciones de energía en diferentes tipos de centrales.	4
<b>1.2 ¿Qué es una central termoeléctrica ?</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Generadores de vapor.</b>	<b>6</b>
1.3.1 Proceso de combustión en un generador de vapor.	8
1.3.2 Partes principales del generador de vapor.	9
1.3.3 Descripción del circuito aire - gases en un generador de vapor.	13
1.3.4 Circuito agua - vapor.	13
<b>1.4 Ciclo termodinámico de una central termoeléctrica.</b>	<b>15</b>
1.4.1 Ciclo Rankine.	15
1.4.2 Ciclo Rankine / Recalentamiento.	16
<b>1.5 Problemas relacionados con los sistemas de combustión.</b>	<b>17</b>
1.5.1 Solución de problemas por medio de simulaciones fluidodinámicas.	18
<b>1.6 Enfoque y organización del trabajo.</b>	<b>18</b>
1.6.1 Objetivo.	19
1.6.2 Organización del trabajo.	19
1.6.3 Arreglo de la tesis.	19

## **CAPITULO 2      QUEMADORES USADOS EN GENERADORES DE VAPOR.**

<b>2.1</b>	<b>¿Qué es un sistema de combustión ?</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Clasificación de los generadores de vapor de acuerdo al arreglo de sus quemadores.</b>	<b>20</b>
	2.2.1 Generadores de vapor con quemadores tangenciales.	21
	2.2.2 Generadores de vapor con quemadores frontales.	22
<b>2.3</b>	<b>Atomización.</b>	<b>23</b>
	2.3.1 Atomizadores de vapor.	24
	2.3.2 Atomizadores mecánicos.	25
<b>2.4</b>	<b>Estabilización de la flama.</b>	<b>26</b>
	2.4.1 Estabilización con disco "Bluff Body".	26
	2.4.2 Estabilización por vorticidad del aire, "Swirl".	27
	2.4.3 Uso de estabilizadores de álabes.	27

## **CAPITULO 3      METODOLOGIA PARA LA EVALUACION FLUIDODINAMICA DE QUEMADORES Y EQUIPOS DE MEDICION UTILIZADOS.**

<b>3.1</b>	<b>Simplificaciones y condiciones de similitud asumidas en la metodología experimental.</b>	<b>29</b>
<b>3.2</b>	<b>Metodología para el diseño fluidodinámico de quemadores.</b>	<b>31</b>
	<b>3.2.1 Descripción de las pruebas.</b>	<b>32</b>
	1. Perfiles de velocidad en el ducto de alimentación con y sin estabilizador.	32
	2. Cálculo del coeficiente de descarga del quemador.	33
	3. Cálculo del coeficiente de descarga del estabilizador.	35
	4. Pruebas de caída de presión para un quemador frontal.	38
	5. Pruebas de caída de presión para un quemador tangencial.	39

6.	Determinación de las zona de recirculación y perfiles de velocidad axial y tangencial producidas por cada estabilizador.	39
6.1	Determinación de los perfiles de caída de presión estática aguas abajo del estabilizador.	40
7.	Determinación del número de giro y los perfiles de velocidad en dirección "X-Y" aguas abajo del estabilizador.	42
8.	Determinación de la intensidad de turbulencia.	43
8.1	Técnica de medición para la determinación de la intensidad de turbulencia en una sola dirección.	43
<b>3.3</b>	<b>Equipos de medición.</b>	<b>44</b>
3.3.1	Tubo de pitot.	44
3.3.2	Sonda de dos orificios.	46
3.3.3	Sonda de un orificio.	47
3.3.4	Sonda de cinco orificios.	48
3.3.5	Manómetro diferencial y selector de presiones.	49
3.3.6	Anemómetro de hilo caliente y voltímetro R.M.S.	50
3.3.7	Posicionador de cuatro movimientos.	51

#### **CAPITULO 4      CONSTRUCCION DE LOS MODELOS EXPERIMENTALES.**

<b>4.1</b>	<b>Descripción de los planos de construcción del modelo del quemador tipo tangencial.</b>	<b>53</b>
<b>4.2</b>	<b>Descripción de los planos de construcción del modelo del quemador tipo frontal.</b>	<b>54</b>
<b>4.3</b>	<b>Descripción de los planos de construcción de los estabilizadores.</b>	<b>55</b>
Plano 4-01	Arreglo general del modelo experimental del quemador tipo tangencial.	56
Plano 4-02	Modelo del quemador tipo tangencial.	57
Plano 4-03	Detalle del compartimiento principal.	58
Plano 4-04	Detalle de las toberas auxiliares.	59
Plano 4-05	Detalle del orientador de flujo.	60
Plano 4-06	Detalle de la malla de uniformidad de flujo.	61
Plano 4-07	Ventilador centrífugo.	62

Plano 4-08	Arreglo general del modelo experimental del quemador tipo frontal.	63
Plano 4-09	Modelo del quemador tipo frontal.	64
Plano 4-10	Detalle del cuerpo principal del quemador tipo frontal.	65
Plano 4-11	Plantillas de construcción de los quarl de salida.	66
Plano 4-12	Estabilizador de plato.	67
Plano 4-13	Estabilizador de 8 álabes rectos.	68
Plano 4-14	Estabilizador de 12 álabes rectos.	69
Plano 4-15	Estabilizador de doble ángulo 16 álabes.	70

## **CAPITULO 5      RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA VALIDACION EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGIA PROPUESTA.**

<b>5.1</b>	<b>Resultados obtenidos en el modelo del quemador tangencial.</b>	<b>75</b>
5.1.1	Perfiles de velocidad en el ducto de alimentación con y sin estabilizador.	76
5.1.2	Cálculo del coeficiente de descarga del quemador con y sin estabilizador.	79
5.1.3	Cálculo del coeficiente de descarga del estabilizador.	80
5.1.4	Prueba de caída de presión.	82
5.1.4.1	Prueba de la variación de la forma del estabilizador.	82
5.1.4.2	Prueba de la variación del número de álabes.	82
5.1.4.3	Prueba de la variación del diámetro del estabilizador.	83
5.1.5	Determinación de la zona de recirculación y perfiles de velocidad.	87
5.1.5.1	Zona de recirculación y perfiles de velocidad axial.	87
5.1.5.2	Perfiles de velocidad tangencial.	95
5.1.5.3	Prueba de caída de presión estática aguas abajo del estabilizador.	102
5.1.6	Determinación del número de giro.	104

<b>5.2</b>	<b>Resultados obtenidos en el modelo del quemador frontal.</b>	<b>109</b>
5.2.1	Perfiles de velocidad en el ducto de alimentación.	111
5.2.2	Cálculo del coeficiente de descarga del quemador.	113
5.2.2.1	Cálculo del CD del quemador sin estabilizador y quarl variable.	113
5.2.2.2	Cálculo del CD del quemador con quarl fijo y estabilizador variable.	114
5.2.3	Cálculo del coeficiente de descarga del estabilizador.	115
5.2.4	Pruebas de caída de presión en el ducto.	116
5.2.4.1	Prueba variación del ángulo del quarl sin estabilizador.	116
5.2.4.2	Prueba variación del ángulo del quarl con estabilizador.	116
5.2.5	Determinación de la zona de recirculación y perfiles de velocidad.	119
5.2.5.1	Zona de recirculación y perfiles de velocidad axial.	119
5.2.5.2	Perfiles de velocidad tangencial.	122
5.2.5.3	Pruebas de caída de presión estática aguas abajo del estabilizador.	127
5.2.6	Determinación del número de giro.	129
<b>5.3</b>	<b>Determinación de la intensidad de turbulencia.</b>	<b>132</b>
	<b>CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>135</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.</b>	<b>142</b>
	Apéndice A. Programa para calcular velocidades en el ducto del quemador, coeficiente de descarga del quemador y estabilizador, caídas de presión y velocidades con la sonda de dos orificios.	i
	Apéndice B. Programa CAMSE para calcular el número de giro con los datos de la sonda de 5 orificios.	vi

## RESUMEN

C.F.E. cuenta con diversos tipos de quemadores utilizados en los sistemas de combustión de sus centrales termoeléctricas (CT's). Estos quemadores son de diferentes fabricantes por lo que sus diseños y condiciones de operación son muy diferentes para cada caso en particular.

Desde 1982, la C.F.E. ha solicitado al IIE a través del departamento de sistemas de combustión que le realice trabajos enfocados a resolver algunos de los siguientes problemas que han presentado sus sistemas de combustión:

- Oscilación de flama.
- Operación con altos excesos de aire.
- Disminución de la vida útil del quemador, por corrosión y quemado del estabilizador.
- Disminución de la eficiencia térmica.
- Disminución de la disponibilidad de la central.

Tomando como referencia los trabajos anteriores y los trabajos realizados a nivel internacional sobre el tema en 1994 se definió una metodología que permite evaluar cualquier tipo de quemador desde el punto de vista puramente aerodinámico y definir con ella sus parámetros geométricos óptimos. Esta metodología utiliza las técnicas de tubo de impacto y anemometría de hilo caliente para realizar las siguientes pruebas:

1. Perfil de velocidades en el ducto de alimentación en un plano perpendicular a la dirección de la misma con y sin estabilizador.
2. Cálculo de los coeficientes de descarga de quemador y estabilizador por medición y por fórmula. Esta última toma en cuenta las caldas de presión estática producidas por los componentes del quemador.
3. Presión estática. Las cuales se consideran con "curvas de operación" y permiten definir los parámetros geométricos óptimos de cualquier quemador de acuerdo con la mínima calda de presión producida al sistema para números de Reynolds iguales.
4. Determinación de la zona de recirculación producida por el estabilizador. Esta se realiza en el plano central aguas abajo del estabilizador y permite conocer la forma del perfil de flama producido por el mismo.
5. Perfiles de velocidad en las direcciones "X", "Y" y en el plano "XY" para diferentes distancias aguas abajo de la posición del estabilizador.

6. Perfiles de presión estática producidas por el estabilizador aguas abajo del mismo a planos diferentes de distancia. Esta prueba permite definir la magnitud de la zona de recirculación y se asocia al grado de vorticidad producido.

7. Cálculo del número de giro. El cual es una medida adimensional de la vorticidad producida por los estabilizadores aguas abajo del mismo a planos diferentes de distancia.

8. Determinación de la intensidad de turbulencia por medio de anemometría de hilo caliente producidas por los estabilizadores.

El objetivo de la tesis fue validar experimentalmente la metodología ya mencionada para caracterizar fluidodinámicamente quemadores usados en generadores de vapor y definir su geometría óptima. Para lograr el objetivo durante el desarrollo de la tesis, se diseñaron y construyeron dos modelos a escala de quemadores usados por la C.F.E. es sus CT's. El primero correspondió a un quemador tipo tangencial usado en una unidad de 158 MW y el segundo a un quemador frontal usado en una unidad de 300 MW. En estos modelos se realizó la validación experimental de la metodología al aplicar las pruebas mencionadas anteriormente.

Los resultados obtenidos así como su interpretación permitieron definir los parámetros geométricos óptimos para cada uno de estos dos quemadores, para posteriormente en trabajos futuros, realizar los cambios en el prototipo del quemador, el cual pueda ser validado experimentalmente en operación real por medio de la metodología para la evaluación de los sistemas de combustión a fin de evaluar las mejoras que pueden presentarse en el sistema de combustión al cambiarse el diseño.

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION Y OBJETIVOS

### 1.1 GENERALIDADES.

#### 1.1.1 CENTRALES DE GENERACION.

Una central de generación es una instalación completa cuyo objetivo es producir energía eléctrica[1]. Esta se produce como resultado de una serie de transformaciones de energía como lo muestra la figura 1.1, dichas transformaciones de la energía se realizan precisamante dentro de la central.

La central debe de contar con una forma de energía disponible, a partir de la cual se inician todas las transformaciones necesarias hasta llegar finalmente a la producción de la energía eléctrica.



Figura 1.1 Transformación de energía en una central de generación.

#### 1.1.2. TIPOS DE CENTRALES DE GENERACION.

Si bien existen diversos tipos de centrales de generación como lo muestra la figura 1.2, la principal diferencia entre éstas, es la forma en que se encuentra la energía disponible y el tipo de transformaciones que se deben realizar. Por supuesto, el equipo utilizado así como los dispositivos necesarios para ayudar a llevar a cabo cada una de las transformaciones, también forman parte de estas diferencias de acuerdo con el tipo de central de que se trate.



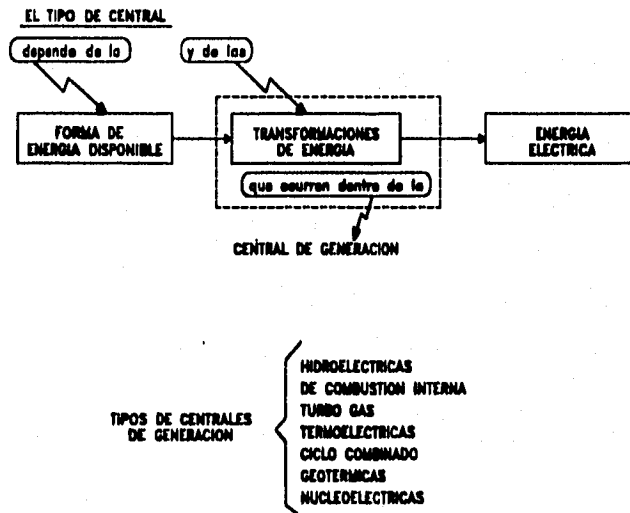
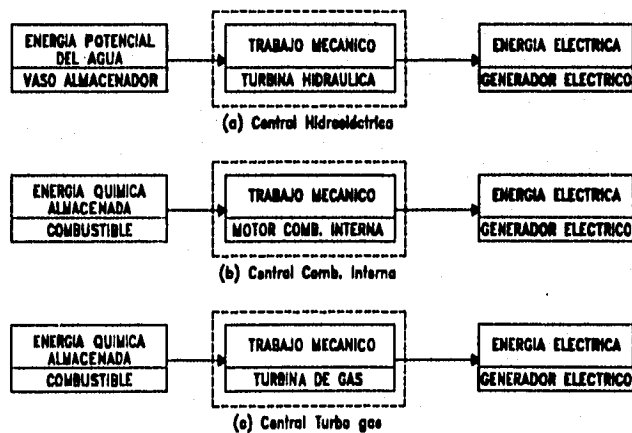


Figura 1.2 Diferentes tipos de centrales de generación.

1.1.3 TRANSFORMACIONES DE ENERGIA EN DIFERENTES TIPOS DE CENTRALES.

La figura 1.3 muestra en forma sencilla, las diferentes transformaciones que se llevan a cabo para cada uno de los tipos de centrales de generación.



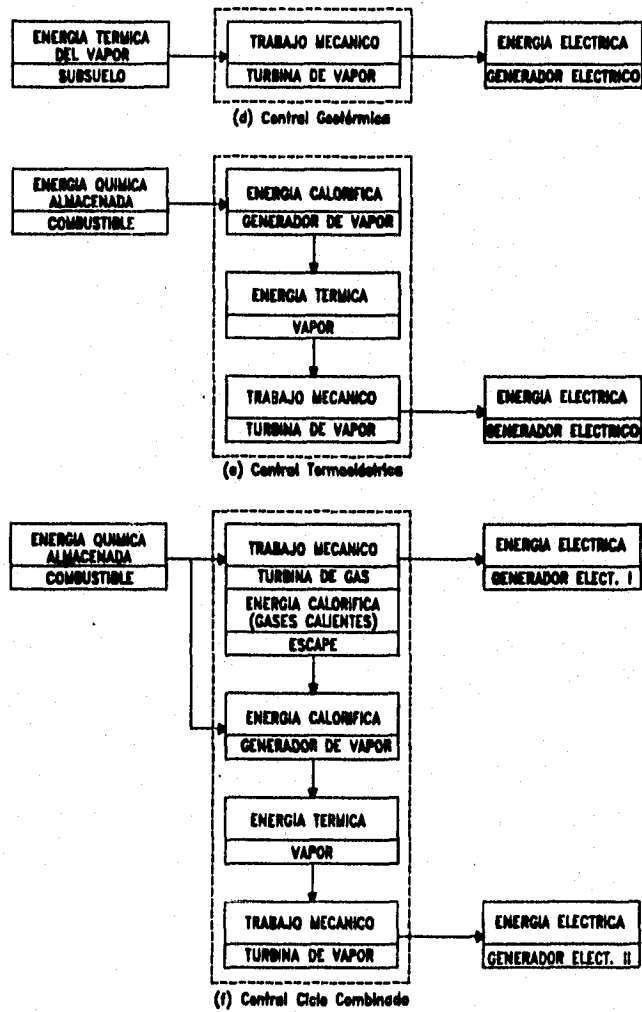


Figura 1.3 Transformaciones de energía en diferentes tipos de centrales.

## **1.2 ¿ QUE ES UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA ?**

Tomando como referencia el esquema (e) de la figura 1.3, se puede observar lo siguiente: La fuente de energía inicial disponible es un combustible fósil (como puede ser combustóleo, gas, diesel, carbón, etc.). La energía que se encuentra almacenada en éste, según su composición química, se libera por medio de una reacción química que en este caso es la combustión [1]. Al realizarse el proceso de combustión dentro del hogar del generador de vapor, se produce la primera transformación de la energía; es decir, la energía química del combustible se transforma en calor (energía calorífica) en la flama y en los gases calientes producto de la combustión. La energía calorífica de los gases a su vez se emplea para calentar agua y producir vapor, ocasionando con ello otra transformación de energía, esto es, los gases transfieren parte de su energía al vapor, lo cual ocasiona que éste tenga una mayor energía, a la cual se danomina energía térmica (para diferenciar con el término de energía calorífica asignado a los gases). La energía térmica del vapor se transforma a su vez en trabajo mecánico en una turbina de vapor con lo que se tiene otra forma de energía. Finalmente, en la turbina, la cual está acoplada mecánicamente a un generador eléctrico se tiene la última transformación de la energía llegándose al objetivo: " La Producción de La Energía Eléctrica".

Todas las transformaciones de energía citadas se efectúan dentro de una central termoeléctrica, que cuenta con el equipo para realizarlas. Esas transformaciones hacen que la central sea precisamente termoeléctrica y no de otro tipo.

En la figura 1.4 se presenta un diagrama general de una central termoeléctrica incluyendo los sistemas principales. Este diagrama es solo representativo de una central típica y puede tener variaciones según cada central real en particular.

## **1.3 GENERADORES DE VAPOR.**

Un generador de vapor es un conjunto de elementos integrados y dispuestos de tal forma que dentro de éste, se realiza el proceso de combustión en forma eficiente. Los objetivos principales de un generador de vapor son:

- 1) Realizar una combustión para liberar energía en forma de calor.
- 2) Producir vapor con determinadas características de presión y temperatura para realizar la expansión de éste en la turbina.

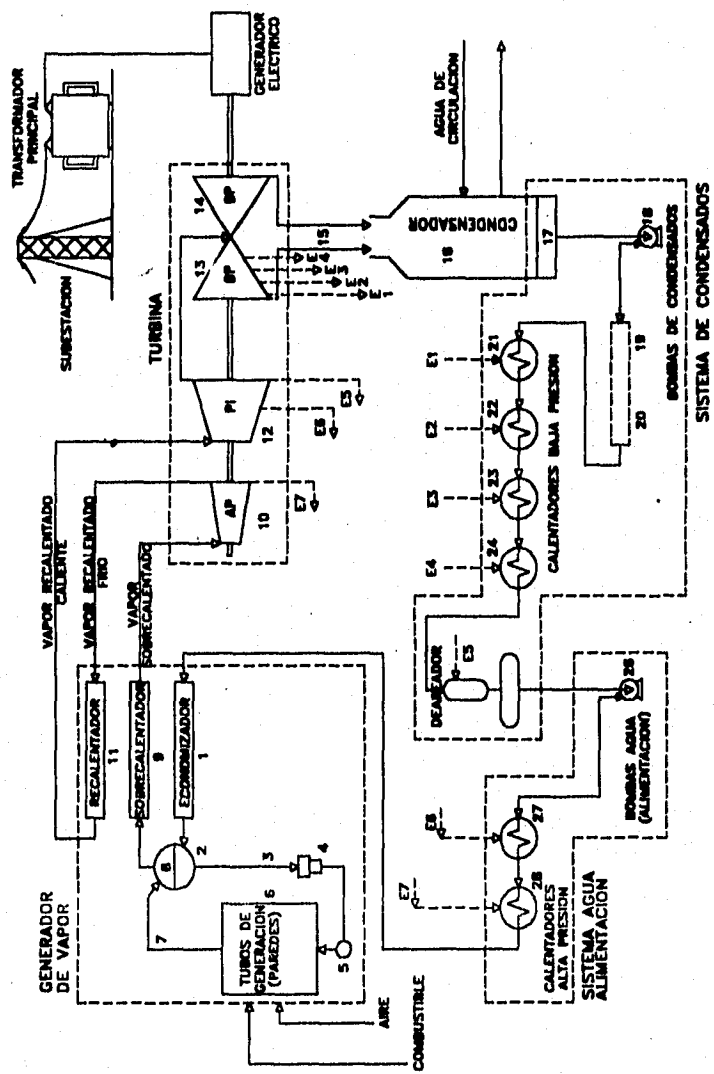


FIGURA 1.4 DIAGRAMA GENERAL DE UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA.

### GENERADOR DE VAPOR

- 1.- Economizador.
- 2.- Domo.
- 3.- Bajantas.
- 4.- Bombas circulación controlada.
- 5.- Domo inferior o cabazalas.
- 6.- Tubos de ganaración.
- 7.- Tubos de generación.
- 8.- Dispositivos de separación.
- 9.- Sobrecalentador (primario, secundario, etc.)
- 11.- Recalentador.

### TURBINA

- 10.- Turbina alte presión.
- 12.- Turbina presión intermedia.
- 13 y 14.-  
Turbina baja presión.
- 15.- Escape.

### SISTEMAS DE EXTRACCIONES

- E1.- Extracción a calentador 1.
- E2.- Extracción a calentador 2.
- E3.- Extracción a calentador 3.
- E4.- Extracción a calentador 4.
- E5.- Extracción a calentador 5.
- E6.- Extracción a calentador 6.
- E7.- Extracción a calentador 7.

#### **1.3.1 PROCESO DE COMBUSTION EN UN GENERADOR DE VAPOR.**

El proceso de la combustión (del combustible y el aire necesario) se realiza dentro del generador de vapor en un recinto llamado hogar como se muestra en la figura 1.5. El combustible puede ser líquido, sólido o gaseoso y se alimenta continuamente al hogar mediante quemadoras y otros dispositivos adecuados.

El aire para la combustión es suministrado por medio de ventiladores de tiro forzado, el cual se envía a través de ductos, hasta llegar a los quemadores y al hogar.

Durante el proceso de la combustión, se libera calor, el cual se utiliza en el generador de vapor para:

### CONDENSADOR Y SISTEMA DE CONDENSADO

- 16.- Condensador.
- 17.- Pozo caliente.
- 18.- Bombas de condensados.
- 19 y 20.-  
Otros calentadores.
- 21.- Calentador baja presión 1.
- 22.- Calentador baja presión 2.
- 23.- Calentador baja presión 3.
- 24.- Calentador baja presión 4.
- 25.- Calentador baja presión 5.

### SISTEMA AGUA DE ALIMENTACION

- 26.- Bombas agua de alimentación.
- 27.- Calentador alta presión 6.
- 28.- Calentador alta presión 7.

- 1) Calentar agua.
- 2) Transformar el agua en vapor.
- 3) Sobrecalentar el vapor.

Los gases calientes producto de la combustión salen del hogar y son conducidos por diferentes pasajes y ductos antes de escapar a la atmósfera como se describe más adelante.

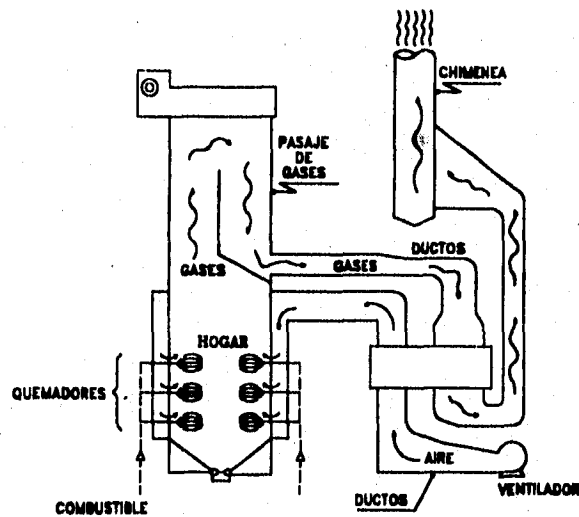


Figura 1.5 Proceso de combustión en un generador de vapor.

### 1.3.2 PARTES PRINCIPALES DEL GENERADOR DE VAPOR.

#### a) La caldera.

La caldera esta constituida por tubos, cabezales y recipientes que formen parte del circuito de circulación o de las mezclas agua-vapor.

Las calderas de los generadores de vapor de gran capacidad como los instalados en las centrales termoeléctricas, son del tipo de tubos de agua (Acuatubulares) y están

constituidas por grandes cantidades de tubos alineados, uno junto a otro formando una pared continua que envuelve al hogar, dejando un espacio interior en donde se produce la combustión. Los tubos están llenos de agua, la cual al calentarse se transforma en vapor. Los cabezales sirven para interconectar a los tubos y no están expuestos al calor. Las partes que conforman una caldera son:

**Tubos de generación.**

En estos se realiza el calentamiento del agua y parte de esta se convierte en vapor. Los tubos se agrupan alineados uno junto a otro, para constituir las paredes del hogar.

**Tubos elevadores.**

Son tubos de enlace entre los tubos de generación y el domo. En su interior llevan una mezcla de agua-vapor producida en los tubos de generación, con destino al domo. Estos tubos no están expuestos al calor.

**Domo.**

Es un recipiente cilíndrico horizontal con un determinado nivel de agua. Dentro de él se realiza la separación del vapor producido y el agua. El vapor sale por su parte superior con destino a otros elementos del generador de vapor. También se le denomina domo superior y no está expuesto al calor.

**Bajantes.**

Son unas tuberías de mayor diámetro y están localizadas por fuera del hogar, por lo que no están expuestas al calor. Contienen agua que debe circular hacia el domo inferior y por esta razón su nombre de bajantes.

**Domo inferior.**

Es un recipiente cilíndrico horizontal en la parte inferior del hogar. Su diámetro es menor que el diámetro del domo superior. Este sirve como un cabezal distribuidor y es el enlace entre los bajantes y los tubos de generación. Todos los tubos de generación parten del domo inferior. Este domo tampoco está expuesto al calor.

**Cabezales.**

Son depósitos que sirven como distribuidores o descargas comunes de un grupo de tubos. Enlazan a los tubos de generación con los bajantes o con los elevadores. No están expuestos al calor.

**b) El sobrecalentador.**

Este recibe el vapor saturado que sale del domo superior y lo sobrecalienta hasta la temperatura requerida por la turbina de vapor. Los sobrecalentadores están formados por una gran cantidad de tubos que se conectan en un cabezal de entrada y otro de salida. En la figura 1.6 se esquematiza el arreglo de un sobrecalentador.

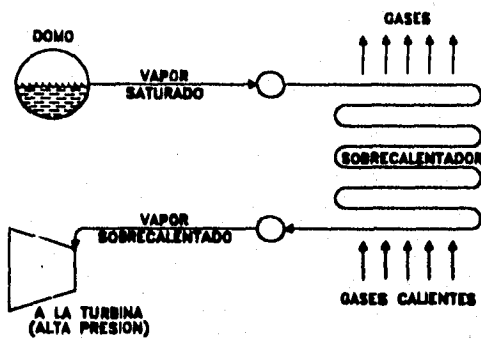


Figure 1.6 Arreglo del sobrecalentador.

Los sobrecalentadores pueden ser horizontales o verticales, además pueden estar formados por varias secciones conectadas en serie, de tal forma que le salde de una sección va a la entrada de otra sección posterior, de este forma la temperatura se va elevando poco a poco. Los tipos de sobrecalentadores que existen son:

- a) Radiales.- Están localizados en la parte superior del hogar y reciben el calor directamente de la flama.
- b) Convectivos.- Están localizados en los pasajes de los gases caliente y reciben el calor de estos por convección.
- c) El recalentador.

El recalentador recibe vapor denominado "recalentado frío" proveniente de la salida de la turbina de alta presión y lo recalienta ("recalentado caliente"), hasta alcanzar la temperatura requerida por las etapas restantes de la turbina. Las características y el comportamiento del recalentador son semejantes a los del sobrecalentador, pero el recalentador opera a una menor presión que la del sobrecalentador. En la figura 1.7 se esquematiza el arreglo del recalentador.



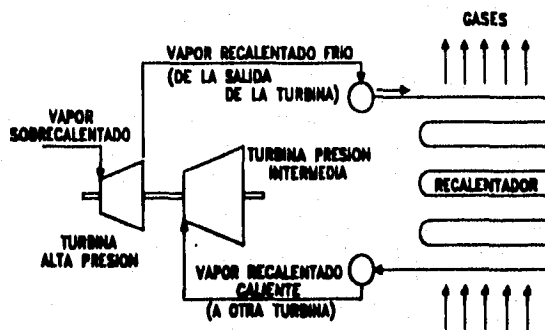


Figura 1.7 Arreglo del recalentador.

d) El economizador.

La función del economizador es el aprovechar el calor de los gases antes de que salgan a la atmósfera. Recibe agua de alimentación fría y la calienta hasta una temperatura muy cercana a la ebullición para enviarla al domo, allí se requiere menor cantidad de calor extra para evaporarse. El economizador recibe este nombre, debido a que aprovecha el calor de los gases que de otra forma se tirarían a la atmósfera sin aprovecharse y además ayuda a que se requiera menos calor para evaporar el agua en la caldera y por consiguiente menos combustible. En la figura 1.8 se esquematiza el arreglo del economizador.

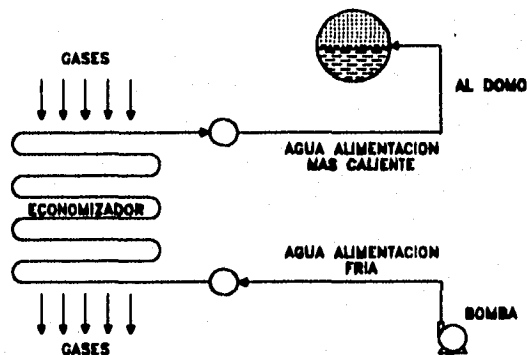


Figura 1.8 Arreglo del economizador.

**e) Los precalentadores de aire.**

Los precalentadores de aire reciben aire frío y lo calientan para enviarlo al hogar. El uso de aire caliente para la combustión, mejora las condiciones de ésta y además aumenta la eficiencia del generador de vapor. Existen dos tipos de precalentadores de aire según el medio calefactor:

- a) **Precalentadores aire vapor.**- El medio calefactor es el vapor obtenido de otro punto en el proceso. A estos se les denomina "Recuperativos".
- b) **Precalentadores aire gases.**- El medio calefactor son los gases calientes que salen del economizador. A estos precalentadores se les denomina "Regenerativos".

**1.3.3 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO AIRE - GASES EN UN GENERADOR DE VAPOR.**

La figura 1.9 muestra el circuito aire gases de una central termoeléctrica convencional de 300 MW. El aire utilizado para la combustión se introduce al sistema por medio de los ventiladores de tiro forzado (VTF), éste circula por el calentador de aire vapor donde incrementa su temperatura, para posteriormente llegar al lado frío del precalentador de aire regenerativo (PAR); éste a través de su superficie de transferencia de calor, extrae la mayor cantidad de calor posible que llevan los gases de combustión, este calor recuperado por el aire se envía al hogar para ser utilizado en el sistema de combustión.

Los gases de combustión que se forman al realizarse la reacción de los elementos del combustible y el oxígeno del aire, transfieren la mayor parte del calor generado durante la combustión al agua que fluye por las paredes del hogar. Posteriormente, los gases de combustión salen del hogar y atraviesan los bancos de tubos del sobrecalentador y recalentador, donde intercambian su calor con el vapor de agua que circula por los tubos. Continúan a través del economizador y es ahí donde el agua de alimentación eleva su temperatura utilizando parte del calor que llevan los gases. Los gases de la combustión continúan su trayectoria hacia la salida, pasando por el precalentador de aire, donde cede una fracción más de calor, el cual se utiliza para precalentar el aire usado en la combustión. Por último, los gases de combustión con el calor que conservan después de pasar por el precalentador de aire, salen por la chimenea para ser arrojados hacia la atmósfera.

**1.3.4 CIRCUITO AGUA - VAPOR.**

El agua que proviene de las bombas de agua de alimentación entra al economizador, donde eleva su temperatura hasta alcanzar un valor ligeramente menor a la de saturación, correspondiente a la presión de trabajo del domo. El agua de alimentación

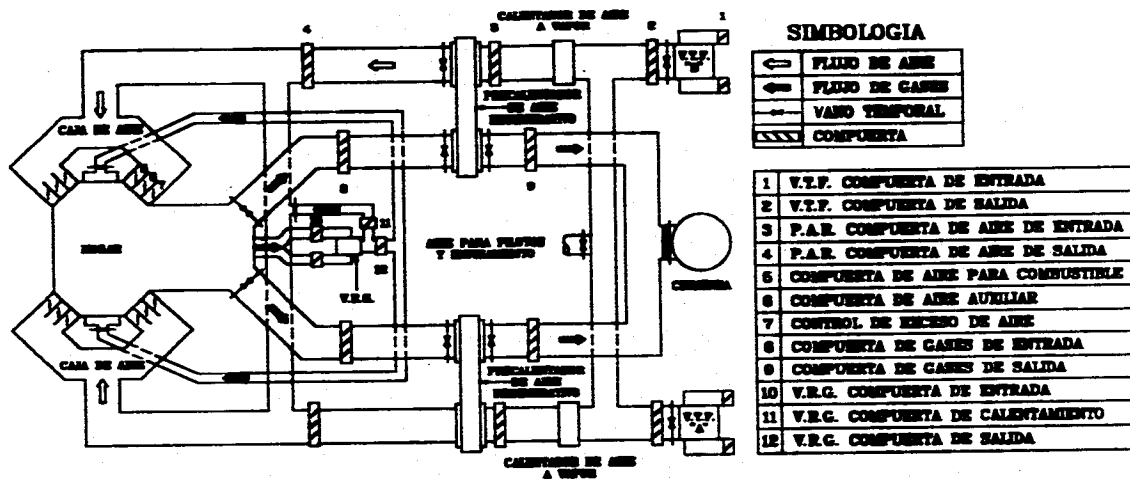


FIGURA 1.9 DIAGRAMA GENERAL DEL CIRCUITO AIRE GASES DE UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA CONVENCIONAL DE 300 MW.

sale del economizador y llega al domo donde se distribuye por las paredes de agua del hogar. El agua circula por las paredes del hogar y se evapora parcialmente absorbiendo parte del calor generado durante el proceso de combustión realizado en la caldera.

El vapor de agua producido se separa en el domo y sale del mismo, pasando primero por un sistema de purificación y secado, donde se elimina al máximo la humedad arrastrada por éste. El vapor casi seco, entra a los tubos del sobrecalentador, donde aumenta su temperatura hasta el valor especificado por las condiciones de operación de la turbina. El vapor sobrecalentado sale del generador de vapor dirigiéndose hacia la turbina de alta presión la cual está acoplada con el generador eléctrico. Toda vez que el vapor se ha expandido, sale por una extracción de la misma y entra al recalentador para elevar su temperatura con el calor recuperado de los gases de la combustión. El vapor recalentado sale con una temperatura igual al del vapor sobrecalentado, pero a menor presión, dirigiéndose nuevamente hacia la turbina en las etapas de presión intermedia y consecuentemente a la etapa de baja presión de la misma.

Después de lo anterior, el vapor pasa al condensador, en donde entra en contacto con los tubos del condensador, los cuales conducen agua de enfriamiento, ésta se condensa y cae al pozo caliente. El condensador opera ya sea con agua de mar en circuito abierto o mediante un sistema de torres de enfriamiento en circuito cerrado. Del pozo caliente, el agua se bombea hacia los calentadores de baja presión en donde aumenta su temperatura al intercambiar calor con el vapor de extracción de la turbina, así también pasa por el "deaireador" en el cual se inyecta vapor, proveniente también de una extracción, para arrastrar el oxígeno y las impurezas que lleva el agua, con el fin de evitar picaduras y corrosión. El agua posteriormente es bombeada a los calentadores de alta presión y de ahí hacia el economizador en donde se extrae la mayor cantidad posible de calor de desperdicio de los gases de combustión para incrementar la temperatura del agua que llega al domo. Así es como se completa el ciclo agua - vapor de un generador de vapor.

#### **1.4 CICLO TERMODINAMICO DE UNA CENTRAL TERMoeLECTRICA.**

##### **1.4.1 CICLO RANKINE.**

El ciclo termodinámico ideal de una central termoelectrica, también llamado "Ciclo Rankine" se presenta en la figura 1.10 en un diagrama Temperatura - Entropía, en el cual se asume que todo el proceso es internamente reversible [3].

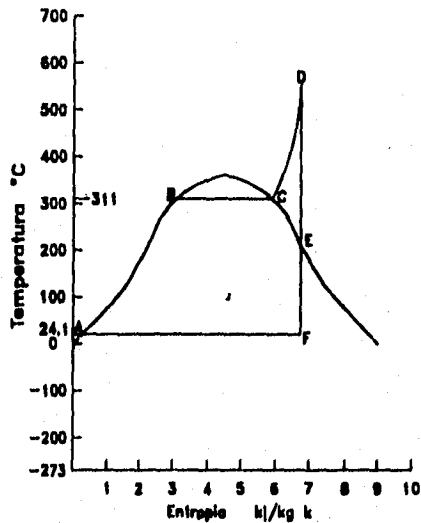


Figura 1.10 Ciclo Rankine.

De acuerdo con esta figura se tiene lo siguiente: En el punto A se eleva la temperatura del condensado, hasta la condición del líquido saturado en combinación con el incremento de la presión. En B, el agua saturada, se evapora completamente dentro de la caldera con la adición de calor latente representada por la línea BC, alcanzándose la condición de vapor saturado a una presión de 100 bar aproximadamente. La línea CD indica el sobrecalentamiento del vapor hasta alcanzar una temperatura de hasta 540 °C y 170 bar, posteriormente el vapor se expande dentro de la turbina para generar trabajo con la consecuente pérdida de presión y de temperatura, esta expansión se realiza isentrópicamente [2] y se indica por la línea DE. En E no hay recalentamiento del vapor incrementándose con ello la humedad del vapor de E a F. En el punto F la presión llega hasta 30 mbar y una temperatura de saturación de 24.1 °C junto con la condensación del vapor esquematizado por la línea FA. Condensado se toma nuevamente en el punto A dando origen a un nuevo ciclo.

#### 1.4.2 CICLO RANKINE / RECALENTAMIENTO.

La descripción anterior del Ciclo Rankine muestra el planteamiento general del ciclo agua - vapor; sin embargo, una representación más real del comportamiento de una central termoeléctrica estaría esquematizado por el Ciclo Rankine / Recalentamiento, el cual se muestra en la figura 1.11.

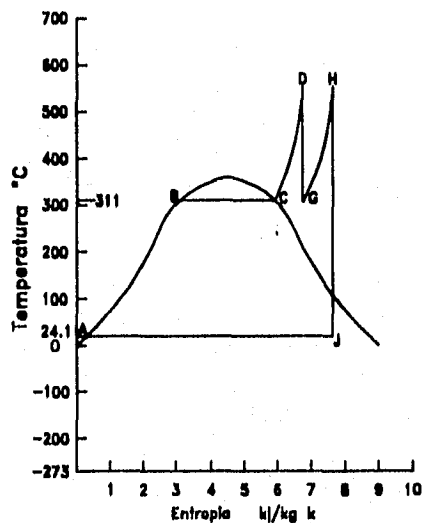


Figura 1.11 Ciclo Rankine / Recalentamiento.

En esta figura se puede observar que existen dos picos; el primero corresponde al sobrecalentamiento del vapor CD, con su respectiva expansión DG, la cual se realiza precisamente en la zona de alta presión de la turbina y el segundo pico corresponde al recalentamiento del mismo vapor GH, aprovechando su expansión HJ en las zonas intermedia y de baja presión de la turbina antes de dirigirse al condensador y reiniciar nuevamente el ciclo.

### 1.5 PROBLEMAS RELACIONADOS CON LOS SISTEMAS DE COMBUSTIÓN.

Dentro de los problemas que se presentan tanto en la operación como en el mantenimiento relacionados con los sistemas de combustión, utilizados en centrales termoelectricas mexicanas, existen aquellos que se encuentran íntimamente ligados con el proceso de combustión y que por su frecuencia y daños que ocasionan se pueden resumir en:

- a) Oscilación de flamas.
- b) Operación con altos excesos de aire.
- c) Disminución de la vida útil de los quemadores por corrosión y quemado de las cajas de aire y los estabilizadores de flama.
- d) Disminución de la eficiencia térmica.
- e) Disminución de la disponibilidad de la unidad por mantenimiento.

### **1.5.1 SOLUCION DE PROBLEMAS POR MEDIO DE SIMULACIONES FLUIDODINAMICAS.**

La C.F.E. cuenta con diversos diseños de quemadores utilizados en los sistemas de combustión de las centrales termoeléctricas. Estos quemadores son de marcas y modelos muy variados, por lo que los ductos de alimentación de aire, el control de flujo de aire, el estabilizador de flama y las condiciones de operación son muy diferentes para cada caso.

Pare poder modelar en la realidad el funcionamiento de este tipo de quemadores es necesario tomar en cuenta diversos factores, entre los que se pueden mencionar: los gradientes de temperatura y densidad, la turbulencia asociada al flujo y a la presencia del estabilizador, así como los flujos de combustible y de aire de combustión que componen el chorro que emerge del quemador, por lo que el modalado real presenta una serie de inconvenientes que pueden ser resumidos en:

- a) La instrumentación sumamente especializada y sofisticada que se requiere para la experimentación.
- b) El alto costo que implicaría realizar los experimentos en una planta prototipo.

Una alternativa que se ha usado en los últimos tiempos para resolver estos problemas es la realización de investigaciones con modelos experimentales en frío (sin combustión), con el consiguiente ahorro en los gastos de experimentación en equipos de tamaño natural en operación; además, es posible utilizar instrumentos convencionales de medición de flujo.

### **1.6 ENFOQUE Y ORGANIZACION DEL TRABAJO.**

#### **JUSTIFICACION.**

El IIE a través del departamento de sistemas de combustión, cuenta con una metodología que permite caracterizar cualquier tipo de quemador utilizado en un sistemas de combustión de centrales termoeléctricas. Dicha metodología fue desarrollada y planteada en el trabajo denominado "Revisión de las normas de diseño aerodinámico de quemadores"[9]. Esta metodología esta basada en los trabajos realizados a nivel internacional sobre el tema y en los trabajos desarrollados por el propio departamento en los últimos doce años. De acuerdo a lo anterior el objetivo principal de la tesis fue:

### **1.6.1 OBJETIVO.**

Realizar la validación experimental de la metodología para la evaluación fluidodinámica de quemadores, en dos modelos diferentes, uno de tipo tangencial y otro de tipo frontal. Con base a los resultados obtenidos, definir sus geometrías óptimas.

### **1.6.2 ORGANIZACION DEL TRABAJO.**

El trabajo se dividió en cuatro partes: la primera consistió en la definición de los tipos de quemadores que serían probados, los cuales fueran usados en algún sistema de combustión de los generadores de vapor de C.F.E. La segunda consistió en la construcción de los modelos a escala de los quemadores seleccionados. En la tercera parte se aplicó la metodología ya mencionada a ambos modelos para definir sus geometrías óptimas. Finalmente en la cuarta se dan las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

### **1.6.3 ARREGLO DE LA TESIS.**

El presente trabajo de tesis consta de seis capítulos, en el primero se muestra la introducción y los objetivos de la tesis.

En el capítulo dos se describen los tipos de quemadores usados en generadores de vapor para la producción de energía eléctrica, así como las técnicas de estabilización de flama.

El capítulo tres describe la metodología planteada, así como los instrumentos de medición utilizados para la caracterización y diseño de quemadores.

En el capítulo cuatro se describen los modelos experimentales que fueron construidos para validar la metodología propuesta.

En el capítulo cinco se presentan los resultados obtenidos al aplicar esta metodología a dos tipos diferentes de quemadores, uno de tipo frontal utilizado en una unidad de 300 MW y otro de tipo tangencial utilizado en una central de 158 MW .

En el capítulo seis se presentan las conclusiones de la aplicación de esta metodología.

Por último se citan las referencias bibliográficas utilizadas para el desarrollo de este trabajo.



## **CAPITULO 2**

### **QUEMADORES USADOS EN GENERADORES DE VAPOR**

#### **2.1 ¿ QUE ES UN SISTEMA DE COMBUSTION ?**

Un sistema de combustión, se define como un arreglo de quemadores, los cuales suministran y controlan eficientemente la conversión de la energía química contenida en el combustible a energía calorífica, la cual a su vez se transfiere a las superficies de absorción del generador de vapor.

Una de las partes principales de los sistemas de combustión son los quemadores. Un quemador se define como un dispositivo que permite realizar la mezcla del combustible y el agente oxidante (normalmente aire atmosférico), en forma adecuada para mantener estable la combustión. Es deseable que cuando el combustible y el aire se inyecten a través del quemador, la mezcla debe iniciar su ignición inmediatamente y por otro lado, al momento de remover la fuente de ignición la flama debe permanecer alineada y en posición constante con respecto a la tobera del quemador o a su salida. Para lograr lo anterior, la flama deberá viajar a lo largo del chorro hacia el atomizador a una velocidad igual a la de la mezcla aire-combustible, este concepto se denomina velocidad de flama.

#### **2.2 CLASIFICACION DE LOS GENERADORES DE VAPOR DE ACUERDO AL ARREGLO DE SUS QUEMADORES.**

Básicamente los sistemas de combustión que se utilizan en generadores de vapor de centrales termoeléctricas, utilizan tres tipos diferentes de combustible:

- Carbón (sólido),
- Diesel o combustóleo (líquido)
- Gas natural

Dependiendo de las características físicas del combustible, será la forma en que se prepare y se maneje. Independientemente del combustible que se utilice, los generadores de vapor se pueden clasificar en dos tipos:

- a) Generadores de vapor con quemadores tangenciales.
- b) Generadores de vapor con quemadores frontales.

Como este trabajo solo se enfoca a quemadores que utilizan combustible líquido, todas las descripciones siguientes serán referentes a este tipo de quemadores.

### 2.2.1 GENERADORES DE VAPOR CON QUEMADORES TANGENCIALES.

A los generadores de vapor con quemadores tangenciales también se les conoce como generadores de combustión tangencial, esto es debido a que durante el proceso de combustión, las flamas producidas por los quemadores, forman un ciclón de fuego en el centro del hogar [5], ayudando con ello a un mejor mezclado del combustible y el aire de combustión. Los quemadores están instalados en cada una de las esquinas del hogar de tal forma que su eje define una línea tangente a un círculo imaginario, el cual se localiza en el centro del hogar como se muestra en la figura 2.1.

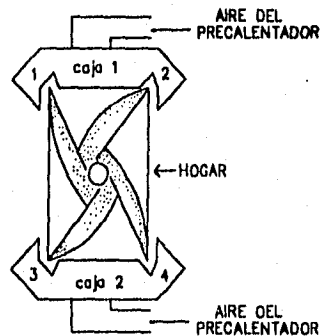


Figura 2.1 Esquematación del hogar de un generador de vapor con quemadores tangenciales.

La cantidad de quemadores por esquina puede variar dependiendo de la capacidad de generación de la unidad; por ejemplo para una unidad de 158 MW, ésta puede constar de 16 quemadores, cuatro quemadores en cada esquina de la caldera y en cuatro niveles[6]. Cada quemador tiene provisto un piloto que se encuentra adyacente al mismo, además de un detector de flama en la parte superior [8].

Este tipo de quemador se compone de tres compartimientos de aire, uno para el aire principal de combustión y dos para aire auxiliar, estos últimos localizados arriba y abajo del compartimiento del aire principal. A la entrada de cada compartimiento de aire se localiza una compuerta distribuidora, su función es precisamente la de distribuir el aire a los diferentes compartimientos y regular los flujos de aire, con el fin de obtener una mezcla más adecuada de aire-combustible. El aire es proporcionado por los ventiladores de tiro forzado y la cantidad se regula por las compuertas de succión de los mismos ventiladores.

Cada compartimiento de aire contiene toberas inclinables provistas de un material resistente al calor en las colindancias con las paredes del hogar. Estas toberas pueden ser inclinadas hacia arriba o hacia abajo 30 grados en forma manual o automáticamente (8). La figura 2.2 esquematiza un quemador de este tipo.

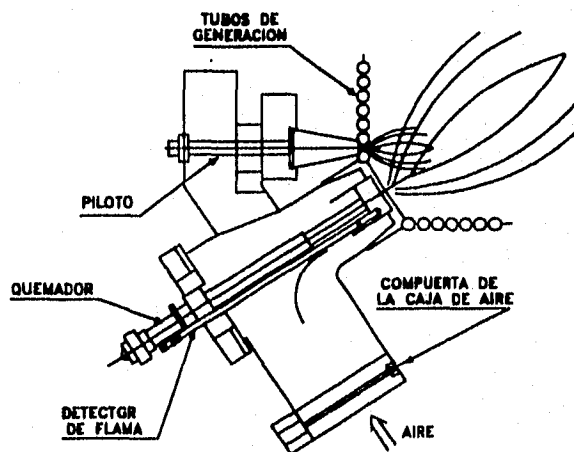


Figura 2.2 Esquemización de un quemador tangencial.

### 2.2.2 GENERADORES DE VAPOR CON QUEMADORES FRONTALES.

En este tipo de generadores de vapor los quemadores se encuentran instalados en columna en una de las paredes del hogar o en ambas paredes en forma frontal, este último arreglo también se le conoce como de "quemado opuesto" [11]. En la figura 2.3 se esquematiza el hogar de un generador de vapor con quemadores frontales. Las características principales del arreglo de quemadores frontales son:

- a) El registro de aire.
- b) La forma de la garganta del quemador.
- c) Las posiciones del atomizador y el estabilizador con relación a la garganta del quemador.

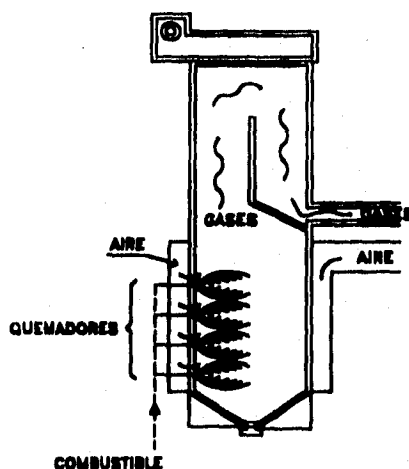


Figure 2.3 Esquemización del hogar de un generador de vapor con quemadores frontales.

En la figura 2.4 se presenta una esquematización de un quemador de tipo frontal; con respecto a este tipo de quemadores se puede indicar lo siguiente: La función del registro de aire es asegurar que la cantidad del mismo que pasa por la caja de aire vía el registro de aspas hacia la zona de combustión, sea el suficiente para lograr una buena combustión. El aire proveniente del registro pasa a través de una tobera del quemador, cuya forma es tal que, en la sección convergente, el aire para la combustión defleca hacia adentro para penetrar en el spray del combustible; mientras que en la sección divergente permite que el spray del combustible en forma de cono se desarrolle sin interferencia, a la vez que se mantiene el contacto cercano con el aire de combustión. Parte de este aire pasa a través del estabilizador en cual permite estabilizar la flama en el punto de ignición e unos centímetros de distancia de la tobera de combustible. La forma del estabilizador de flama es tal que permite que el aire encuentre el spray del combustible en el ángulo correcto para asegurar una buena mezcla [9].

### 2.3 ATOMIZACION.

Si bien no es objeto de este trabajo, tomar en cuenta la forma en que se inyecte el combustible en los quemadores, es necesario hacer una breve descripción del mecanismo, así como de los elementos utilizados para lograrlo, puesto que, tanto la aerodinámica del quemador, como el proceso de atomización son los dos mecanismos que gobiernan el funcionamiento de los quemadores.

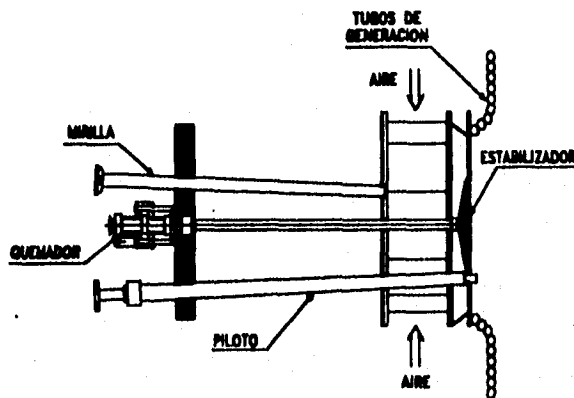


Figura 2.4 Esquemización de un quemador de tipo frontal.

Con el objeto de lograr una combustión completa en el quemador al utilizar un aceite residual (combustible líquido), es necesario que éste se mezcle homogéneamente con el oxígeno requerido para la combustión. Para lograr lo anterior, se utiliza un proceso llamado "Atomización".

El objetivo básico del proceso de atomización es incrementar el área superficial del líquido intensificando la vaporización, con el objeto de tener una mejor distribución del combustible dentro del hogar, asegurando de esta manera el fácil acceso del oxidante a una gran cantidad de gotas. Para lograr lo anterior se use un dispositivo denominado atomizadores. Si bien existen múltiples diseños de atomizadores, los más usados en los generadores de vapor de gran capacidad son:

- Atomizadores de vapor.
- Atomizadores mecánicos.

### 2.3.1 ATOMIZADORES DE VAPOR.

Los Atomizadores de vapor son los más utilizados en unidades generadoras mayores de 150 MW. Su principio de operación es el de producir una emulsión de vapor-combustible, la cual cuando se libera dentro del hogar, atomiza el aceite por medio de la rápida expansión del vapor. El tamaño de las gotas producidas aumenta con la viscosidad del combustible y disminuye con el incremento del vapor utilizado dependiendo del rango de operación del propio atomizador. En la figura 2.5 se observa el arreglo general de un atomizador de este tipo.

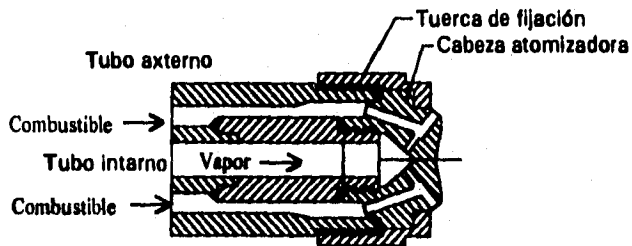


Figura 2.5 Arreglo general de un atomizador de vapor.

### 2.3.2 ATOMIZADORES MECANICOS.

En los atomizadores mecánicos, la propia presión del combustible se utiliza como medio de atomización. Los atomizadores con flujo de retorno son más utilizados que aquellos que tienen partes móviles para el control de flujo. Cuando en un sistema de combustión se utiliza un diseño adecuado de este tipo de atomizadores, la alta presión del flujo de retorno del atomizador mecánico proporcionará una atomización eficiente, comparable a la obtenida con un buen atomizador de vapor. En la figura 2.6 se observa el arreglo general de un atomizador mecánico.

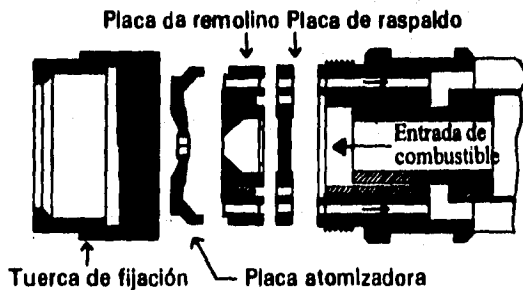


Figura 2.6 Arreglo general de un atomizador mecánico.

## 2.4 ESTABILIZACION DE LA FLAMA.

Para que una flama se considere estable, ésta deberá mantener una posición constante con respecto al atomizador, toda vez que se remueva la fuente de ignición. Para lograr lo anterior, la flama deberá viajar hacia el atomizador con una velocidad igual a la de la mezcla aire-combustible. En sistemas reales, se debe provocar un incremento artificial de la flama y suministrar una fuente constante de ignición, creando una región de baja presión y alta intensidad de turbulencia frente a la ficha de atomización del combustible, provocando la formación de una zona de recirculación interna.

Existen diferentes formas para lograr la formación de esta zona de recirculación, las más usadas en los sistemas de combustión de unidades generadoras de vapor son:

- Estabilización con disco "Bluff Body".
- Estabilización por vorticalidad de aire "swirl".
- Uso de estabilizadores de alabes.

### 2.4.1 ESTABILIZACION CON DISCO "BLUFF BODY".

La estabilización con disco "Bluff Body" se utiliza todavía en un gran número de quemadores. En la figura 2.7 se observa un estabilizador de disco "Bluff Body". Este estabilizador tiene la forma de un disco, el cual se encuentra localizado en el compartimiento de aire principal unido al cañón de atomización de combustible.

El aire de combustión que pasa sobre el disco causa una zona de baja presión frente a la ficha de atomización del combustible, formando así una zona de recirculación de gases de combustión. Usualmente el aire se inyecta en un ángulo divergente, por lo que el diámetro del disco requerido, depende de este ángulo de inyección, así como del diámetro del atomizador.

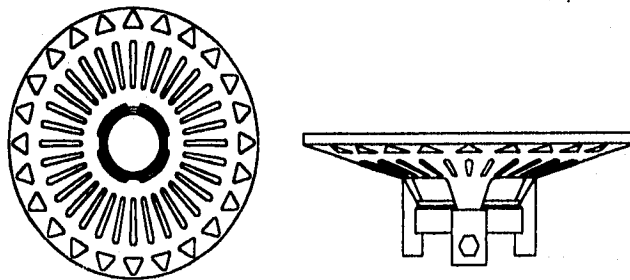


Figura 2.7 Estabilizador de disco "Bluff Body".

#### **2.4.2 ESTABILIZACION POR VORTICIDAD DEL AIRE, "SWIRL".**

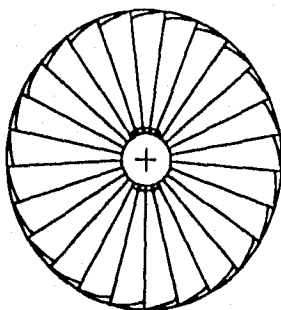
En esta técnica, al aire de combustión se le imprime una rotación dentro del ducto del quemador. Este aire diverge en la tobera del quemador, lo cual produce un vórtice sobre la línea central del quemador, lo que ocasiona que los gases de la flama sean arrastrados hacia el interior del vórtice, provocando el calentamiento del aire y el combustible que entra, logrando así que se estabilice la flama. En algunos quemadores de este tipo, existe la posibilidad de que parte del flujo del vórtice sea arrastrado hacia el ensamble del quemador, por lo cual, se hace pasar una pequeña cantidad de aire de combustión sin vorticidad sobre el atomizador de combustible. Dependiendo del diseño del quemador y del grado de control sobre el combustible y el aire, el quemador puede o no, requerir la colocación de un estabilizador en la tobera inyectora del combustible. En general, es necesario colocar un estabilizador cuando los álabes del generador de giro son ajustables y el grado de vorticidad se puede variar en un gran intervalo.

#### **2.4.3 USO DE ESTABILIZADORES DE ALABES.**

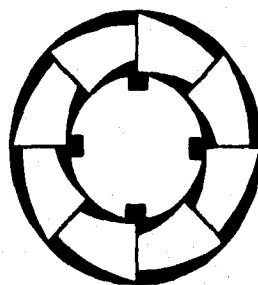
En los últimos años, esta técnica ha recibido una mayor atención y se utiliza ampliamente en generadores de vapor de gran capacidad, alrededor de 1.2 Kg/s de combustible consumido por cada quemador. La zona de recirculación creada por este tipo de estabilizadores es mejor que la producida por los estabilizadores de plato (o de disco), ya que se localiza en el plano central, justamente donde se tienen las gotas de combustible atomizado, lo que ocasiona que se tenga una mejor mezcla entre el aire y el combustible, además las partículas de la mezcla tienen un mayor tiempo de residencia en la región de alta temperatura, lo que trae como consecuencia que se tenga una mejor combustión y por consiguiente una mayor eficiencia térmica.

Dentro de los estabilizadores de álabes se encuentran varios tipos como son: estabilizadores con diferente número de álabes, con álabes de ángulo recto o de doble ángulo y cualquier combinación entre ellos. La figura 2.8 muestra algunos de estos estabilizadores, los cuales se encuentran operando en diferentes centrales termoeléctricas del país.

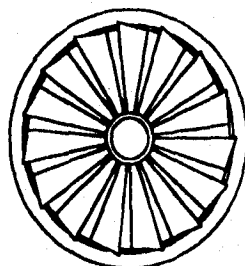




Estabilizador de 22 álabes rectos.



Estabilizador de 8 álabes rectos.



Estabilizador de 15 álabes en doble ángulo.

Figura 2.8 Ejemplos de estabilizadores de álabes.

En el siguiente capítulo, se describe la metodología experimental, así como los instrumentos de medición utilizados en la parte experimental de esta tesis.

### **CAPITULO 3.**

#### **METODOLOGIA PARA LA EVALUACION FLUIDODINAMICA DE QUEMADORES Y EQUIPOS DE MEDICION UTILIZADOS**

Desde 1982, el departamento de sistemas de combustión del IIE, ha realizado diferentes trabajos relacionados con la modelación en frío de quemadores usados en los sistemas de combustión de centrales termoeléctricas. Los trabajos realizados a la fecha han sido:

1. Modelación fluidodinámica de quemadores tangenciales.
2. Caracterización fluidodinámica de un quemador para combustible líquido.
3. Caracterización en frío de estabilizadores de flama utilizados en generadores de vapor de centrales termoeléctricas.

Estos trabajos, junto con una recopilación bibliográfica de los principales trabajos realizados a nivel internacional desde 1962 a 1993, dieron origen a un trabajo denominado, "Revisión de las normas de diseño aerodinámico de quemadores" [9], cuyo objetivo principal fue definir una metodología experimental desde el punto de vista fluidodinámico que permitiera resolver los problemas de operación de los generadores de vapor de centrales termoeléctricas.

#### **3.1 SIMPLIFICACIONES Y CONDICIONES DE SIMILITUD ASUMIDAS EN LA METODOLOGIA EXPERIMENTAL.**

Las simplificaciones que se tomaron en cuenta para la definición de esta metodología fueron:

1. La modelación se realiza con aire por lo que esume que las gotas de combustible siguen la trayectoria definida por el aire, por lo que éste, define la forma de la zona de recirculación producida por el estabilizador.
2. Se considera flujo turbulento completamente desarrollado, además, el flujo no tiene altas velocidades, por lo que no se presentan cambios significativos de presión y densidad, considerando así al flujo incompresible y subsónico.
3. Debido a que el flujo es siempre turbulento, con números de Reynolds mayor a 10,000, se desprecia el proceso de transporte molecular y los procesos de transferencia de momentum, calor y masa son controlados por las fuerzas de viscosidad, las cuales solo dependen del número de Reynolds [19].

4. El número de Froud ( $Fr$ ) no se considera ya que en un quemador las fuerzas de inercia son mayores que las fuerzas de flotación.
5. Como se trabaja con aire en forma isotérmica no existe diferencia de densidades, por lo que no es necesario que se cumpla la semejanza térmica.

Por lo anterior, las condiciones de similitud que permitieron hacer válida la metodología experimental fueron:

- Semejanza Geométrica.
- Semejanza Cinemática.
- Semejanza Dinámica.

**Semejanza geométrica.** Este se refiere a la dimensión longitudinal. La cual debe cumplirse antes de proceder a la experimentación. Una definición para esta semejanza es la siguiente: Un modelo y prototipo son geoméricamente semejantes, si todas las dimensiones espaciales en las tres coordenadas tienen una misma relación de escala lineal. Cabe mencionar que en esta semejanza tanto los ángulos como las direcciones de flujo se conserven.

**Semejanza cinemática.** Se da entre dos sistemas diferentes, si además de cumplir la similitud geométrica, las relaciones de velocidades en puntos correspondientes son iguales (las líneas de corriente deben ser geoméricamente semejantes).

**Semejanza dinámica.** Se tiene ésta, entre dos sistemas diferentes, si se cumplen las semejanzas geométrica y cinemática y además, si la relación de fuerzas en puntos correspondientes son iguales. Por lo tanto para que exista similitud dinámica estricta, los números de Reynolds ( $Re$ ), Mach ( $Ma$ ), Froude ( $Fr$ ) y Prandtl ( $Pr$ ) deben de tener el mismo valor en ambos sistemas.

Debido a las simplificaciones asumidas para el diseño aerodinámico de quemadores, para lograr la similitud cinemática y dinámica estricta, es necesario que se cumpla la similitud geométrica y además el Número de Reynolds en el modelo debe ser igual al Número de Reynolds en el prototipo. Sin embargo, cuando en un sistema de modelación se alcanza un número de Reynolds mayor a 10,000 y el sistema consiste de tubos, ductos, codos y cambios irregulares de sección, el patrón de flujo y el factor de fricción, se vuelven independientes del número de Reynolds. Además, la influencia del factor de fricción en la pérdida de carga se vuelve despreciable, comparada con la que producen los cambios de dirección y restricciones al flujo, lo anterior asegura la confiabilidad en la comparación y la extrapolación de los resultados.

### 3.2 METODOLOGIA PARA EL DISEÑO FLUIDODINAMICO DE QUEMADORES.

La metodología desarrollada, divide al quemador en tres secciones, la primera es aguas arriba del estabilizador, esto es, la zona del ducto de aire, la segunda es la zona del estabilizador (junto con las toberas de aire para el caso de un quemador tangencial) y finalmente la zona aguas abajo del estabilizador. Dependiendo del flujo dentro de la primera zona así como del estabilizador utilizado, éstas definirán la forma del flujo en la zona aguas abajo del estabilizador.

La figura 3.1 presenta un corte seccional de la caja de aire para un quemador tangencial y el registro de aire para un quemador frontal, así también muestra las tres zonas definidas anteriormente.

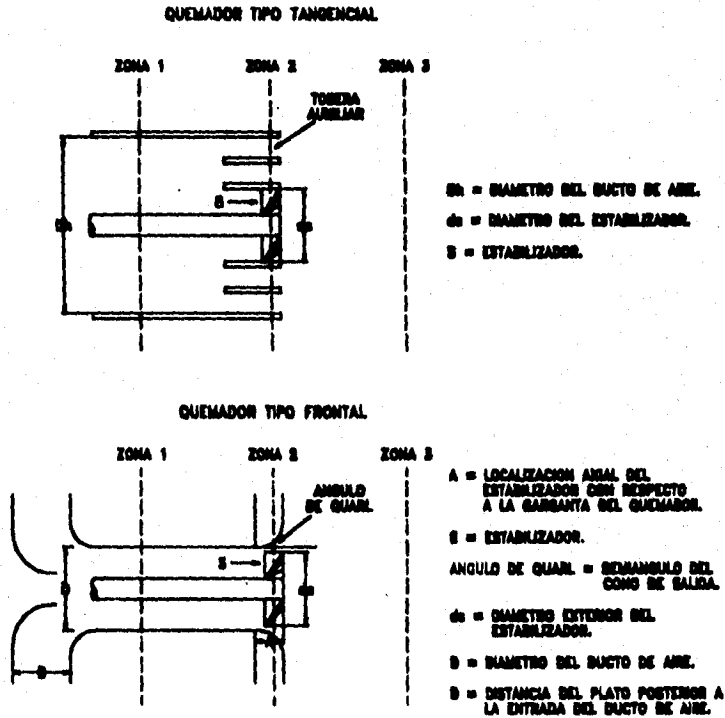


Figura 3.1 Corte seccional de la caja de aire de un quemador tangencial así como el registro de aire para un quemador frontal.

Por lo anterior, las pruebas que se proponen para la caracterizar fluidodinámicamente quemadores son:

1. Perfiles de velocidad en el ducto de alimentación con y sin estabilizador.
2. Cálculo del coeficiente de descarga del quemador.
3. Cálculo del coeficiente de descarga del estabilizador.
4. Pruebas de caída de presión.  
4.1 Variación de los parámetros geométricos del quemador.
5. Zona de recirculación producida por el estabilizador, así como sus perfiles de velocidad axial y tangencial aguas abajo del estabilizador.  
5.1 Perfiles de presión estática aguas abajo del estabilizador.
6. Determinación del número de giro del estabilizador y de los perfiles de velocidad en el plano " X-Y " aguas abajo del estabilizador.
7. Determinación de la intensidad de turbulencia producida por los estabilizadores en la dirección "X" aguas abajo del estabilizador.

### **3.2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS.**

1. **Perfiles de velocidad en el ducto de alimentación con y sin estabilizador.**

El objetivo de esta prueba es determinar la forma de los perfiles de velocidad del flujo de aire aguas arriba del estabilizador, ya que de acuerdo con el perfil que se tenga, éste influirá en la formación de la zona de recirculación.

Para obtener las mediciones de velocidad en un área de sección transversal al flujo (ya sea circular o rectangular), la norma del código ASME PTC 4.1 establece que el área transversal debe dividirse en un número de áreas iguales y que el punto de medición estará localizado en el centro de cada una de estas áreas. La figura 3.2 muestra el método de muestreo en ductos circulares y rectangulares.

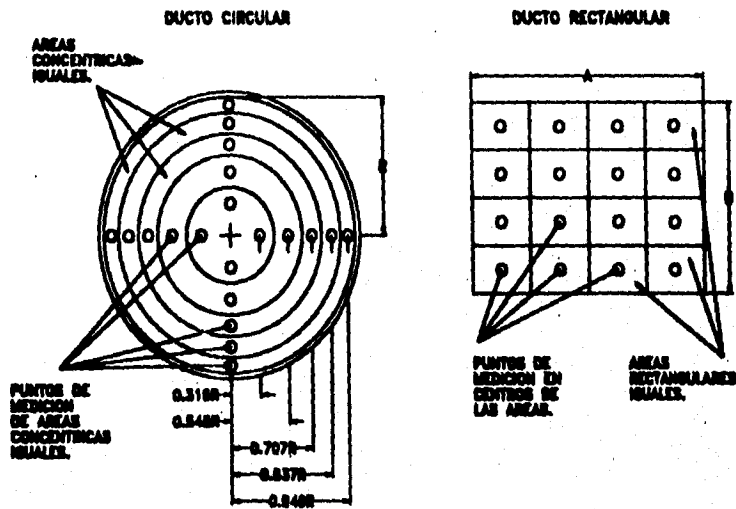


Figura 3.2 Método de muestreo en ductos circulares y rectangulares.

## 2. Cálculo del coeficiente de descarga del quemador.

El objetivo de esta prueba, es determinar el coeficiente de descarga del quemador, ya que éste se define como la razón del flujo real al flujo teórico del mismo, por lo anterior se puede considerar a este parámetro como una medida de la eficiencia del quemador.

Matemáticamente el CD se expresa como:

$$CD = \frac{W_r}{W_t} \quad (3.1)$$

Donde:

CD = Coeficiente de descarga (adimensional).

$W_r$  = Flujo real [Kg/s].

$W_t$  = Flujo teórico [Kg/s].

Para calcular el flujo real, la metodología utiliza los datos de velocidad medidos en el ducto de alimentación y se calcula el flujo real de la siguiente manera:

$$W_r = \rho A \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.2)$$

Donde:

- A = Área de medición constante (m<sup>2</sup>).
- n = Número de mediciones realizadas.
- V<sub>i</sub> = Velocidad del aire en el punto de medición i.
- ρ = Densidad del aire constante (Kg/m<sup>3</sup>).

Para suministrar el aire utilizado en la caracterización fluidodinámica se usa un ventilador de tipo centrífugo, por lo que el flujo teórico será el flujo de este ventilador a las condiciones de presión y temperatura del lugar donde se realice la experimentación. Por lo tanto se define el flujo teórico como:

$$W_t = Gv \rho \quad (\text{Kg/s}) \quad (3.3)$$

Donde:

- Gv = Gasto volumétrico del ventilador (m<sup>3</sup>/s).
- ρ = Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>).

Toda vez que se conocen tanto el flujo real como el flujo teórico se procede a sustituir las ecuaciones (3.2) y (3.3) en (3.1) para determinar el coeficiente de descarga del quemador.

Una forma alternativa que presenta la metodología para calcular el coeficiente de descarga del quemador, es utilizar una expresión desarrollada en la misma, que permite calcular el mismo como función de la geometría del quemador, así como la caída de presión debida al flujo de aire en el ducto.

Para un quemador que tiene un ducto de aire de sección circular; la expresión queda definida como:

$$CD = \sqrt{\frac{8(W_r)^2}{\pi^2 \rho D^4 \Delta P}} \quad (3.4)$$

mientras que para un quemador con un ducto de aire de sección rectangular; la expresión queda definida como:

$$CD = \sqrt{\frac{8(W_r)^2}{\pi^2 \rho Dh^4 \Delta P}} \quad (3.5)$$

Donde:

$W_r$  = Flujo másico real. (kg/s)

$\rho$  = Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>).

$\Delta P$  = Caída de presión sin estabilizador (Pa).

$D$  = Diámetro del ducto de aire de sección circular (m).

$Dh$  = Diámetro hidráulico del ducto de aire de sección rectangular (m)  
el cual se define como:

$$D_h = \frac{4 A_t}{P} \quad (3.6)$$

Donde:

$A_t$  = Area transversal.

$P$  = Perímetro mojado.

### 3. Cálculo del coeficiente de descarga del estabilizador.

El objetivo de esta prueba es determinar el CD del estabilizador, ya que este parámetro influye directamente en la eficiencia fluidodinámica del quemador.

Para el cálculo de este parámetro, la metodología define la caída de presión de cualquier parte del quemador como:



$$\Delta P = B \frac{(W_r)^2}{D^4 CD^2} \quad (3.7)$$

Donde:

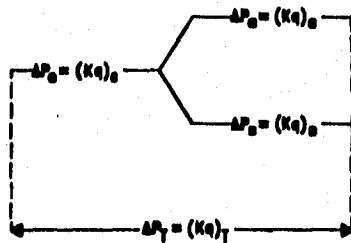
$$B = \frac{8}{\pi^2 \rho} = \text{constante.}$$

$W_r$  = Flujo másico real a través del quemador.

$CD$  = Coeficiente de descarga del quemador.

$D$  = Diámetro del ducto de aire circular, (este cambia a  $D_h$ , cuando el ducto es rectangular).

La figura 3.3 muestra el análisis de las caídas de presión dentro de un quemador con ducto circular en un arreglo serie paralelo:



Donde los subíndices significan:

- e = entrada.
- a = ánulo para un ducto circular.
- s = estabilizador.
- T = Total.

Figura 3.3 Arreglo serie-paralelo de las caídas de presión en un quemador con ducto circular y estabilizador.

Al hacer un cambio de variable y al aplicar las reglas de las caídas de presión en un arreglo de tuberías serie-paralelo se tiene:

$$K = \frac{l}{C^2} = \text{Coeficiente de pérdidas de presión.}$$

$$q = \frac{B W_r^2}{D^4} = \text{Presión dinámica.}$$

$C$  = Coeficiente de descarga sin estabilizador.

$$K_r = \frac{(K_q)_e}{q_r} + \frac{(K_q)_i}{q_r} \quad (3.8)$$

$$K_r = \frac{(K_q)_e}{q_r} + \frac{(K_q)_i}{q_r} \quad (3.9)$$

Igualando (3.8) y (3.9) y escribiendo q en términos de  $W_r$  y  $D$  se obtiene[9]:

$$\left(\frac{W_e}{W_r}\right)^2 = \frac{d_i^2}{\left[d_i^2 + \left(\frac{K_i}{K_e}\right)^{\frac{1}{2}} (D^2 - d_i^2)\right]} \quad (3.10)$$

Sustituyendo (3.10) en (3.9) el coeficiente de pérdidas de presión totales del sistema, se puede expresar como función de los diferentes coeficientes de pérdida de cada uno de los elementos del quemador y de las características geométricas de cada uno de los componentes del quemador, de la siguiente manera:

$$K_r = K_e + \frac{l}{\left[\frac{l}{\sqrt{K_i}} \left(\frac{d_i}{D}\right)^2 + \frac{l}{\sqrt{K_e}} \left(1 - \left(\frac{d_i}{D}\right)^2\right)\right]^2} \quad (3.11)$$

Para un quemador tangencial este coeficiente se puede expresar como:

$$K_r = K_e + \frac{l}{\left[\frac{l}{\sqrt{K_i}} \left(\frac{d_i}{D_h}\right)^2 + \frac{l}{\sqrt{K_{Tot}}} \left(1 - \left(\frac{d_i}{D_h}\right)^2\right)\right]^2} \quad (3.12)$$

Donde:

$K_{Tob}$  = Coeficiente de descarga de las toberas auxiliares.  
 $D_h$  = Diámetro hidráulico.  
 $d_s$  = Diámetro del estabilizador.

Para el cálculo del coeficiente de descarga del estabilizador, es necesario tomar una serie de resultados obtenidos durante el cálculo del coeficiente de descarga del quemador, por lo cual estos resultados se presentan en el capítulo 5.

#### 4. Pruebas de Caída de Presión para un quemador frontal.

El objetivo de estas pruebas dentro de la metodología es definir los parámetros geométricos óptimos del quemador; como son el ángulo de salida o "quarl", la localización axial del quemador y la variación en el diseño del estabilizador. La nomenclatura utilizada en la metodología se muestra en la figura 3.1.

Para la realización de la prueba, la metodología define dos coeficientes de pérdidas, uno para el quemador y otro para el estabilizador, de la siguiente manera:

$$C.Q. = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho V_{max}^2} \quad (3.13)$$

$$C.S. = \frac{\Delta P_s}{\frac{1}{2} \rho V_{max}^2} \quad (3.14)$$

Donde:

$C.Q.$  = Coeficiente de pérdida del quemador (adimensional).  
 $\Delta P$  = Diferencia de presión estática entre el quemador y el medio ambiente.  
 $\Delta P_s$  = Diferencia de presión estática entre el quemador y el medio ambiente con el estabilizador colocado.  
 $V_{max}$  = Velocidad máxima (medida al centro del estabilizador).

Para la realización de las pruebas, se varía uno de los parámetros por ejemplo el ángulo de salida "quarl", manteniendo constante los demás parámetros. Para cada valor del ángulo de salida, se varía el número de Reynolds (la velocidad del flujo) y para cada valor del Reynolds se determina el coeficiente de pérdidas. El valor óptimo del parámetro geométrico, será aquel que le correspondan los menores valores del coeficiente de pérdidas del quemador.

Las pruebas que se pueden realizar son:

1. Variación del ángulo de "quarl" con y sin estabilizador.
2. Variación de la posición del estabilizador con el "quarl fijo".
3. Variación de la posición del estabilizador con el "quarl variable"
4. Variación en el diseño del estabilizador.

Para la última prueba es necesario fijar el diámetro del estabilizador, por lo que solo es posible variar 4 parámetros geométricos del estabilizador. Estos parámetros son: la forma del estabilizador, el número de álabes, la forma del álabe, el ángulo de salida del álabe.

Al igual que las pruebas anteriores, se varía un parámetro manteniendo constante los demás, para cada parámetro que se varía, se varía también el número de Reynolds (la velocidad del flujo) y para cada valor de Reynolds se determina el coeficiente de pérdidas del estabilizador. El valor óptimo del parámetro, será aquel que le correspondan los menores valores del coeficiente de pérdidas.

#### **5. Pruebas de Caída de Praelón para un quemador tangencial.**

El objetivo de esta prueba es igual al planteado para un quemador frontal, sin embargo, debido a la geometría del quemador, solo se pueden hacer dos pruebas, las cuales son: La variación en el diseño del estabilizador y la variación en el diseño de las toberas auxiliares.

#### **6. Determinación de la Zona de Recirculación y perfiles de velocidad axial y tangencial producidos por cada estabilizador.**

Para determinar la zona de recirculación y los perfiles de velocidad axial y tangencial producidos por cada uno de los estabilizadores, la metodología recomienda utilizar una sonda direccional de dos orificios, la cual permite medir y describir cuantitativamente la zona de recirculación.

A partir de las mediciones de presión dinámica realizadas con la sonda en cada plano de medición aguas abajo del estabilizador, se determinen los valores correspondientes de velocidad que se tienen dentro y fuera de la zona de recirculación. De acuerdo con la metodología la forma para determinar estos perfiles es la siguiente:

Se coloca la sonda de dos orificios en un posicionador a la orilla del compartimiento del quemador a una distancia de 1 cm. de la salida del quemador. Se procede a avanzar la sonda por medio del posicionador una distancia de 8 mm. (dos vueltas de la manivela del posicionador), hasta hacer un barrido a lo largo del eje radial del chorro y se mide la presión dinámica con la sonda. El inicio de la zona de

recirculación, se determina cuando en el micromanómetro se tiene una lectura aproximada a cero (punto de estancamiento), para posteriormente tener lecturas de presión negativa, lo cual implica un cambio de dirección en el flujo, hasta encontrar nuevamente el punto de estancamiento.

La operación se repite cada centímetro (1,2,3,4,...etc.), de distancia a la salida del quemador, hasta que se encuentran solamente valores positivos de presión dinámica. El perfil de la zona de recirculación se dibuja uniendo todos los puntos de estancamiento, mientras que la visualización de los perfiles de velocidad axial se logra simplemente uniendo los vectores de velocidad graficados con una línea continua, de igual forma para los perfiles de velocidad tangencial, solo que en este caso la sonda se gira  $90^{\circ}$  con respecto a su eje longitudinal antes de hacerse el barrido para la toma de lecturas de presiones dinámicas. La técnica de medición para la zona de recirculación y perfiles de velocidad se presentan en la figura 3.4, asimismo se muestra el trazo de la mismas.

#### **6.1 Determinación de los perfiles de Caída de Presión Estática aguas abajo del estabilizador.**

El objetivo de esta prueba es determinar los perfiles de presión estática aguas abajo del estabilizador. Esta medición proporciona una medida del arrastre (entrelent) que produce cada estabilizador, por lo que permite comparar qué estabilizador presenta los mayores valores de presión estática y dónde se localiza, lo anterior permite definir la magnitud del vórtice que forma cada uno de los estabilizadores.

Para la realización de esta prueba, la metodología utiliza la misma técnica empleada para la obtención de la zona de recirculación y los perfiles de velocidad, solo que en este caso las lecturas son tomadas con una sonda de un solo orificio, la cual sólo proporciona valores de presión estática referidas a la presión atmosférica.

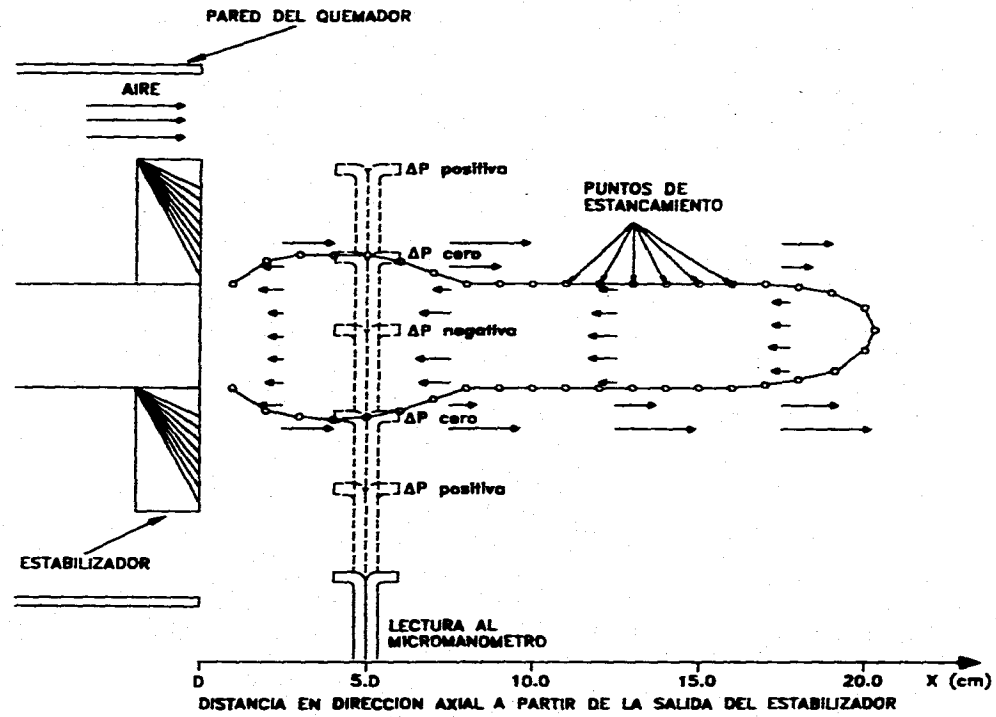


FIGURA 3.4 TECNICA DE MEDICION Y TRAZO DE LA ZONA DE RECIRCULACION.

### 7. Determinación del Número de Giro y los Perfiles de Velocidad en la dirección " X-Y " aguas abajo del estabilizador.

El objetivo de esta prueba es determinar el número de giro el cual se define como la relación entre el flujo axial del momento angular y el flujo axial del momento longitudinal. Este número adimensional define el grado de giro que produce cada estabilizador, por lo que se puede interpretar de la siguiente manera: un número de giro pequeño indica que el flujo a través del estabilizador se ve dominado por el momento longitudinal y viceversa.

$$N_z = \frac{G_\theta}{(G_x)R} \quad (3.15)$$

Donde:

- $G_\theta$  = Flujo axial del momento angular.
- $G_x$  = Flujo axial del momento longitudinal.
- $R$  = Radio del quemador.

Por otra parte:

$$G_\theta = 2\pi\rho \int_0^R UW r^2 dr \quad (3.16)$$

$$G_x = 2\pi\rho \int_0^R U^2 r dr + \int_0^R Pr dr. \quad (3.17)$$

Donde:

- $U$  = Componente axial del vector velocidad (componente en X).
- $V$  = Componente radial del vector velocidad (Componente en Y).
- $W$  = Componente tangencial del vector velocidad (Componente en Z).
- $\rho$  = Densidad del aire.
- $P$  = Presión estática.

Para determinar los componentes de la velocidad, se utiliza una sonda direccional de 5 orificios. En principio este equipo se compone de la sonda y un micromanómetro, la operación de la sonda para obtener las diferentes presiones no es difícil, mientras que para el cálculo de las velocidades así como el número de giro se necesita un amplio programa de cómputo.

### 8. Determinación de la Intensidad de Turbulencia.

Para la determinación de la intensidad de turbulencia en una sola dirección producida por los estabilizadores, se utiliza un equipo de anemometría de hilo caliente junto con un voltímetro R.M.S. Este parámetro define qué tan fluctuante es la velocidad media medida aguas abajo del estabilizador, por lo que a este valor también se le considera como una medida de eficiencia del funcionamiento de los estabilizadores.

La intensidad de Turbulencia se define como:

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} \overline{q^2}}}{U} \quad (3.18)$$

Donde  $\frac{1}{2} \overline{q^2}$  es la energía cinética instantánea de la turbulencia por unidad de masa, dado por:

$$\frac{1}{2} \overline{q^2} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (3.19)$$

y  $\overline{u}, \overline{v}$  y  $\overline{w}$  son los valores promedio de la velocidad axial, radial y tangencial respectivamente.

Como se aprecia en las expresiones anteriores, el parámetro  $I$  establece la proporción existente entre la desviación estándar de las componentes de velocidad y la velocidad axial media del flujo principal, las cuales se miden con un voltímetro R.M.S. y un anemómetro de hilo caliente respectivamente.

#### 8.1 Técnica de medición para la determinación de la intensidad de Turbulencia en una sola dirección.

Debido a que las mediciones se realizaron con una sonda de un solo hilo, no se consideran las componentes radial y tangencial, por lo que la intensidad de turbulencia en la dirección " X ", queda definida como:

$$I = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{U} \quad (3.20)$$



Donde  $\sqrt{u^2}$  se mide con el voltímetro R.M.S. y  $\bar{U}$  se mide con el hilo sensor.

Las mediciones con el anemómetro y el voltímetro R.M.S. se realizan en el plano central para tres planos diferentes de la salida del aire a través del estabilizador. Para la realización de estas mediciones se coloca el hilo sensor en el posicionador de 4 movimientos a la orilla del compartimento del quemador a la distancia de medición. Se procede a avanzar la sonda por medio del posicionador a una distancia radial de 4 mm.; posteriormente se orienta el hilo sensor en forma perpendicular a la velocidad máxima del flujo, dicha orientación se conoce por medio de la sonda de cinco orificios, ya que esta ubica el ángulo del plano donde se localiza el vector velocidad en cada punto de medición. Toda vez que se tiene orientado el sensor en forma perpendicular a la dirección del flujo, se realiza la medición de la velocidad media por medio del anemómetro y la fluctuación de la velocidad con el voltímetro R.M.S.

La operación se repite para cada punto, hasta finalizar las mediciones a lo largo del eje perpendicular al chorro.

### 3.3 EQUIPOS DE MEDICION UTILIZADOS.

#### 3.3.1 TUBO DE PITOT.

Para la obtención de la velocidad se utiliza un tubo de impacto o tubo de Pitot con una constante de calibración igual a uno. Este mide la presión dinámica del flujo y debe estar colocado en posición perpendicular a la dirección del flujo como lo muestra la figura 3.5.

Por definición la presión dinámica en un fluido es:

$$P_d = P_t - P_e \quad (3.21)$$

Donde:

$P_d$  = Presión dinámica.

$P_t$  = Presión total.

$P_e$  = Presión estática.

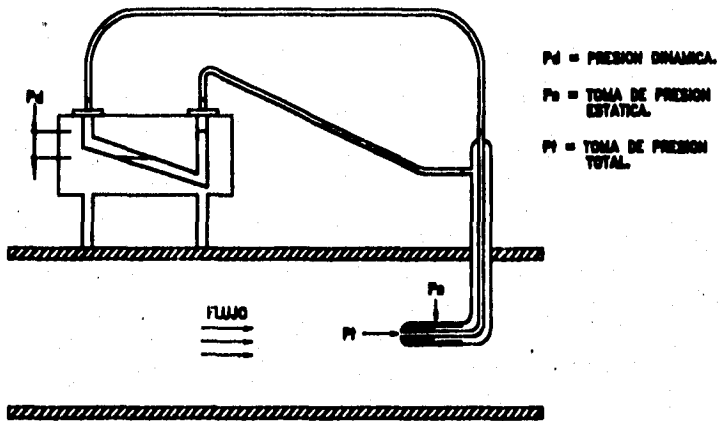


Figura 3.5 Medición de presión dinámica con un tubo de pitot.

De acuerdo con las simplificaciones hechas en la metodología al considerar al fluido como incompresible y subsónico, la presión dinámica será:

$$P_d = P_i - P_e = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.22)$$

despajando a la velocidad:

$$V = \sqrt{\frac{2 P_d}{\rho}} \quad (3.23)$$

Si la presión dinámica se mide en una columna de agua o en un micromanómetro con unidades en mm de H<sub>2</sub>O, la velocidad en m/s será calculada como:

$$V = \sqrt{\frac{2 g P_d}{\rho}} \quad (3.24)$$

Donde:

- $g$  = gravedad ( $m/s^2$ ).
- $P_d$  = Presión dinámica medida con el Pitot (mm de H<sub>2</sub>O).
- $\rho$  = Densidad del aire en  $Kg/m^3$ , con la ecuación de los gases ideales.
- $V$  = Velocidad en m/s.

### 3.3.2 SONDA DE DOS ORIFICIOS.

La sonda de dos orificios está fabricada en tubing de 1/8" y se emplea particularmente para determinar la zona de recirculación y los perfiles de velocidad axial y tangencial. La construcción de este sonda prevé la orientación de sus dos orificios en forma horizontal opuestos uno con respecto al otro 180° tal y como se muestra en la figura 3.6.

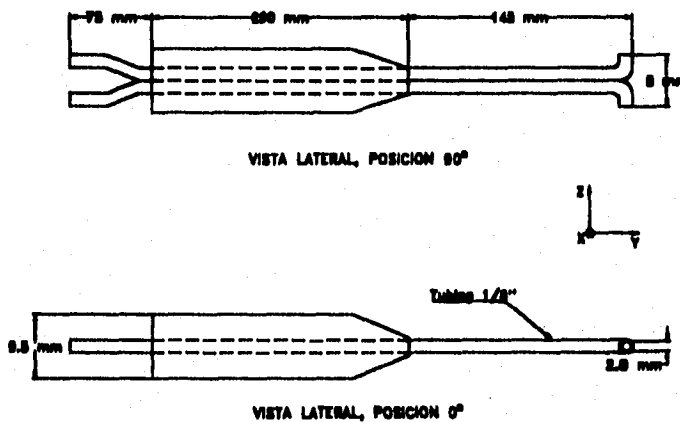


Figura 3.6 Sonda de dos orificios.

La calibración de esta sonda se realizó mediante un ajuste por el método de mínimos cuadrados, se compararon las presiones dinámicas de flujo de aire en un ducto medidas con la sonda de dos orificios contra las presiones dinámicas para los mismos flujos medidas con un tubo de pitot de constante uno, auxiliándose para ambas mediciones con un micromanómetro electrónico.

Se tomaron tres series de lecturas para diferentes aperturas de succión del ventilador obteniéndose los promedios respectivos para cada lectura como se muestra en la tabla 1.

Como el incremento de las presiones perten ambas de cero a partir de la presión atmosférica, la ecuación que representa la curva de calibración es:

$$\Delta P_{\text{pitot}} = m \Delta P_{\text{sonda}}$$

Donde m es la constante de calibración que se busca.

Tabla 1 Valores promedio de lecturas para diferentes aperturas de succión del ventilador.

Apertura de succión	$\Delta P$ sonda mm H <sub>2</sub> O	$\Delta P$ pitot mm H <sub>2</sub> O
1	0.51	0.51
2	7.52	6.09
3	12.85	11.00
4	16.07	13.02
5	17.23	14.08
6	17.20	14.15

Finalmente aplicando el método de mínimos cuadrados a los valores dados en la tabla 1, se encontró que:

$$m = 0.82$$

Por lo tanto, la ecuación que representa la relación y su respectivo valor de corrección entre  $\Delta P$  sonda y  $\Delta P$  pitot es:

$$\Delta P \text{ pitot} = 0.82 \Delta P \text{ sonda}$$

### 3.3.3 SONDA DE UN ORIFICIO.

La sonda de un orificio, utilizada para la obtención de las presiones estáticas del flujo aguas abajo del estabilizador, está contruida en tubing de 1/16" soportada en tubing de 1/4" tal y como se muestra en la figura 3.7, el orificio de esta sonda se dispone sobre un disco de 1/4" de diámetro en sentido axial al flujo siendo lo suficientemente delgado para evitar perturbaciones al flujo. Esta sonda se conecta a la toma positiva de presión del micromanómetro mientras que la toma de presión negativa se deja abierta a la presión atmosférica.

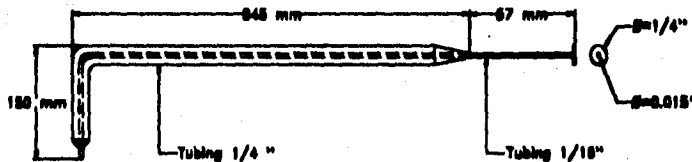


Figura 3.7 Sonda de un orificio.

### 3.3.4 SONDA DE CINCO ORIFICIOS.

La sonda de cinco orificios o direccional, se compone de una cabeza de 5 mm de diámetro, distribuidos en ella cinco orificios de 0.4 mm de diámetro. El orificio central el cual se toma como cero de referencia, está situado en el eje de las X's. (punta de la cabeza). Con relación a este orificio (0), los otros cuatro (1-4), tienen un ángulo de salida de  $45^{\circ}$  y entre sí  $90^{\circ}$  como se muestra en la figura 3.8.

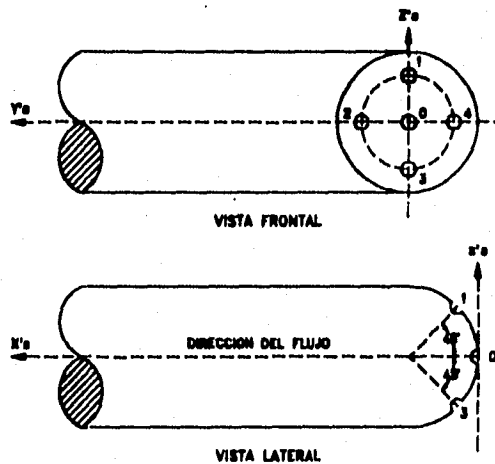


Figura 3.8 Posición de los orificios de la sonda direccional.

Para evitar perturbaciones al flujo en las cercanías del punto de medición, la cabeza y el cuerpo de la sonda están conectados con un cuello de cisne. El principio de medición, operación y calibración así como la determinación del vector velocidad se describe en la referencia 12.

Las mediciones con la sonda de cinco orificios se realizan en el plano central a diferentes distancias aguas abajo del estabilizador, por ejemplo a 5, 10 y 15 cm, posicionando la misma en los puntos radiales usados para determinar la zona de recirculación.

Con los resultados obtenidos mediante el programa de cómputo (apéndice B), es posible graficar las componentes del vector velocidad, la magnitud del vector resultante, así como los perfiles de velocidad en los planos "X-Y" y "X-Z". Para una diferencia de tan sólo un grado en el ángulo  $\alpha$  correcto, la diferencia entre  $P_1$ - $P_2$  es 6% de la presión total medida por la sonda.

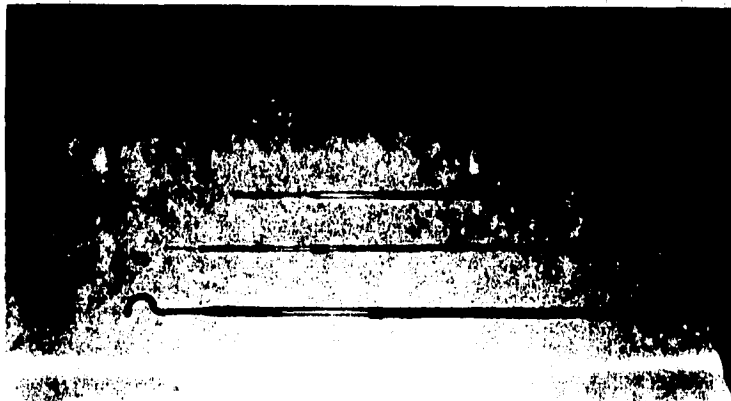
En la fotografía 3.1 se presenta la sonda de cinco orificios así como el tubo de pitot y las sondas de uno y dos orificios descritas anteriormente.

### **3.3.5 MANOMETRO DIFERENCIAL Y SELECTOR DE PRESIONES.**

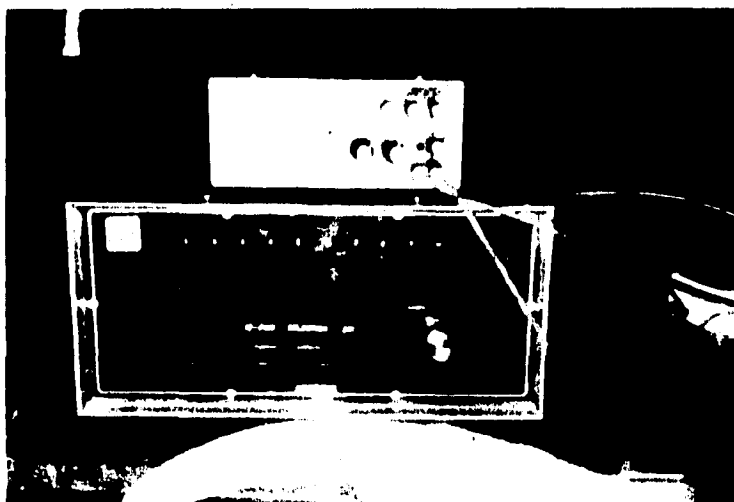
Para la medición de las presiones estáticas y dinámicas del flujo antes y después del estabilizador se utiliza un micromanómetro con una exactitud de 0.01 mm columna de agua.

El selector de presiones es un dispositivo cuya única función es el bloquear tomas de lectura de presión hacia el micromanómetro y el permitir el paso de aire de otras. Este equipo se utiliza particularmente con la sonda de cinco orificios para la determinación del número de giro.

En la fotografía 3.2 se muestra el micromanómetro y el selector de presiones empleados en la experimentación.



**Fotografía 3.1** Tubo de pitot y sondas de dos, uno y cinco orificios.



Fotografía 3.2 Micromanómetro y selector de presiones.

### 3.3.6 ANEMOMETRO DE HILO CALIENTE Y VOLTÍMETRO R.M.S.

El equipo de anemometría consta de las siguientes partes:

1. Unidad de valor medio.
2. Circuito Linealizador.
3. Puente de Wheastone.

Debido a que las mediciones realizadas con el anemómetro y el voltímetro R.M.S. son voltajes, es necesario traducir estos resultados a sus valores correspondientes de velocidad, por lo que es necesario realizar una curva de calibración para el hilo sensor empleado. La curva de calibración consiste en trazar puntos de los valores de voltajes correspondientes a velocidades conocidas de flujos de referencia. Estos flujos se pueden obtener con el equipo de calibración marca DISA modelo 55D44. El hilo sensor puede calibrarse con este equipo, y comprobarse contra un medidor digital de temperatura y velocidad de aire, en un túnel de viento.

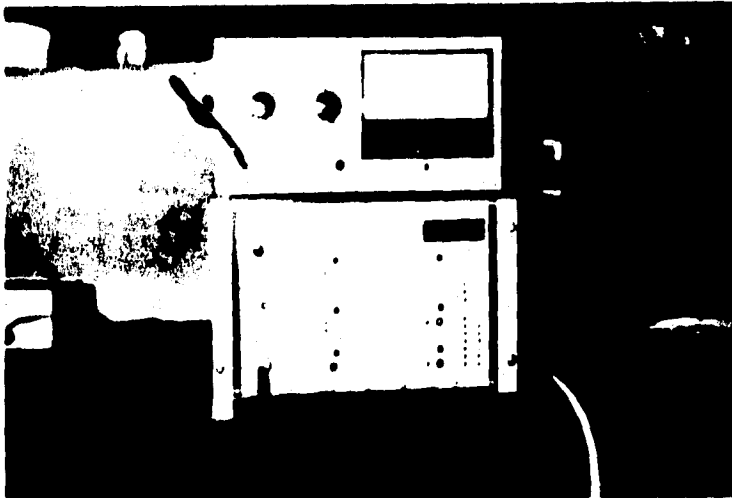
La exactitud en las mediciones con el anemómetro de hilo caliente es del 2.0% de 0 a 50 m/s mientras que su resolución es del 0.3 m/s, mientras que para el voltímetro R.M.S se tiene una exactitud de 0.5% de la escala de medición.

En la fotografía 3.3 se muestra el anemómetro de hilo caliente y el voltímetro R.M.S.

### 3.3.7 POSICIONADOR DE CUATRO MOVIMIENTOS.

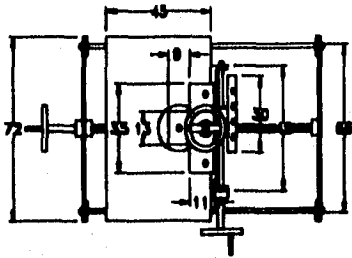
El posicionador de cuatro movimientos es un dispositivo mecánico dispuesto de tal forma que permite cuatro grados de libertad si se considera un sistema tridimensional X,Y y Z, así como un movimiento rotacional.

En el plano 3-01 se presenta el posicionador de cuatro movimientos utilizado como equipo auxiliar en el desarrollo de la experimentación.

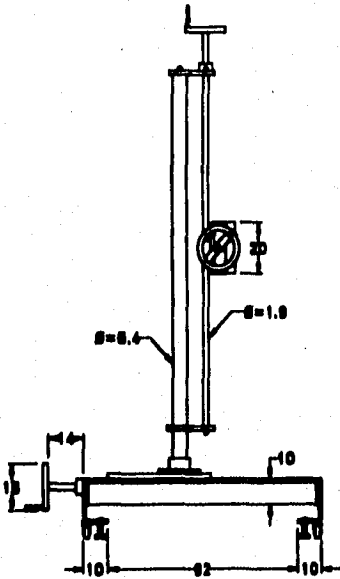


Fotografía 3.3 Anemómetro de hilo caliente y voltímetro R.M.S.

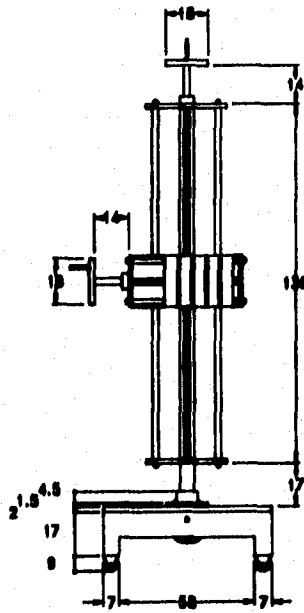




VISTA SUPERIOR



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

NO. DE PLANO	3-01	POSICIONADOR DE CUATRO MOVIMIENTOS
ESC. 1/1		
ABR. 1985		
	ELABOR: JOSE LUIS OSORIO TORRES.	
	REVIS: M.J. JOSE OSCAR MARTINEZ FLORES.	
FECHA: OCTUBRE 1985	ULTIMO CAMBIO:	

## CAPITULO 4

### CONSTRUCCION DE LOS MODELOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los planos de construcción de los modelos de quemadores empleados en la experimentación, así como algunos de los estabilizadores evaluados en este trabajo. Además se muestran fotografías referentes a los estabilizadores y a las partes principales de construcción de los modelos.

#### 4.1 DESCRIPCION DE LOS PLANOS DE CONSTRUCCION DEL QUEMADOR TIPO TANGENCIAL.

El modelo del quemador tipo tangencial fue construido a escala 1:2 y corresponde al usado en sistemas de combustión de tipo tangencial con capacidad de generación de 158 MW.

Descripción de planos:

##### Plano 4-01

En este plano se presenta el arreglo general del modelo experimental del quemador tipo tangencial el cual esta conformado por un ventilador centrífugo, un ducto de interconexión fabricado de lona, el modelo del quemador y su soportería fabricada de ángulo de fierro de 2.54 cm (1").

##### Plano 4-02

En este plano se muestra el modelo del quemador tipo tangencial fabricado en acrílico de 4 mm de espesor. El modelo cuenta con un orientador de flujo y una malla, cuyo objetivo es dar uniformidad al flujo, un ducto de aire, una caja de aire, dos toberas auxiliares idénticas, un compartimiento principal y un tubo de pvc de 3.81 cm de diámetro (1 1/2") que sirvió para simular el ducto de combustible del quemador. Para la construcción del modelo se utilizó pegamento industrial para el ensamble de las partes.

##### Plano 4-03

En este plano se muestra el detalle de construcción del compartimiento principal (aquí es donde se aloja el estabilizador).

#### Plano 4-04

El detalle que se muestra en este plano corresponde a las toberas auxiliares las cuales se localizan arriba y abajo del compartimiento principal.

#### Plano 4-05

En este plano se presenta el detalle del orientador de flujo, consta de 10 placas de 29 x 15 cm y 110 celdas menores de 15 x 2.47 cm, distribuidas uniformemente. Cumpliendo con las normas establecidas para este tipo de orientadores, la cual es que la longitud de la celda debe ser 5 a 10 veces el ancho de la celda.

#### Plano 4-06

En este plano se indica claramente el detalle de la malla de uniformidad de flujo de acuerdo con las normas establecidas, la cual está construida con hilo nilón de 0.079 cm (1/32") soportado en un marco de ángulo de fierro de 2.54 cm (1") y de 0.63 cm (1/4") de espesor. Se muestran dos tejidos, el primero consta de 25 hilos horizontales y 24 hilos verticales con una separación entre hilos de 1.27 cm (1/2"), el segundo se realizó con 24 hilos horizontales y 23 hilos verticales también con una separación entre hilos de 1.27 cm (1/2"). La separación entre ambos tejidos se marco en 1.11 cm (7/16") y el paso de aire entre ambos tejidos se arreglo de tal forma que fuese de 0.63 cm (1/4").

#### Plano 4-07

En esta plano se presentan las vistas del ventilador centrífugo empleado para el suministro de aire en el arreglo general del modelo experimental.

Las características de este ventilador son:

- Potencia = 8 HP
- Voltaje = 220 V
- Amperaje = 18 A
- Velocidad = 1730 RPM
- Flujo volumétrico = 2.2963 m<sup>3</sup>/s
- Area de salida = 0.27 m<sup>2</sup>
- Velocidad a la salida = 13.2 m/s

## 4.2 DESCRIPCION DE LOS PLANOS DE CONSTRUCCION DEL QUEMADOR TIPO FRONTAL.

El modelo del quemador tipo frontal fue construido a escala 1:4 y corresponde a una unidad cuya capacidad de producción es de 300 MW.

Descripción de planos:

**Plano 4-08**

Se muestra en este plano el arreglo general del modelo experimental del quemador tipo frontal el cual está integrado por un ventilador centrífugo, un ducto de interconexión fabricado en lona, el modelo del quemador y su soportería fabricada de ángulo de fierro de 2.54 cm (1").

**Plano 4-09**

En este plano se presentan las vistas de construcción del modelo del quemador tipo frontal, las partes que lo componen son un orientador de flujo, una malla de uniformidad de flujo, un ducto de aire y un tubo de pvc de 3.81 cm de diámetro (1 1/2") los cuales fueron montados y fabricados de manera similar al modelo del quemador tangencial a excepción del cuerpo principal del quemador el cual fue construido en lámina de aluminio calibre 16.

**Plano 4-10**

El detalle de construcción del cuerpo principal del quemador mostrado en este plano representa un cuerpo de sección cilíndrica el cual está conformado por tres anillos de distinto diámetro, el más pequeño (de 24.1 cm de diámetro) constituye la sección de la garganta del quemador y el último cono forma un ángulo de salida de 45° denominado "quari".

**Plano 4-11**

Este plano presenta las plantillas de construcción de los quari empleados en la experimentación y fueron fabricados también en lámina de aluminio calibre 16.

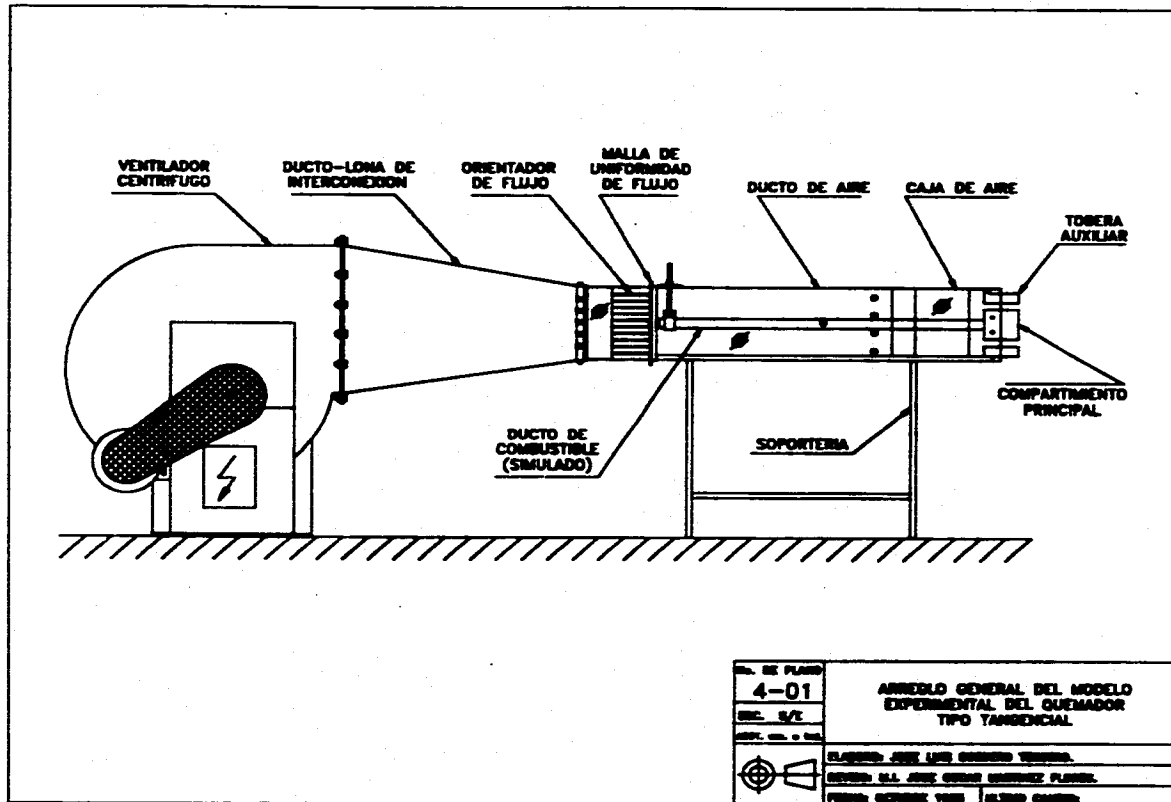
**4.3 DESCRIPCION DE LOS PLANOS DE CONSTRUCCION DE LOS ESTABILIZADORES.**

**Plano 4-12**

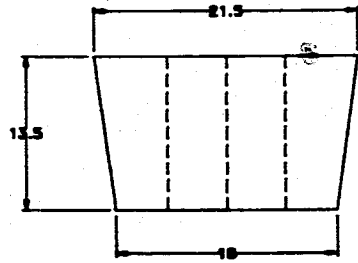
El estabilizador de plato mostrado en este plano fue fabricado completamente en lámina de aluminio cal 16 y el cilindro interior de tubo de acero de 3.81 cm de diámetro (1 1/2"). Este estabilizador está compuesto por un cuerpo cilíndrico y un cono a 30° en forma de plato. Este estabilizador fue el que originalmente se usó en el sistema de combustión de tipo tangencial.

**Plano 4-13, Plano 4-14 y Plano 4-15**

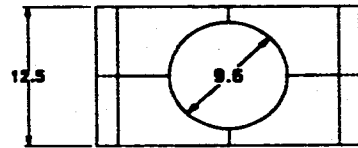
Los estabilizadores de álabes presentados en estos planos fueron fabricados en lámina de aluminio cal 16 y cilindro interior de tubo de acero de 3.81 cm de diámetro (1 1/2"), el ángulo de inclinación de los álabes para cada caso así como su distribución radial se describen en los desarrollos correspondientes al perímetro exterior en cada plano.



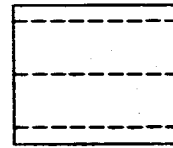





VISTA SUPERIOR

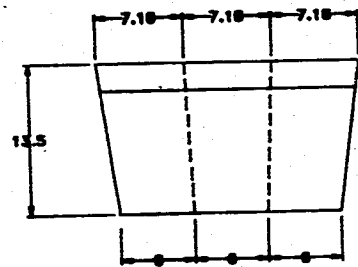


VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL

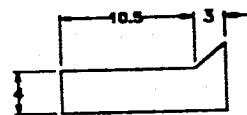
Nº. DE PLANO	DETALLE DEL COMPARTIMENTO PRINCIPAL
4-03	
ESC. 5/8	
REP. No. 0	
	ELABORADO POR: LUIS GONZALEZ TORRES
	REVISADO POR: JESUS GONZALEZ TORRES
	FECHA: OCTUBRE 1988



VISTA SUPERIOR



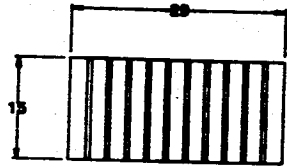
VISTA FRONTAL



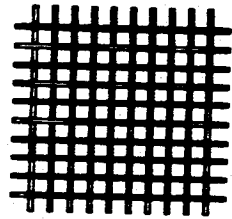
VISTA LATERAL

No. DE PLANO <b>4-04</b> ESC. 2/1 FECH. 20.10.68	<b>DETALLE DE LAS TOBERAS AUXILIARES</b> ELABORADO POR: JESÚS GONZÁLEZ TORRES. REVISADO POR: EL JEFE DE LOS SERVICIOS TÉCNICOS. PERIODO DE EJECUCIÓN: 20.10.68
---	---

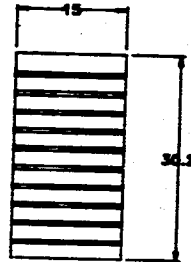




VISTA SUPERIOR



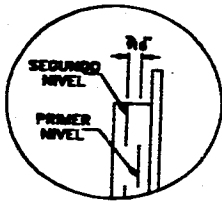
VISTA FRONTAL



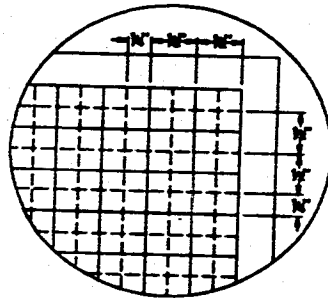
VISTA LATERAL

NO. DE PLANO	4-05	DETALLE DEL ORIENTADOR DE FLUJO
ESC.	3/2	
PROY. CON. O T.M.		
	ELABORADO POR: J. L. GARCIA VILLANOVA	
	REVISADO POR: M. J. GARCIA VILLANOVA	
	FECHA: OCTUBRE 1988	ALTERNATIVO

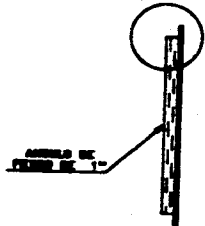
DETALLE A  
NIVELES DE TEJIDO  
DE LA MALLA



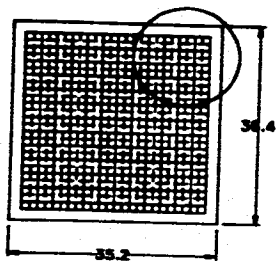
DETALLE B  
DISTRIBUCION  
DE TEJIDOS




DETALLE A

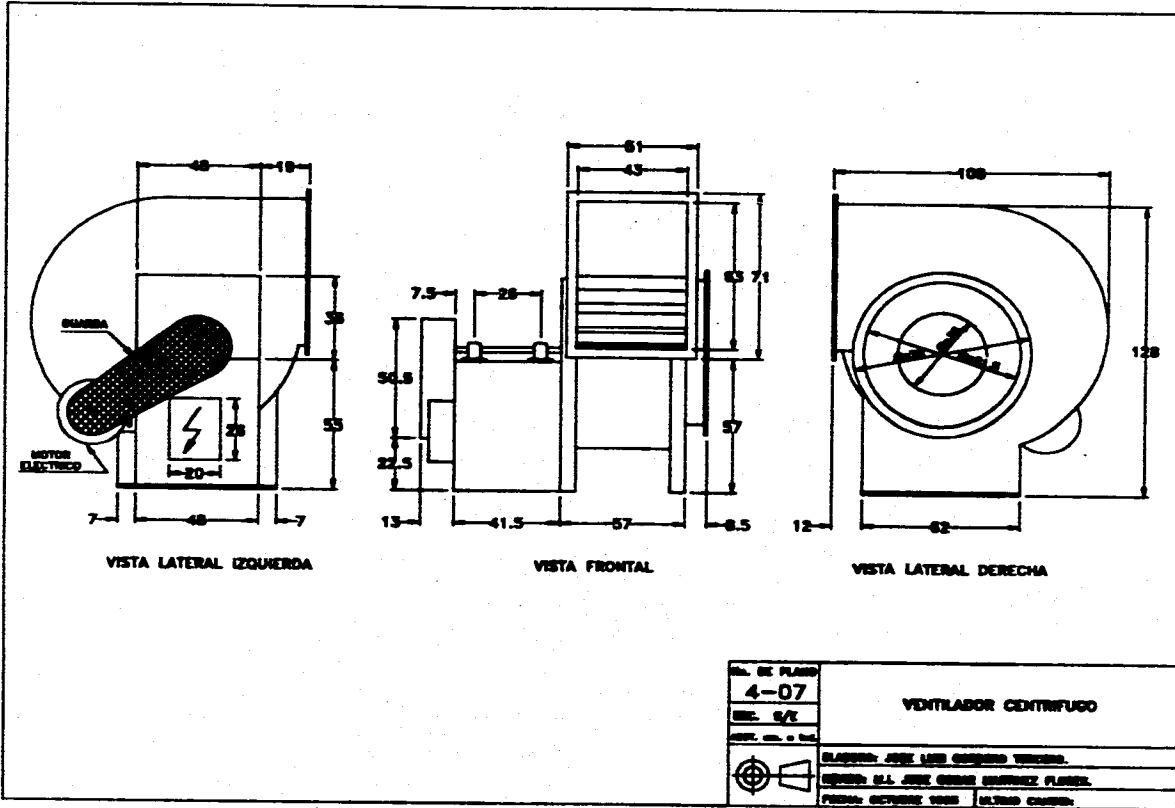


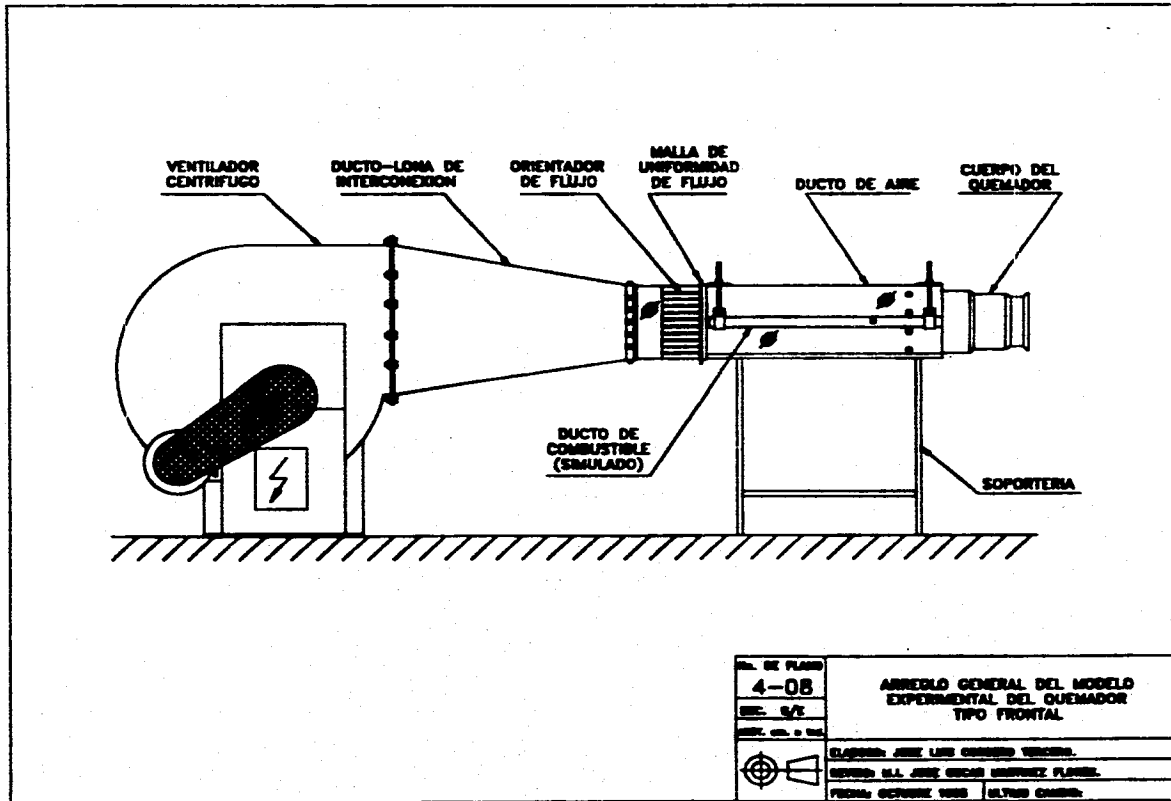
DETALLE B

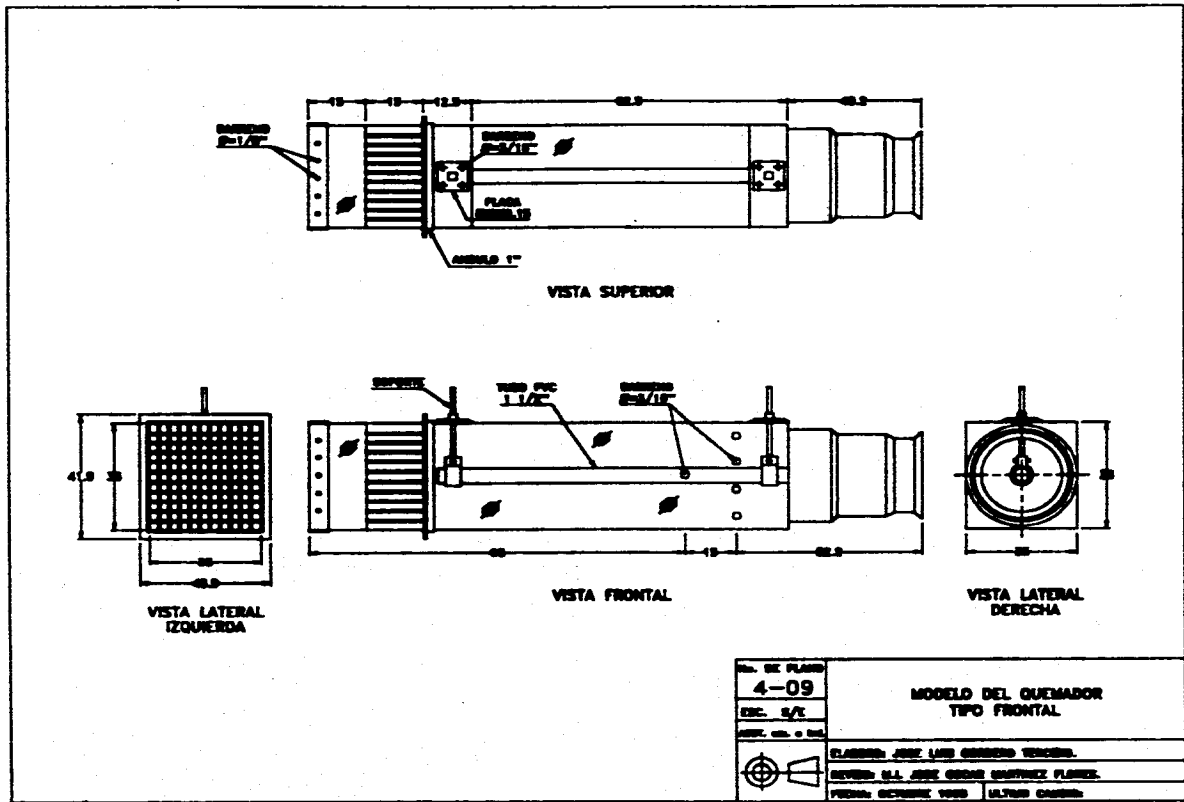



— TEJIDO PRIMER NIVEL  
 - - - TEJIDO SEGUNDO NIVEL

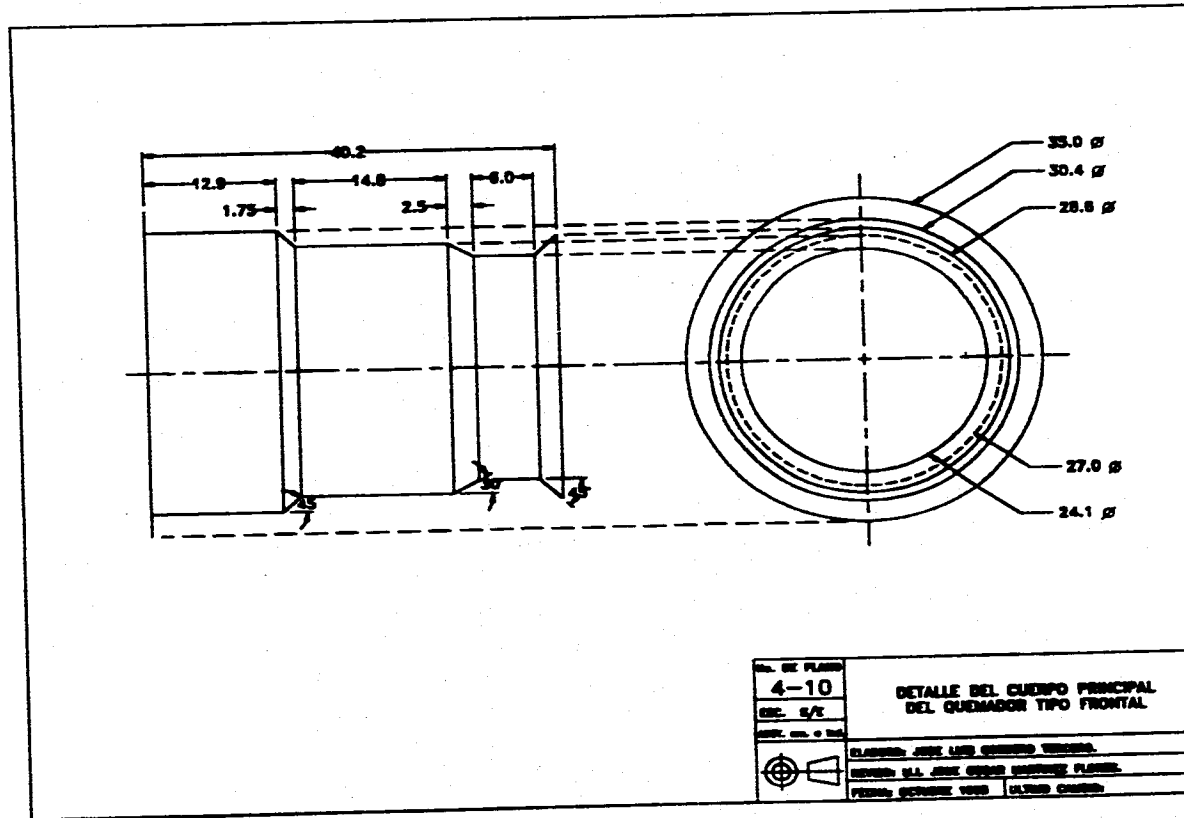
NO. DE PLANO	<b>4-06</b>	<b>DETALLE DE LA MALLA DE UNIFORMIDAD DE FLUJO</b>
ESC. 5/8		
PROY. CIV. Y MEC.	ELABORADO POR: LUIS GUERRERO VARGAS	
	REVISADO POR: JORGE GUERRERO VARGAS	
	FECHA DE EMISIÓN: 2008   EL TIPO: GENERAL	

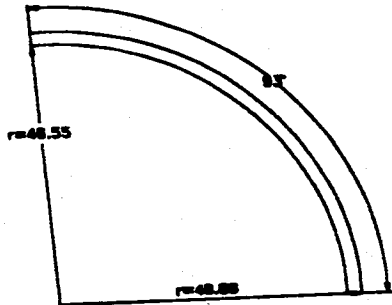




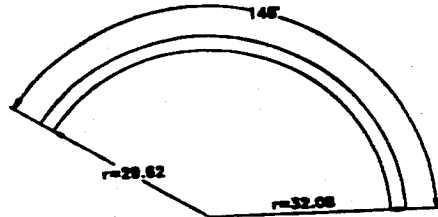


No. DE PLANO <b>4-09</b> ESC. 5/8" AUT. 100.000	<b>MODELO DEL QUEMADOR          TIPO FRONTAL</b>
	PLABON: JOSE LUIS GONZALEZ VENCES. DISEÑO: S.L. JOSE GONZALEZ VENCES PLABON. FEDERAL: ESTEBAN VARGAS ULTRERAS CAMERO.

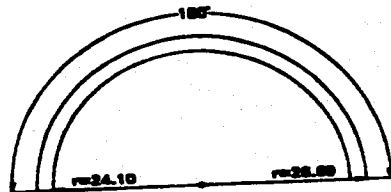




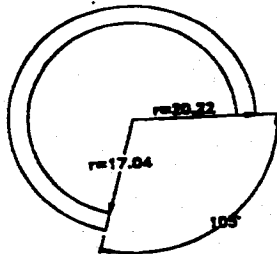
QUARL A 15°



QUARL A 24°



QUARL A 30°



QUARL A 45°

No. DE PLANO

4-11

ESC. 3/2

PROY. CIVIL - 1968



PLANTILLAS DE CONSTRUCCION DE  
LOS QUARL DE SALIDA

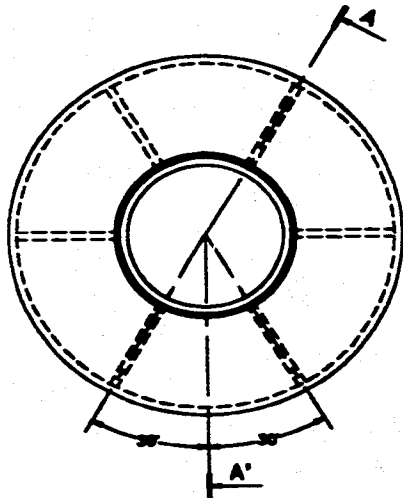
DISEÑADO POR: LUIS GONZALEZ TORRES

REVISADO POR: JOSE GONZALEZ MARTINEZ PLAZA

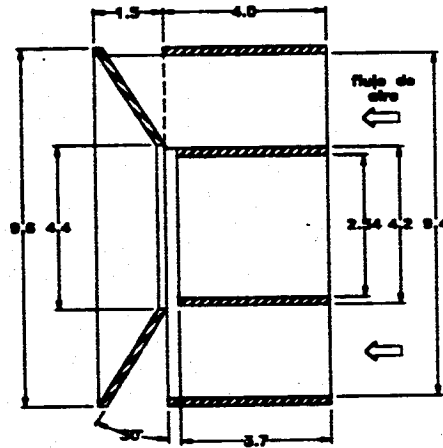
FECHA: OCTUBRE 1968

ALVARO CARRERA

VISTA FRONTAL



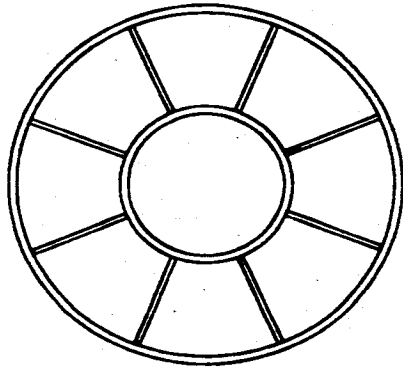
CORTE A-A'



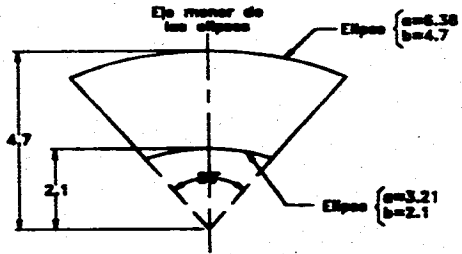
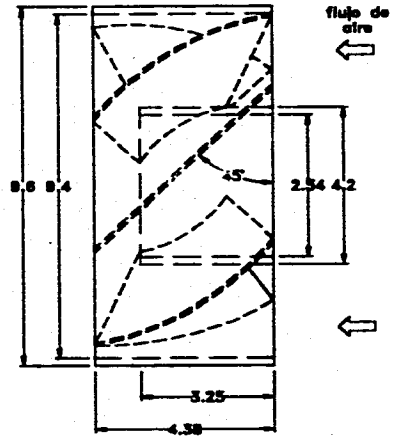
NO. DE PLANO	ESTABILIZADOR DE PLATO
4-12	
ESC. 5/8"	
PROY. EN C. 1/4"	
	PLANTEO POR LOS CUERPOS VISIBLES.
	SEÑAL: EL QUE SEAN VISIBLES PLANTEO.
	PROYECTO SEÑAL: VISO ALIADO SEÑAL.




VISTA FRONTAL

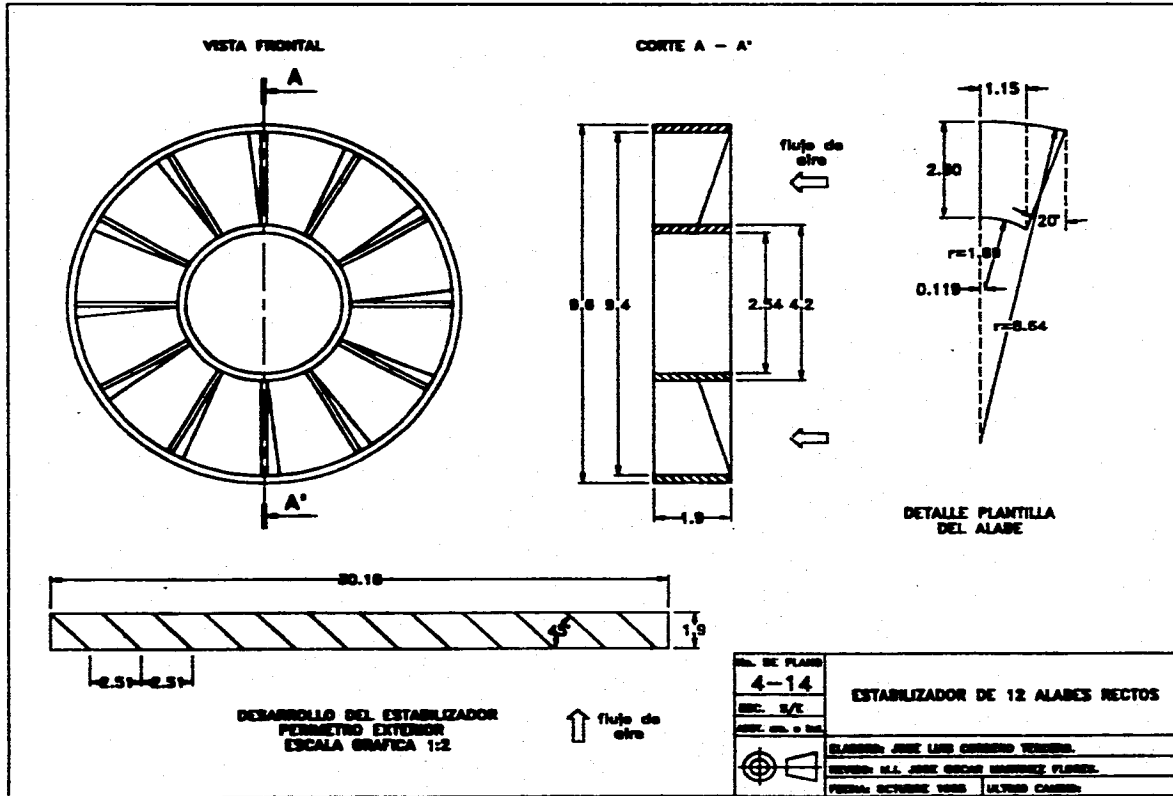


VISTA LATERAL



DETALLE PLANTILLA DEL ALABE

No. DE PLANO <b>4-13</b> E.C. S/E DISE. No. o Mod.	<b>ESTABILIZADOR DE 8 ALABES RECTOS</b>
	ELABORADO POR: JESÚS LUIS GONZÁLEZ TORRES. REVISADO POR: JESÚS GÓMEZ GONZÁLEZ FLORES. FECHA: SEPTIEMBRE 2008   ÚLTIMO CAMBIO:



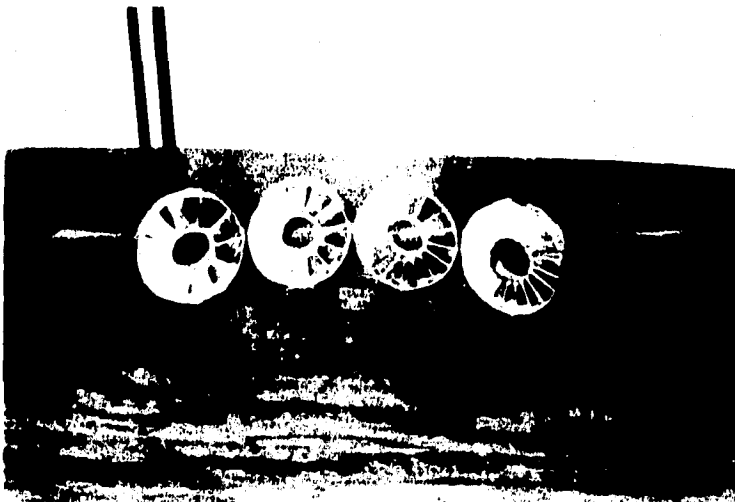


En las fotografías que se presentan a continuación se muestran algunos de los elementos más importantes de los quemadores construidos para la validación de la metodología propuesta.

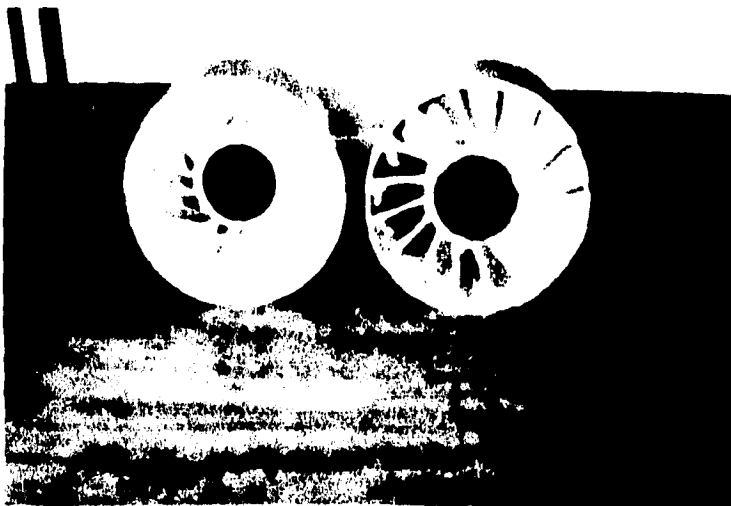
En la fotografía 4.1 se muestran 4 estabilizadores de 10, 12, 16 y 20 álabes rectos cuya construcción es referida al plano 4-14. En la fotografía 4.2 se presentan dos estabilizadores de doble ángulo, el primero de izquierda a derecha, es de 16 álabes con un ángulo de entrada de  $67.5^\circ$  y un ángulo de salida de  $30^\circ$  y el segundo con un ángulo de entrada de  $67.5^\circ$  y un ángulo de salida de  $50^\circ$  también de 16 álabes. En la fotografía 4.3 aparecen 4 estabilizadores, los tres primeros de 8, 12 y 22 álabes son correspondientes a un diámetro de 121 mm. y el cuarto estabilizador de 16 álabes posee un diámetro de 96 mm.

En la fotografía 4.4 se pueden apreciar los elementos principales del modelo construido del quemador tangencial los cuales corresponden al ducto, caja de aire, toberas auxiliares y compartimiento principal. En la fotografía 4.5 se observa el orientador de flujo colocado en la parte posterior del modelo del quemador, junto se puede apreciar parte de la malla de uniformidad.

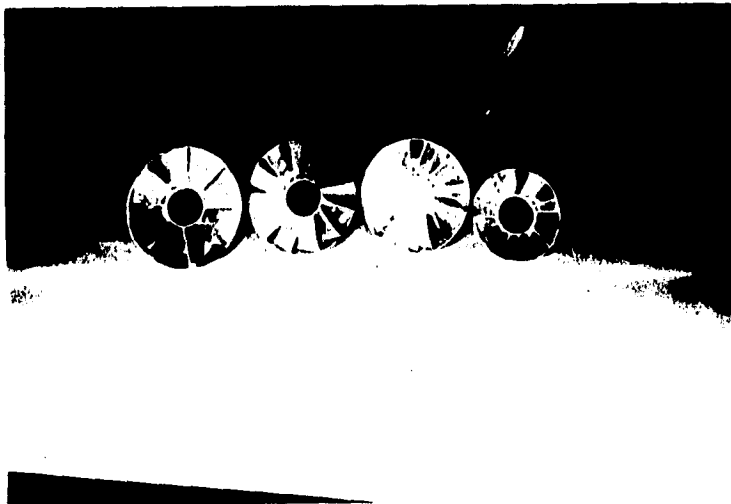
En la fotografía 4.6 se presenta el modelo del quemador frontal, se aprecia la construcción del cuerpo principal del quemador así como la localización del estabilizador durante las pruebas experimentales. Finalmente en la fotografía 4.7 se muestran los querl de salida a  $45^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $24^\circ$  y  $15^\circ$  que fueron construidos para las pruebas del modelo frontal.



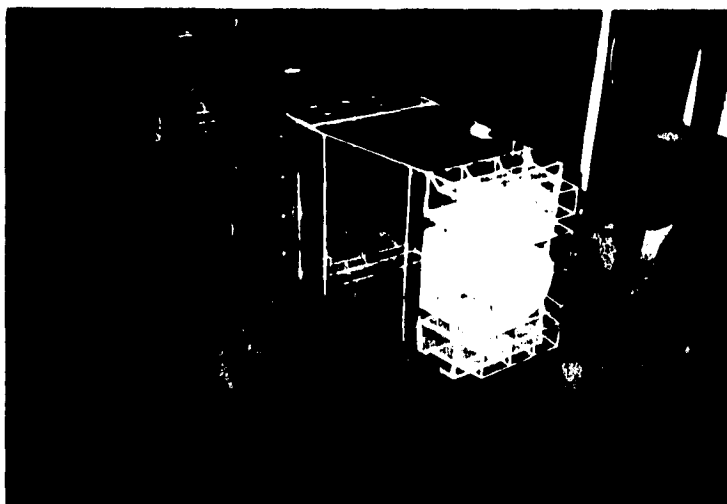
Fotografía 4.1 Estabilizadores de álabes rectos.



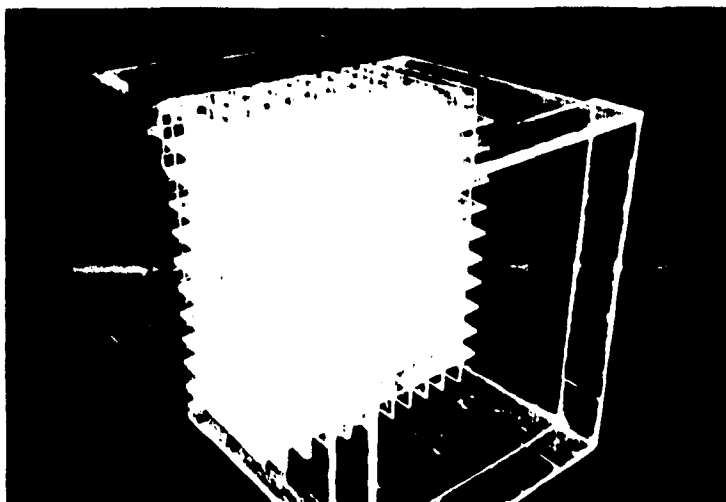
Fotografía 4.2 Estabilizadores de doble ángulo.



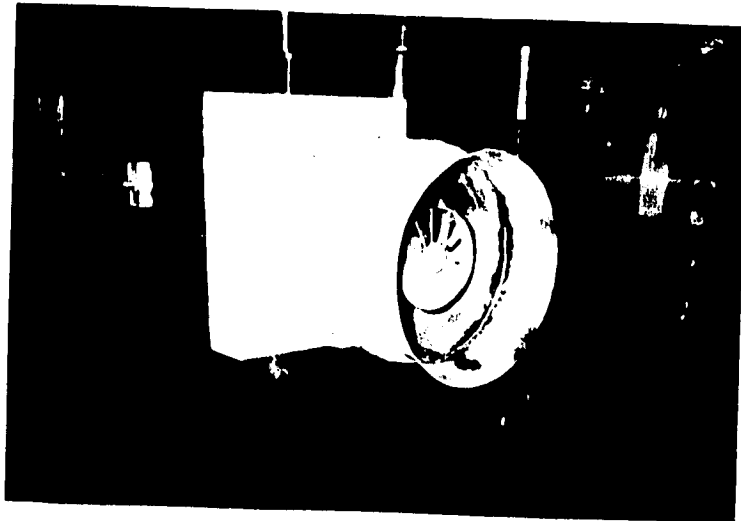
Fotografía 4.3 Estabilizadores modificados en diámetro.



Fotografía 4.4 Elementos principales del modelo tangencial.



Fotografía 4.5 Orientador de flujo.



Fotografía 4.6 Modelo del quemador frontal.



Fotografía 4.7 Diferentes quarl de salida.

## CAPITULO 5

### RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA VALIDACION EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGIA PROPUESTA.

#### 5.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO DEL QUEMADOR TANGENCIAL.

Los resultados que se presentan en esta sección fueron obtenidos al aplicar la metodología propuesta a un modelo de quemador de tipo tangencial, el cual corresponde al quemador usado en el sistema de combustión de una unidad de 300 MW. Originalmente el estabilizador usado en este tipo de quemadores era un estabilizador de plato (también conocido como de disco o "Bluff Body"). Desde el inicio de su funcionamiento, este estabilizador presentó problemas de tipo operacional (originado fundamentalmente por el quemado del mismo), por lo que el personal de la C.T. decidió cambiarlo por un estabilizador de ocho álabes rectos a  $45^\circ$  sin verificar su funcionamiento desde el punto de vista fluidodinámico. La fotografía 5.1 muestra el modelo experimental utilizado, mientras que la fotografía 5.2 muestra el estabilizador original y el de ocho álabes rectos.



Fotografía 5.1 Modelo experimental utilizado.





Fotografía 5.2 Estabilizador original y de 8 álabes rectos.

#### **5.1.1 PERFILES DE VELOCIDAD EN EL DUCTO DE ALIMENTACION CON Y SIN ESTABILIZADOR.**

De acuerdo con la metodología, el objetivo de esta prueba fue determinar los perfiles de velocidad del flujo de aire dentro del ducto de alimentación, ya que estos perfiles de velocidad influyen en la formación de la zona de recirculación aguas abajo de la salida del quemador.

Las mediciones se realizaron en 16 puntos transversales al ducto del modelo del quemador de acuerdo con la norma establecida en la metodología.

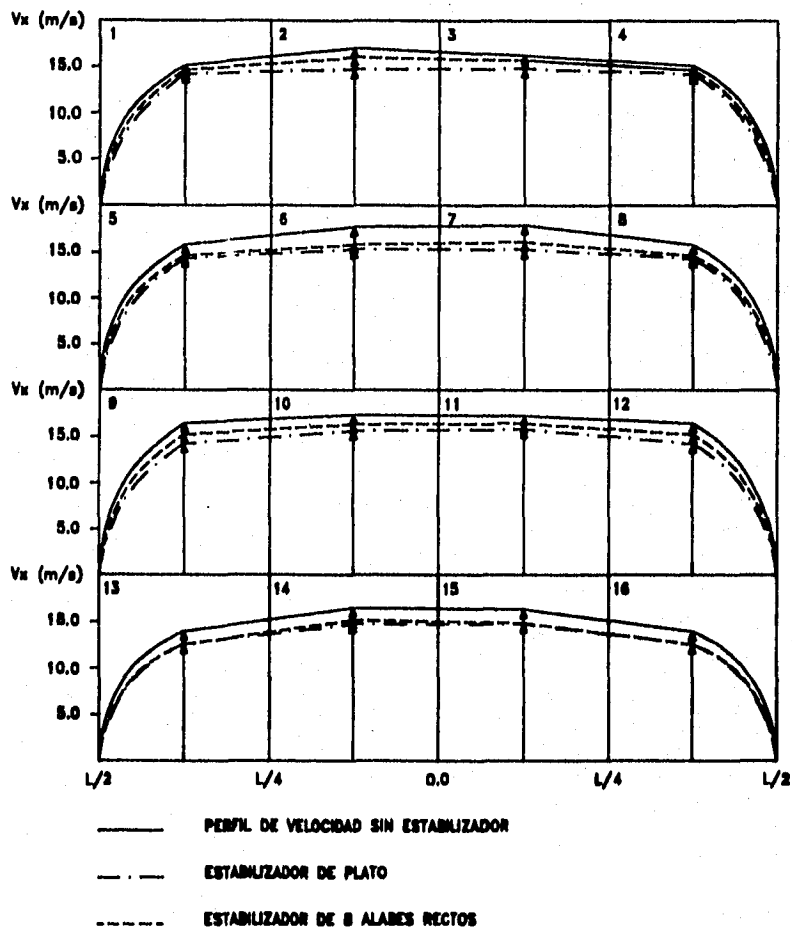
La tabla 5.1 presenta los valores de velocidad obtenidos sin estabilizador y con los estabilizadores de plato y 8 álabes rectos, mientras que la figura 5.1 muestra la comparación de los perfiles de velocidad sin estabilizador con los valores promedio de los dos estabilizadores.

Comparando los perfiles de velocidad se observa que ambos son simétricos y completamente desarrollados, con los máximos valores de velocidad en el centro y disminuyen hasta alcanzar cero en las paredes. Las velocidades en el ducto sin estabilizador son el 8% (en promedio) mayores en todos los puntos que los valores

promedio de velocidad con los dos estabilizadores. Lo anterior se interpreta como que el 8% de la presión dinámica del fluido se transforma en presión estática para vencer la caída de presión provocada por la presencia del estabilizador.

**Tabla 5.1** Valores de velocidad axial en el ducto de alimentación sin estabilizador, con estabilizador de plato y con estabilizador de 8 álabes.

Punto de medición	Sin estabilizador Velocidad (m/s)	Estab. de plato Velocidad (m/s)	Estab. 8 álabes Velocidad (m/s)
1	15.14	14.27	14.60
2	15.72	14.73	15.06
3	16.21	14.86	15.78
4	15.14	14.27	14.60
5	15.82	14.37	14.67
6	16.74	15.34	15.78
7	16.93	15.32	16.15
8	15.82	14.37	14.67
9	16.48	14.12	15.26
10	17.37	15.63	16.30
11	17.27	15.88	16.43
12	16.48	14.12	15.26
13	13.91	12.56	12.52
14	16.45	14.71	15.11
15	16.30	14.73	14.81
16	13.91	14.56	12.52



**Figura 5.1** Comparación de los perfiles de velocidad producidos sin estabilizador con los perfiles de velocidad promedio producidos por los estabilizadores de plato y de 8 álabes rectos.

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

### **5.1.2 CALCULO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL QUEMADOR CON Y SIN ESTABILIZADOR.**

El objetivo de esta prueba es determinar el CD del quemador con y sin estabilizador, este coeficiente es una medida de la eficiencia del quemador, ya que proporciona la relación existente entre el flujo real contra el flujo teórico que maneja el propio quemador.

El flujo real se determino mediante la ecuación (3.2) de la metodología sustituyendo los valores de la velocidad determinada en la prueba anterior. Mientras que el flujo teórico es el que proporciona el ventilador utilizado ajustado por presión y temperatura del lugar donde se realizaron las pruebas.

Determinados tanto el flujo real como el flujo teórico se sustituyen en la fórmula (3.1) de la metodología para determinar el CD del quemador.

La tabla 5.2 muestra el CD del quemador sin estabilizador y utilizando los estabilizadores de plato y los estabilizadores de 8, 12, y 16 álabes rectos.

**Tabla 5.2 CD del quemador con y sin estabilizadores.**

<b>Nombre del estabilizador</b>	<b>Gasto Teórico (Kg/s)</b>	<b>Gasto Real (Kg/s)</b>	<b>CD calculado (adimensional)</b>
<b>s/estabilizador</b>	<b>2.3294</b>	<b>1.4501</b>	<b>0.6225</b>
<b>plato</b>	<b>2.3294</b>	<b>1.3182</b>	<b>0.5659</b>
<b>8 álabes</b>	<b>2.3294</b>	<b>1.3618</b>	<b>0.5846</b>
<b>12 álabes</b>	<b>2.3294</b>	<b>1.3660</b>	<b>0.5864</b>
<b>16 álabes</b>	<b>2.3294</b>	<b>1.3550</b>	<b>0.5817</b>

De la tabla se observa que sin estabilizador se tiene el mayor CD (0.6225), al utilizar el quemador con cualquiera de los tres estabilizadores de álabes rectos, estos presentan prácticamente el mismo valor del CD, no así al utilizar el quemador con un

estabilizador de plato ya que con éste se obtuvo un menor valor del CD (0.5659). Lo anterior es debido a la mayor caída de presión que provoca este tipo de estabilizador, por la forma del mismo.

Una alternativa para calcular el CD del quemador es utilizar la fórmula (3.5) de la metodología, la cual es función de la geometría del quemador, la caída de presión y la presencia del estabilizador.

La tabla 5.3 muestra los resultados obtenidos del CD al aplicar la fórmula (3.5) y la comparación de los mismos con los resultados obtenidos por medición, así como la diferencia en % obtenido entre ambos.

Tabla 5.3 Resultados del CD general del quemador empleando la fórmula (3.5).

Nombre del estabilizador	Flujo real (Kg/s)	Caída de presión estat (mmH <sub>2</sub> O)	CD (fórmula) (adimensional)	CD (medición) (adimensional)	Diferencia ( % )
s / estab.	1.4501	52.8	0.6349	0.6225	1.95
plato	1.3182	62.2	0.5290	0.5659	6.52
8 álabes	1.3618	59.2	0.5649	0.5846	3.37
12 álabes	1.3660	58.3	0.5712	0.5864	2.59
16 álabes	1.3550	59.1	0.5628	0.5817	3.25

De la tabla anterior se puede observar que la mayor diferencia se obtuvo con el estabilizador de plato (6.52 %), mientras que la menor diferencia fue sin estabilizador (1.95%). La diferencia promedio para todos los cálculos fue de 3.5%.

### 5.1.3 CALCULO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL ESTABILIZADOR.

La metodología presenta un procedimiento para determinar el Cs del estabilizador, dicho procedimiento relaciona el coeficiente de pérdidas totales del sistema con los coeficientes de pérdidas de cada uno de los elementos del quemador. Utilizando las dimensiones físicas del quemador y el estabilizador (Dh y ds), asumiendo que el

coeficiente de descarga de las toberas es igual a 1 [8], el coeficiente de pérdidas del estabilizador se puede expresar como:

$$[K_s]^{1/2} = \frac{0.4420}{\left[ \frac{1}{K_r - 1.5806} \right]^{1/2} - 0.5580} \quad (5.1)$$

Pero:

$$C_s = \frac{1}{[K_s]^{1/2}} \quad \text{Y} \quad K_r = \frac{1}{C^2} \quad (5.2)$$

La tabla 5.4 presenta los resultados obtenidos para el coeficiente de descarga de los cuatro estabilizadores ya mencionados.

Tabla 5.4 resultados obtenidos para el coeficiente de descarga de cada estabilizador.

Nombre del estabilizador	CD del quemador (adimensional)	Coef. pérdidas del estabilizador $K_s^{1/2}$ (adimensional)	$C_s$ del estabilizador (adimensional)
plato	0.5659	1.7856	0.5600
8 álabes	0.5846	1.4525	0.6884
12 álabes	0.5864	1.4260	0.7012
16 álabes	0.5817	1.4977	0.6676

De la tabla 5.4 se observa que cuando el quemador utiliza un estabilizador de plato éste presenta los menores valores del CD de quemador y estabilizador, 0.5659 y 0.5600 respectivamente, mientras que con el estabilizador de 12 álabes rectos, se

presentan los mayores valores de CD de quemador y estabilizador, 0.5864 y 0.7012 respectivamente.

#### **5.1.4 PRUEBA DE CAIDA DE PRESION.**

El objetivo de esta prueba es determinar los parámetros geométricos óptimos del quemador. Debido al tipo de quemador solo se realizó la prueba de la variación en el diseño del estabilizador, debido a que se cambió el estabilizador original por un estabilizador de 8 álabes rectos sin verificar su funcionamiento, se decidió realizar esta prueba ya que el estabilizador de flama para este tipo de quemadores juega un papel vital dentro de su funcionamiento.

##### **5.1.4.1 PRUEBA DE LA VARIACION DE LA FORMA DEL ESTABILIZADOR.**

Para esta prueba se fijó el diámetro del estabilizador en 96 mm. y se probaron tres estabilizadores diferentes, al primero fue el estabilizador de plato (o de disco), el segundo fue el estabilizador de 8 álabes rectos y finalmente un estabilizador de doble ángulo. La figura 5.2 muestra los resultados determinados en esta prueba y la comparación de los mismos sin estabilizador.

De los resultados se observa que al usar el estabilizador de plato en el quemador éste presenta los mayores valores del coeficiente de pérdidas de presión (C.S.), para números de Reynolds iguales, mientras que, si el quemador usa el estabilizador de 8 álabes rectos o el estabilizador de doble ángulo tendrá un mejor funcionamiento y que para números de Reynolds iguales, ambos estabilizadores presenten valores muy similares de coeficientes de pérdidas, los cuales son menores que los coeficientes de pérdidas que presenta el estabilizador de plato.

##### **5.1.4.2 PRUEBA DE LA VARIACION DEL NUMERO DE ALABES.**

Esta prueba se realizó para observar el comportamiento del estabilizador al variar el número de álabes y la forma de los mismos. La prueba se realizó con dos estabilizadores, uno con 12 álabes rectos y otro con 16 álabes rectos ambos también a 45°. Los resultados se muestran en la figura 5.3 y se comparan con los resultados obtenidos con el estabilizador de 8 álabes rectos.

De los resultados se observa que los tres estabilizadores tienen un comportamiento muy similar, esto es para números de Reynolds iguales tienen prácticamente los mismos valores del coeficiente de pérdidas.

#### 5.1.4.3 PRUEBA DE LA VARIACION DEL DIAMETRO DEL ESTABILIZADOR.

Esta prueba tuvo por objetivo evaluar el efecto en el cambio del diámetro del estabilizador, para esta prueba se construyeron dos estabilizadores, uno con 8 álabes y otro con 12 álabes siendo el diámetro para ambos de 121 mm. La figura 5.4 muestre los resultados de esta prueba y se comparan con los obtenidos con el estabilizador de 8 álabes original cuyo diámetro es de 96 mm.

Comparando los resultados obtenidos se observa que al modificar el diámetro del estabilizador, los menores valores del coeficiente de pérdidas se obtienen con el estabilizador de 12 álabes rectos modificado, mientras que el estabilizador original de 8 álabes es el que presente los mayores valores del coeficiente de pérdidas para números de Reynolds iguales.

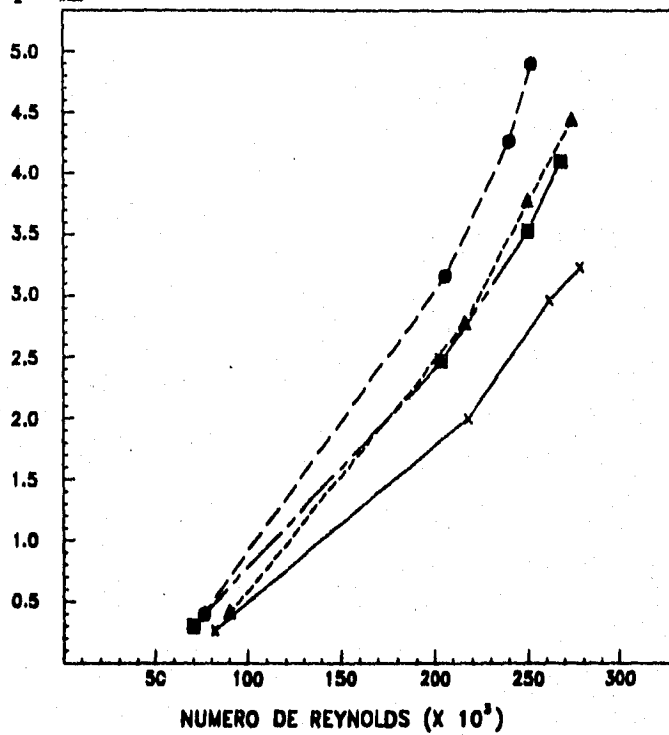
Así también, se presenta en la tabla 5.5 los valores del CD determinados para estos dos últimos estabilizadores, obteniéndose que el estabilizador de 12 álabes modificado presenta un CD de 0.5845 muy similar a los calculados para los demás estabilizadores de álabes, mientras que el Cs fue de 0.8073 el cual es mayor que los determinados para todos los demás estabilizadores anteriormente evaluados.

Tabla 5.5 Coeficientes de descarga del quemador y coeficientes de descarga del estabilizador de 8 y 12 álabes modificados.

Nombre del estabilizador	CD del quemador (adimensional)	Coef. pérdidas del estabilizador $K_s^{1/2}$ (adimensional)	Cs del estabilizador (adimensional)
8 álab. mod.	0.5800	1.2697	0.7875
12 álab. mod	0.5845	1.2385	0.8073



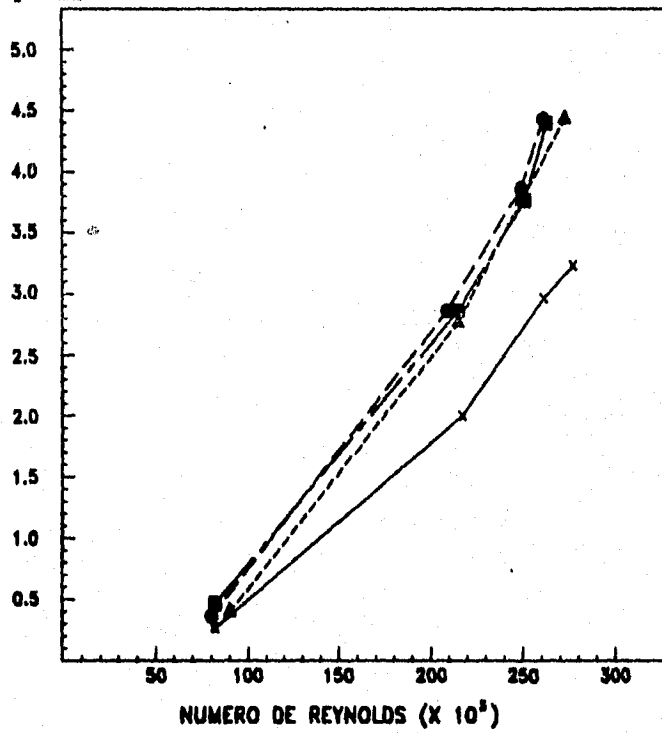
$$C.S. = \frac{\Delta P_s}{\frac{1}{2} \rho V_{max}^2}$$



- SIN ESTABILIZADOR
- -●- ESTABILIZADOR DE PLATO
- ▲- -▲- ESTABILIZADOR DE 8 ALABES
- -■- ESTABILIZADOR DE DOBLE ANGULO

Figura 5.2 Prueba variación forma del estabilizador.

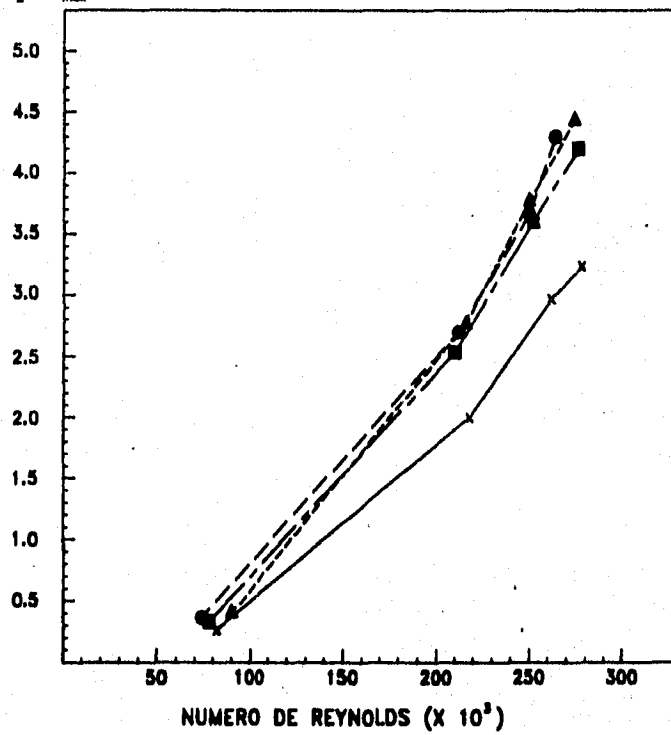
$$C.S. = \frac{\Delta P_s}{\frac{1}{2} \rho V_{WIND}^2}$$



- x — SIN ESTABILIZADOR
- - - Δ - - ESTABILIZADOR DE 8 ALABES
- - - ● - - ESTABILIZADOR DE 12 ALABES
- - - ■ - - ESTABILIZADOR DE 16 ALABES

Figura 5.3 Prueba variación del número de álabes.

$$C.S. = \frac{\Delta P_s}{\frac{1}{2} \rho V_{max}^2}$$



- x—x— SIN ESTABILIZADOR
- ▲-▲- ESTABILIZADOR DE 8 ALABES ORIGINAL
- ESTABILIZADOR DE 8 ALABES MODIFICADO
- ESTABILIZADOR DE 12 ALABES MODIFICADO

Figura 5.4 Prueba variación del diámetro del estabilizador.

## **5.1.5. DETERMINACION DE LA ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD.**

### **5.1.5.1 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL.**

Siguiendo la técnica planteada en la metodología se realizó la prueba de zonas de recirculación para el quemador sin estabilizador y con los estabilizadores de Plato, 8 álabes rectos, 12 álabes rectos y 12 álabes modificados cuyos resultados se presentan a continuación:

En la figura 5.5 se muestran los perfiles de velocidad axial del quemador sin estabilizador, puede observarse que todos son simétricos y completamente desarrollados, alcanzando los máximos valores de velocidad en el centro de cada plano y decreciendo hacia los costados.

En la figura 5.6 se muestran los perfiles de velocidad axial del quemador con un estabilizador de plato, así mismo se indica la zona de recirculación que genera. Como se puede apreciar, los perfiles de velocidad encontrados cambian continuamente de dirección a lo largo de cada plano de medición; solo en los planos  $X=2.5$  cm. y  $X=7.5$  cm. cambió cuatro veces de dirección, mientras que en  $X=12.5$  cm. cambió dos veces, normalizándose el perfil en  $X=17.5$  cm.

Respecto a la zona de recirculación, ésta genera un envoltorio en forma de campana justo en las cercanías del estabilizador, delimitando una segunda zona de recirculación en dirección axial. Esta segunda zona de recirculación se origina por el paso del aire existente entre el tubo de pvc que simula el suministro del combustible al quemador y el estabilizador mismo.

En la figura 5.7 se presentan los perfiles de velocidad y la zona de recirculación provocada por el estabilizador de 8 álabes rectos. Se puede observar como los perfiles de velocidad crecen hacia los costados del estabilizador en dirección axial al flujo y decrecen hacia el centro del mismo estabilizador cambiando incluso de dirección por efecto de la caída de presión existente en esa zona del plano, siendo los más característicos en  $X=7.5$  cm. y  $X=12.5$  cm. de distancia. El perfil se normaliza a medida que se aleja del quemador como se muestra en el plano en  $X=17.5$  cm.

La zona de recirculación se muestra bien definida y con buena simetría; además, no se presentó ninguna zona de recirculación interna como la existente en el estabilizador de plato. El ancho que alcanza esta zona de recirculación es de 42 mm. y una longitud de 165 mm.

En la figura 5.8 se presentan los perfiles de velocidad para un estabilizador de 12 álabes rectos, estos perfiles muestran una buena simetría a lo largo del eje axial al flujo, incrementándose y decrementándose la magnitud de sus vectores de velocidad y cambiando de dirección también hacia el centro de cada plano, normalizándose en  $X = 17.5$  cm.

La zona de recirculación a comparación del estabilizador de 8 álabes rectos es ligeramente más corta, de aproximadamente 145 mm., pero más ancha hacia la base misma, alcanzando aproximadamente 44 mm. Se observa que la zona de recirculación posee una geometría más proporcional con respecto a sus dimensiones de largo-ancho y una buena simetría.

Los perfiles de velocidad presentados en la figura 5.9 para el estabilizador de 12 álabes modificado muestra vectores de velocidad de mayor magnitud a comparación de todos los estabilizadores anteriores. El cambio de dirección del perfil ocurre inclusive en el plano  $X = 17.5$  cm. lo que no ocurrió con ningún otro estabilizador.

La zona de recirculación encontrada presenta una geometría similar a la del estabilizador de 12 álabes rectos, pero de proporciones mayores, alcanzando un ancho de aproximadamente 52 mm. y una longitud de aproximadamente 203 mm.

En operación real este estabilizador definiría la mejor opción de funcionamiento con respecto a todos los estabilizadores anteriores, ya que muestra vectores de velocidad de mayor magnitud así como una zona de recirculación más grande y simétrica. Además, se tendría una flama más definida, estable y de mayores proporciones para las mismas condiciones de funcionamiento que los otros estabilizadores con respecto al suministro de aire.

En la tabla 5.6 se muestran los valores de velocidad máximos alcanzados en cada plano por cada estabilizador y en la tabla 5.7 las dimensiones promedio de sus respectivas zonas de recirculación.

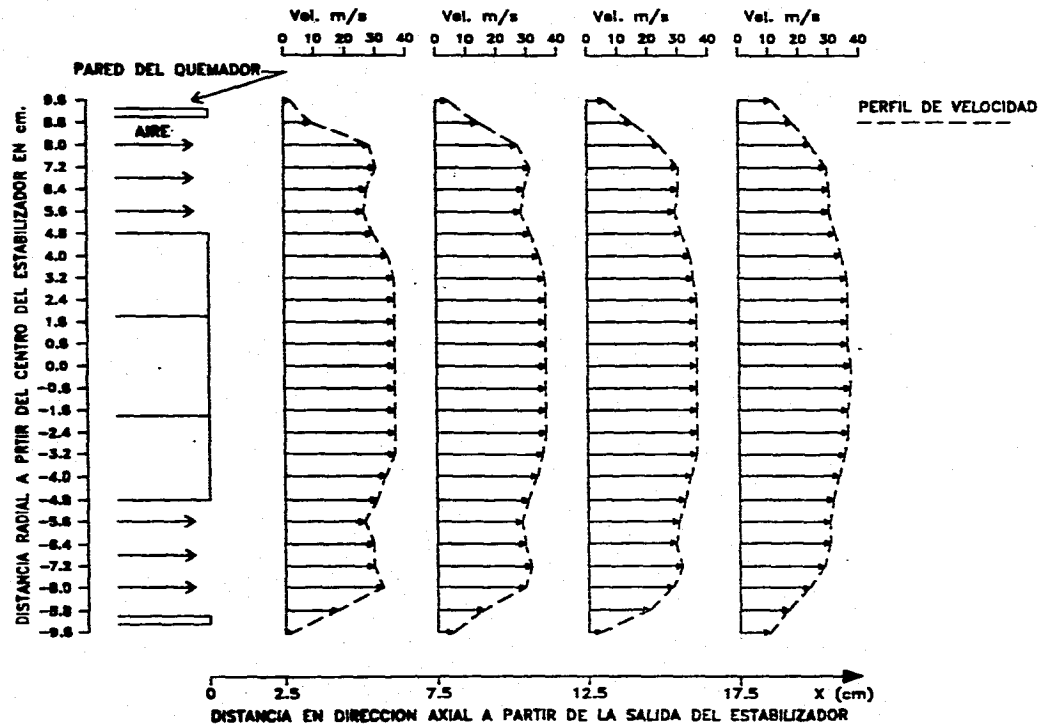


FIGURA 5.5 PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL DEL QUEMADOR SIN ESTABILIZADOR.

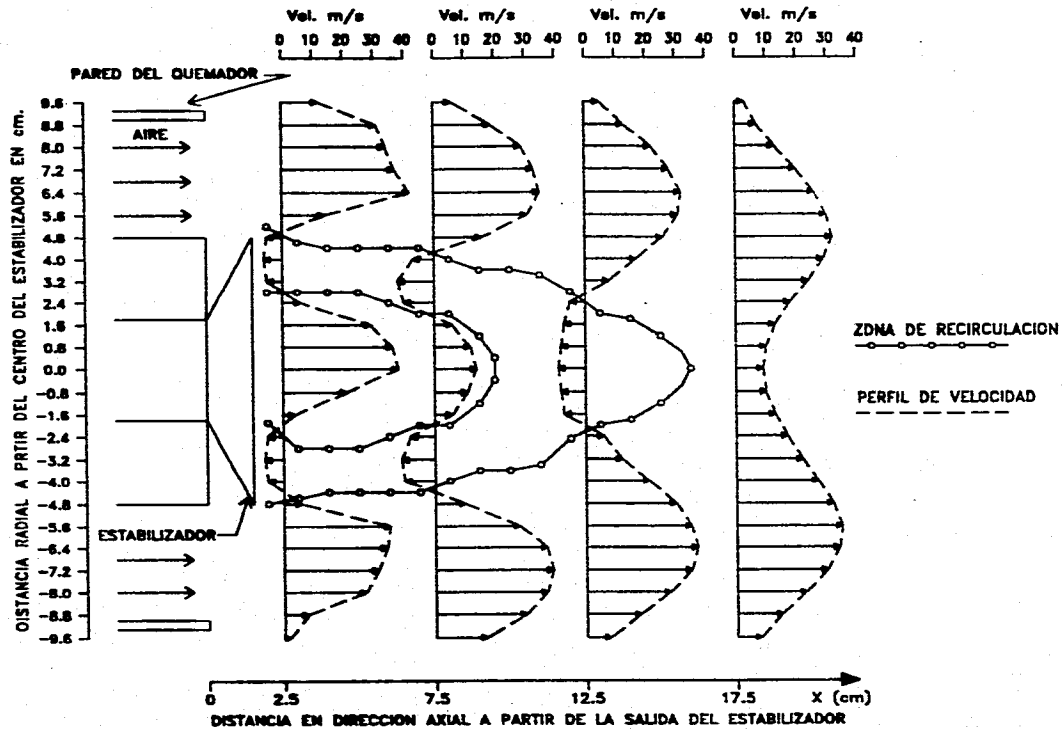


FIGURA 5.6 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE PLATO.

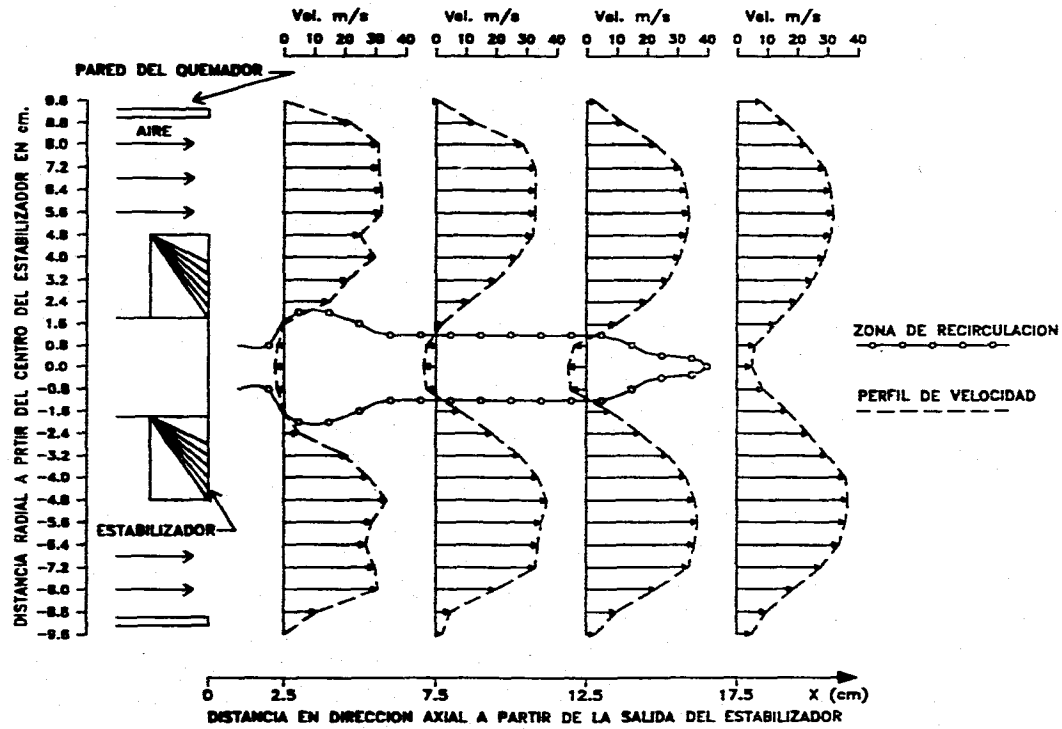


FIGURA 5.7 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE 8 ALABES RECTOS.



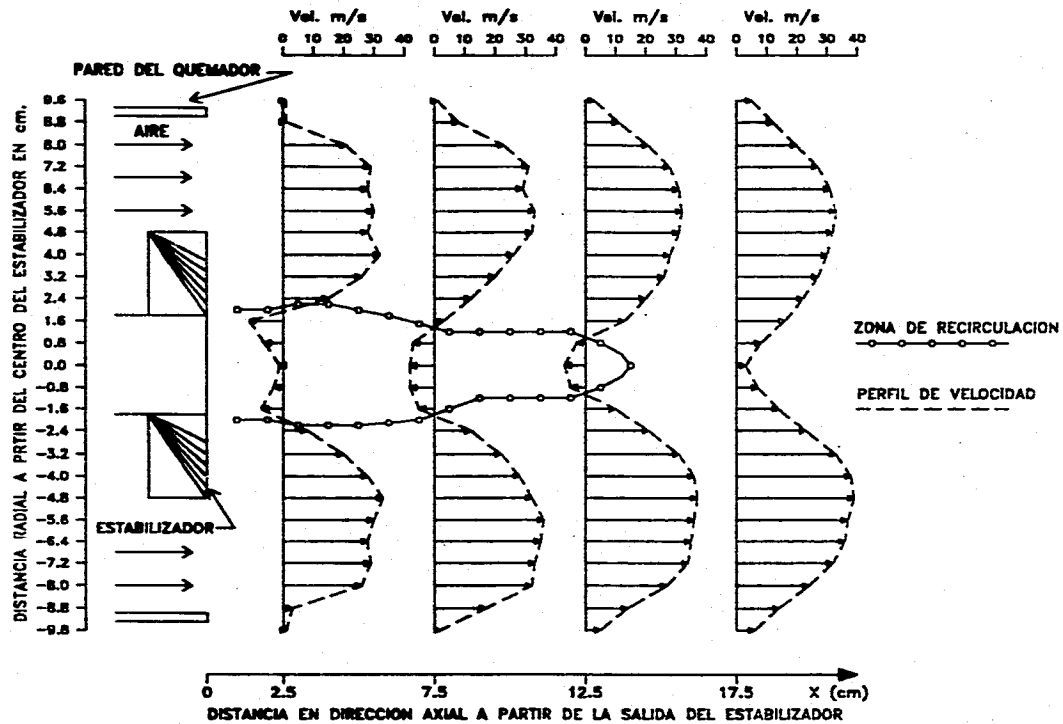


FIGURA 5.8 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE 12 ALABES RECTOS.

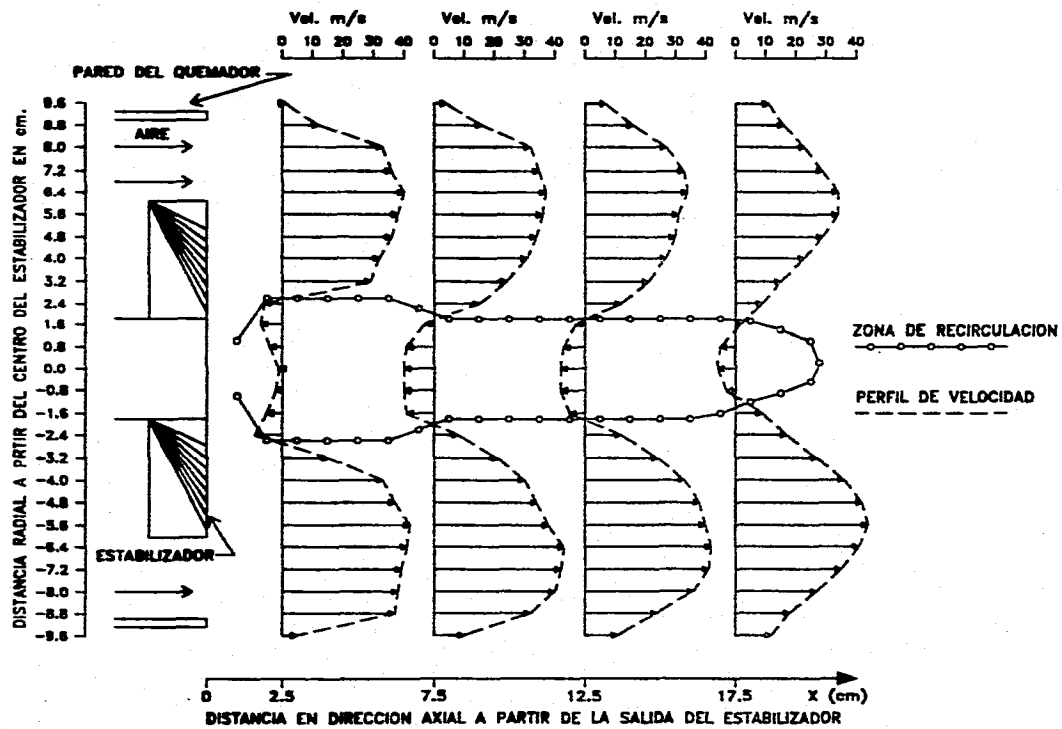


FIGURA 5.9 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE 12 ALABES MODIFICADO.

Tabla 5.6 Velocidades máximas de cada estabilizador.

Nombre del estabilizador	X = 2.5 cm.		X = 7.5 cm.		X = 12.5 cm.		X = 17.5 cm.	
	Vel. (m/s) V <sub>x</sub>	V <sub>-x</sub>	Vel. (m/s) V <sub>x</sub>	V <sub>-x</sub>	Vel. (m/s) V <sub>x</sub>	V <sub>-x</sub>	Vel. (m/s) V <sub>x</sub>	V <sub>-x</sub>
sin estabilizador	36.14	****	36.28	***	36.19	****	37.05	***
plato	42.47	6.20	39.03	10.8	37.49	8.56	34.80	***
8 álabes	34.41	****	34.80	3.96	36.51	6.16	37.57	***
12 álabes	33.02	10.57	35.85	7.71	37.67	7.42	38.97	***
12 álab. modific.	42.27	9.49	42.94	10.0	42.10	8.16	43.80	5.83

\*\*\*\* No se encontró valor de velocidad en dirección -X.

Tabla 5.7 Dimensiones de las zonas de recirculación.

Nombre del estabilizador	X=2.5 ancho (mm.)	X=7.5 ancho (mm.)	X=12.5 ancho (mm.)	X=17.5 ancho (mm.)	Longitud (mm.)
plato	96	84	47	***	160
8 álabes	42	24	24	***	165
12 álabes	44	32	20	***	140
12 álab. modif.	52	40	36	32	203

\*\*\* No se presentó zona de recirculación en este plano.

#### **5.1.5.2 PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL.**

Para la obtención de los perfiles de velocidad tangencial se empleó la misma técnica planteada en la metodología, pero en este caso girando la sonda de dos orificios  $90^\circ$  con respecto a su eje longitudinal, sensando los valores de presión para cada punto en los planos "Y-Z" a lo largo del eje radial del flujo y a distancias de  $X=2.5$  cm.,  $X=7.5$  cm.,  $X=12.5$  cm. y  $X=17.5$  cm. tal y como se muestra a continuación:

En la figura 5.10 se presentan los perfiles de velocidad tangencial para el estabilizador de Plato. Puede observarse que estos perfiles tienen velocidades muy pequeñas, siendo las máximas del orden de 15 m/s, así como perfiles sumamente irregulares. Una esquematización tridimensional de estos resultados se presentan en la figura 5.11.

Los perfiles de velocidad tangencial encontrados para el estabilizador de 8 álabes rectos se muestran en la figura 5.12. Estos presentan una forma de hélice, formada por el giro del flujo que se provoca por la geometría del estabilizador. Se aprecia una buena simetría en ambas partes del perfil. Las velocidades máximas alcanzadas en promedio son del orden de los 34 m/s. En la figura 5.13 se muestra una esquematización tridimensional de los resultados obtenidos con este estabilizador.

En la figura 5.14 se muestra el comportamiento de los perfiles de velocidad del flujo con un estabilizador de 12 álabes modificado. Estos perfiles abarcan áreas transversales más amplias que las encontradas con el estabilizador de 8 álabes rectos, esto es debido a que el diámetro del estabilizador de 12 álabes modificado es mayor; además, las velocidades de giro en cada plano también son mayores, alcanzando valores del orden de 39 m/s. La esquematización tridimensional de estos resultados se aprecia en la figura 5.15.

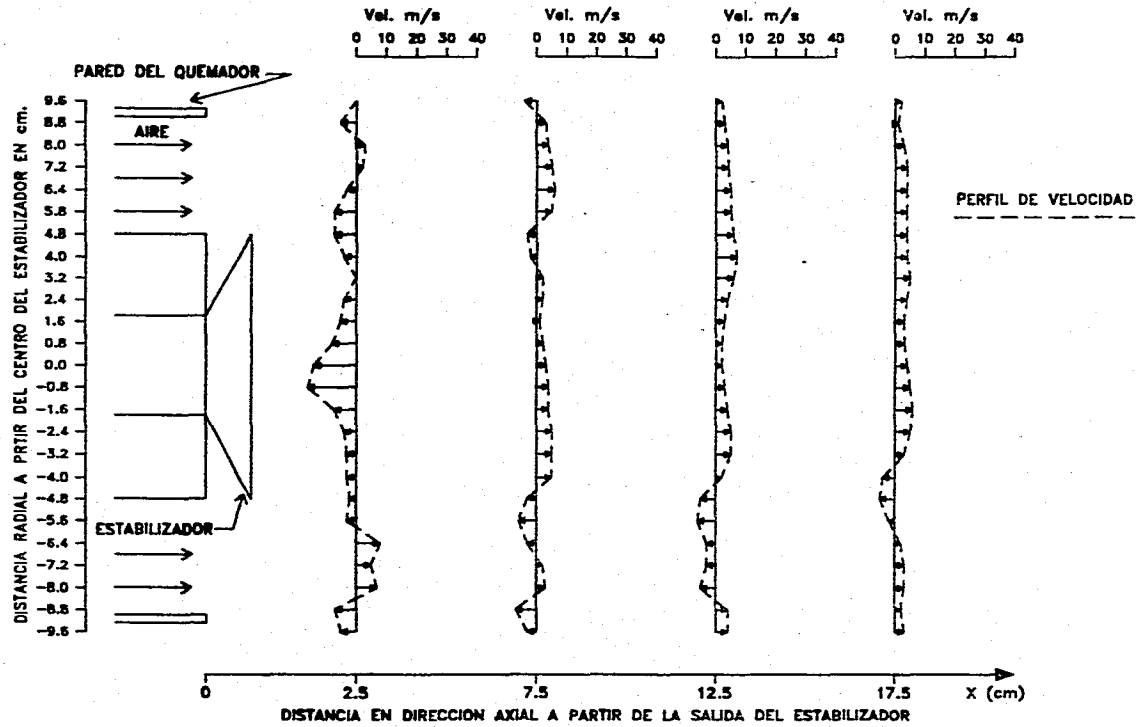


FIGURA 5.10 PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE PLATO.

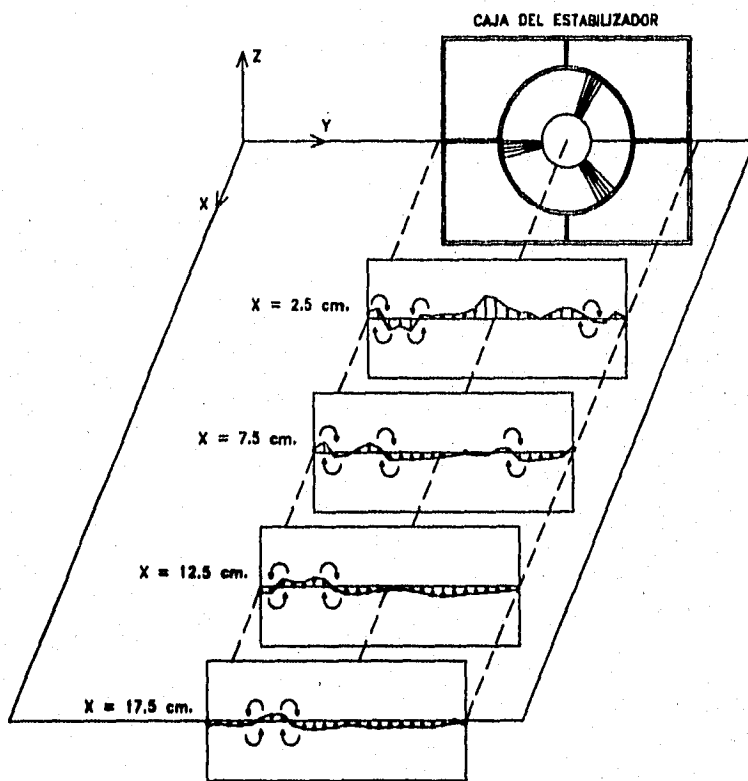


FIGURA 5.11 ESQUEMATIZACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL. ESTABILIZADOR DE PLATO.

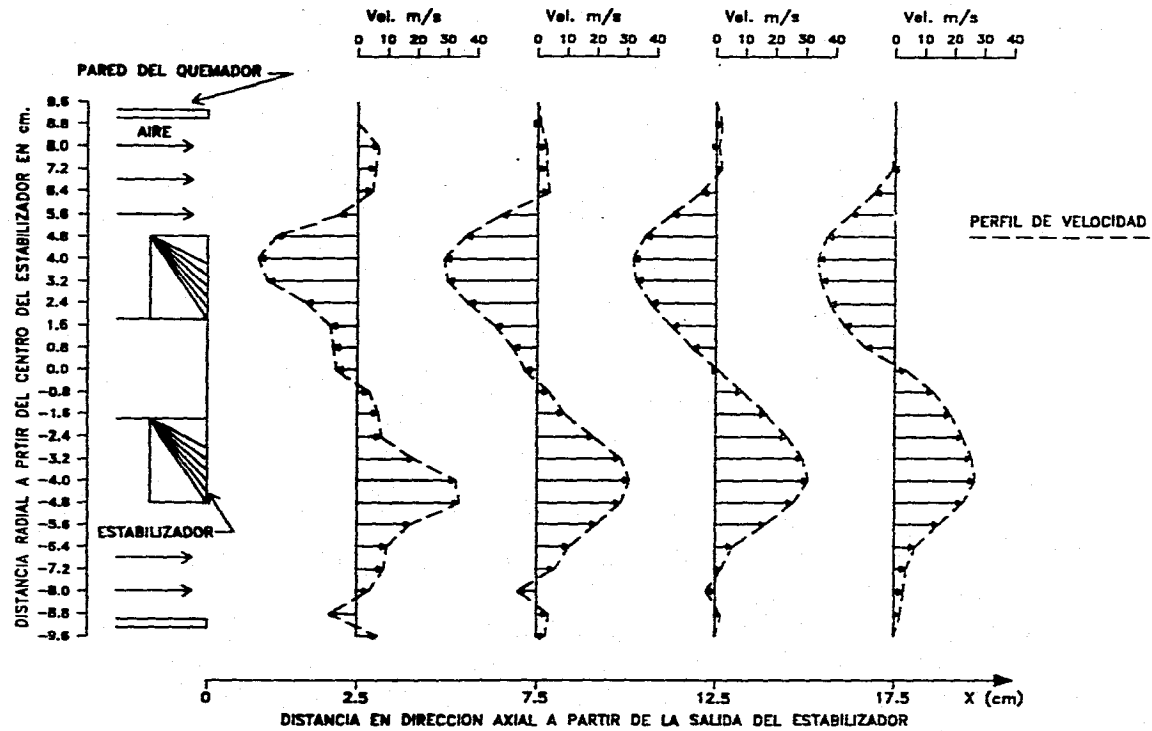


FIGURA 5.12 PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE 8 ALABES RECTOS.

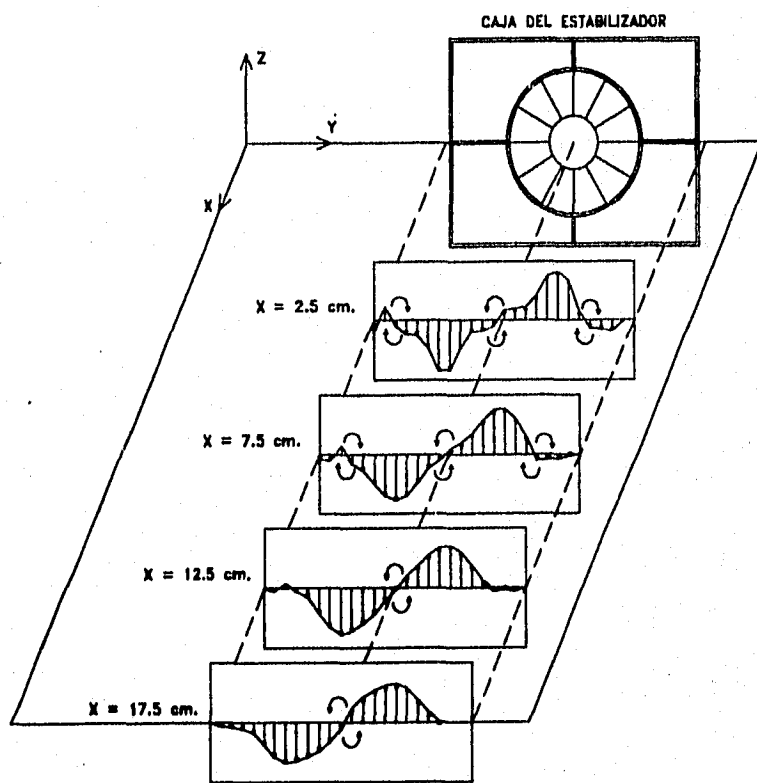


FIGURA 5.13 ESQUEMATIZACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL. ESTABILIZADOR DE 8 ALABES RECTOS.



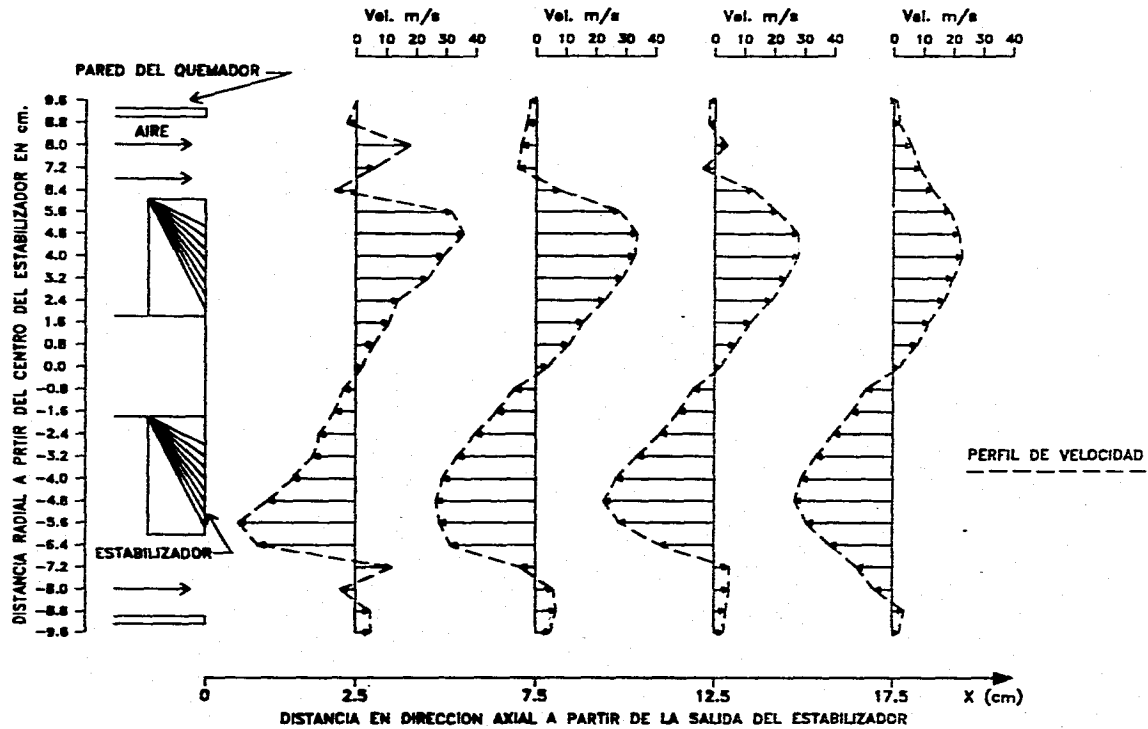
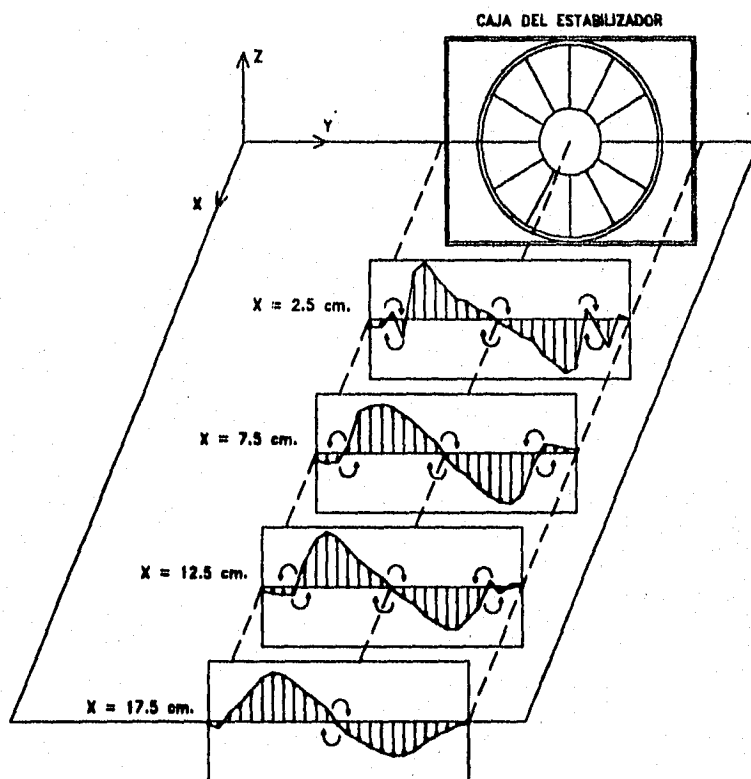


FIGURA 5.14 PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE 12 ALABES MODIFICADO.



**FIGURA 5.15 ESQUEMATIZACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL. ESTABILIZADOR DE 12 ALABES MODIFICADO.**

### 5.1.5.3 PRUEBA DE CAIDA DE PRESION ESTATICA AGUAS ABAJO DEL ESTABILIZADOR.

El objetivo que se persiguió con esta prueba es el poder determinar el perfil de caída de presión estática aguas abajo del estabilizador, producido por la presencia de cada estabilizador en distintos planos a lo largo del eje axial del flujo utilizando la técnica indicada en la metodología.

Esta prueba permitió definir el área de mayor caída de presión, respaldando la presencia de las zonas de recirculación encontradas anteriormente.

En la figura 5.16 se muestran los perfiles de caída de presión estática aguas abajo para el quemador sin estabilizador y con los estabilizadores de Plato, 8 álabes rectos y 12 álabes modificado, en X=5 cm., X=10 cm., X=15 cm. y X=20 cm. de distancia.

De igual forma en la tabla 5.8 se muestran los valores máximos alcanzados por cada tipo de estabilizador en cada uno de los planos indicados.

Tabla 5.8 Valores de caídas de presión estática aguas abajo del quemador para diferentes estabilizadores.

Nombre del estabilizador	X=5 cm. mmH <sub>2</sub> O	X=10 cm. mmH <sub>2</sub> O	X=15 cm. mmH <sub>2</sub> O	X=20 cm. mmH <sub>2</sub> O
sin estabilizador	-13.80	-17.30	-18.05	-24.50
plato	-25.10	-7.55	+5.57	+4.59
8 álabes rectos	-30.10	-29.30	-23.70	-15.92
12 álab. modif.	-54.30	-45.10	-38.60	-30.80

De la figura 5.16 puede observarse que el estabilizador de plato presenta la zona más amplia de caída de presión en X=5 cm., mientras que en los demás planos pierde rápidamente su presión de vacío volviéndose incluso positiva en los dos últimos. Puede concluirse que este estabilizador provoca una gran caída de presión un tanto irregular en una zona muy grande en las cercanías de la caja del quemador debido a la forma del mismo estabilizador.

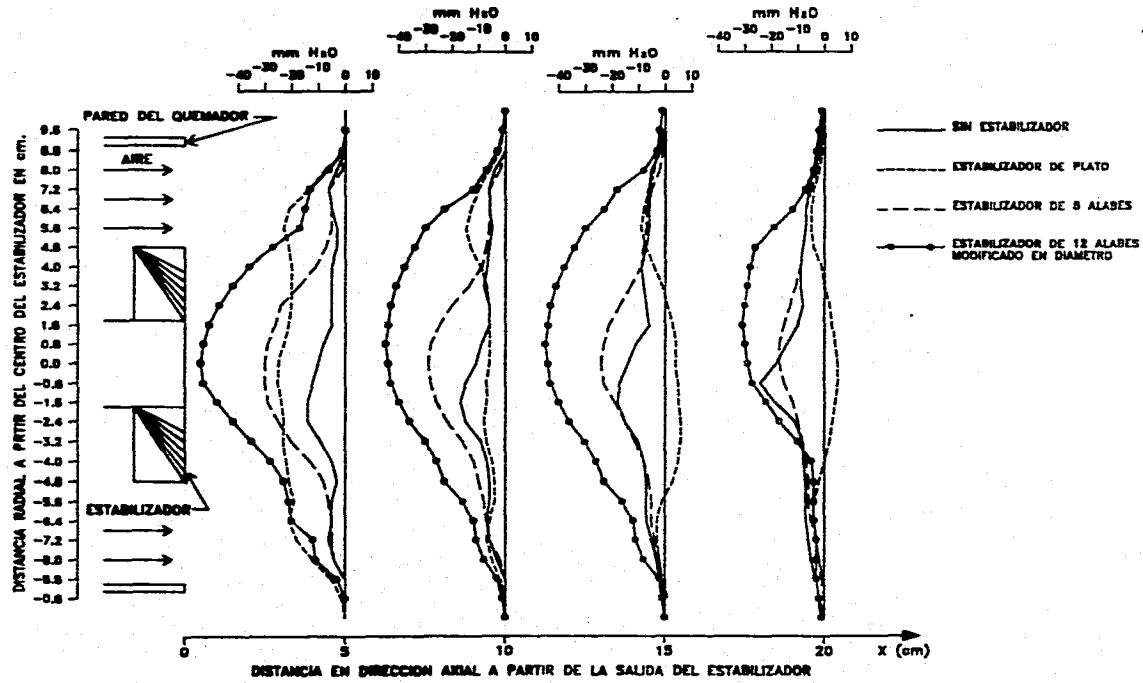


FIGURA 5.16 PERFILES DE CAIDA DE PRESION ESTATICA AGUAS ABAJO DEL ESTABILIZADOR.

El estabilizador de 8 álabes rectos, a comparación del de Plato, muestra valores más altos de vacío y un perfil mucho más definido y simétrico a lo largo de todos los planos, decreciéndose uniformemente a medida que se aleja de la salida del quemador. Esto es debido al efecto de arrastre "entrelment" dado por la fricción entre el flujo y la entrada del aire atmosférico.

El estabilizador de 12 álabes modificado presentó las mejores condiciones de operación con respecto a esta prueba, esto es debido a que muestra un área más amplia de caída de presión estática para cada plano en comparación con los demás estabilizadores; inclusive, se encontraron los valores más altos de caída de presión para cada punto de medición en la trayectoria correspondiente al eje central del flujo. El perfil se observa simétrico el cual va decreciendo también conforme se aleja de la salida del quemador.

#### 5.1.6 DETERMINACION DEL NUMERO DE GIRO.

La comparación de los resultados obtenidos en esta prueba se realizó considerando el número de giro promedio, el cual quedó definido de la siguiente manera:

$$Ns = \frac{\text{Flujo axial del momento angular}}{(\text{Flujo axial del momento longitudinal})(R)}$$

En la tabla 5.9 se presentan los resultados obtenidos del número de giro para tres distintos estabilizadores en cada plano de medición.

Tabla 5.9 Números de giro para tres distintos estabilizadores.

Nombre del estabilizador	X = 2.5 cm. (adimensional)	X = 7.5 cm. (adimensional)	X = 12.5 cm. (adimensional)	X = 17.5 cm. (adimensional)
plato	0.81	0.15	0.16	0.17
8 álabes rectos	0.25	0.19	1.40	0.07
12 álabes modif.	0.89	3.00	0.32	0.52

De los resultados de esta tabla, puede observarse que el estabilizador de plato presenta los valores más bajos en promedio del número de giro siendo 0.81, 0.16 y 0.17 para cada plano de medición respectivamente. En tanto el estabilizador de 12 alabes modificado presentó los mayores valores del número de giro con 0.89 para  $X=2.5$  cm., 3.0 para  $X=7.5$  cm. y 0.52 para  $X=17.5$  cm., no siendo así para  $X=12.5$  cm., donde el estabilizador de 8 alabes rectos fue el que presentó el mayor valor con 1.40.

A manera de complementar esta prueba, se presentan las gráficas correspondientes a las magnitudes de los vectores de velocidad producidos por los estabilizadores de Plato, 8 álabes rectos y 12 álabes modificado en las figura 5.17, 5.18 y 5.19 respectivamente en el plano "X-Y".

Como puede observarse, el estabilizador de Plato es el que presenta los vectores de menor magnitud orientados en forma desordenada.

Con los estabilizadores de 8 álabes rectos y 12 álabes modificado pueden apreclarse vectores de mayor magnitud y con una mejor orientación, además de que se esquematiza más claramente el fenómeno aerodinámico.

Debe notarse que en estas gráficas se sigue conservando la zona de recirculación producidas por cada estabilizador, esquematizadas con pequeños círculos sobre cada plano.

Es importante señalar que estos vectores no son iguales a los vectores que se determinaron con la sonda de dos orificios medidos en posición perpendicular al flujo, sino que estos se determinaron con la sonda de cinco orificios en planos distintos, perpendiculares al vector principal del flujo en cada punto de medición de cada plano.

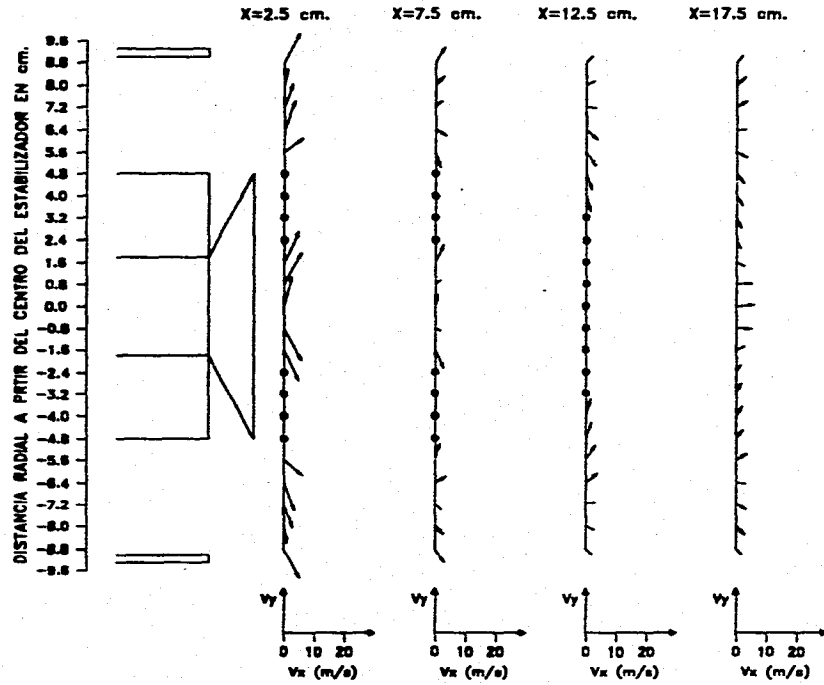


FIGURA 5.17 VECTORES DE VELOCIDAD EN EL PLANO "X-Y" PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE PLATO.

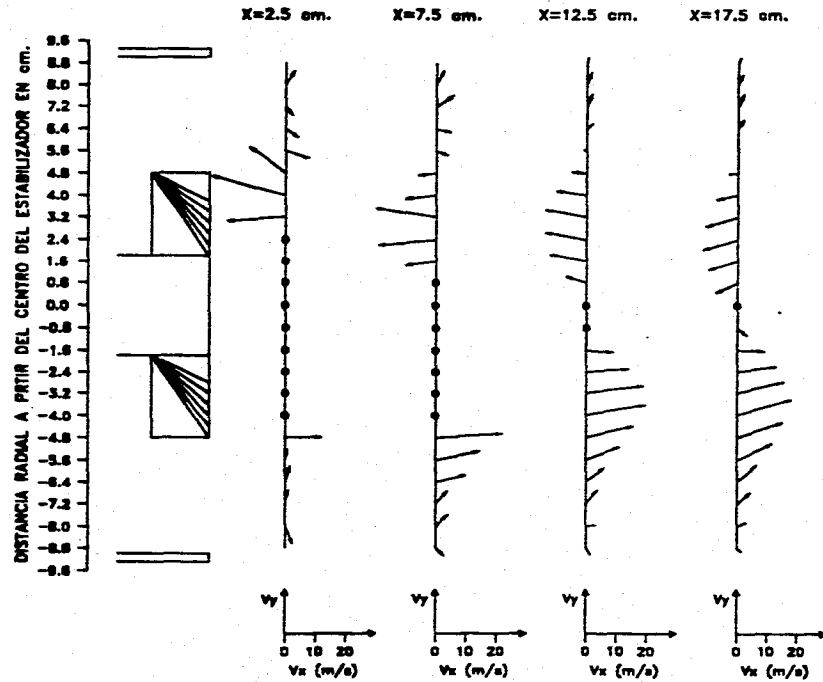


FIGURA 5.18 VECTORES DE VELOCIDAD EN EL PLANO "X-Y" PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE 8 ALABES RECTOS.



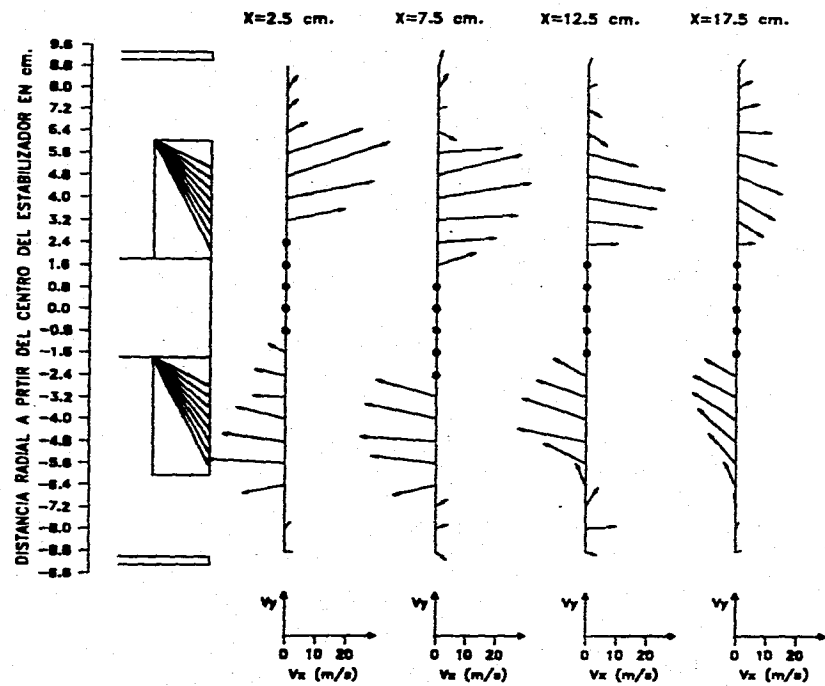


FIGURA 5.19 VECTORES DE VELOCIDAD EN EL PLANO "X-Y" PRODUCIDOS POR EL ESTABILIZADOR DE 12 ALABES MODIFICADO.

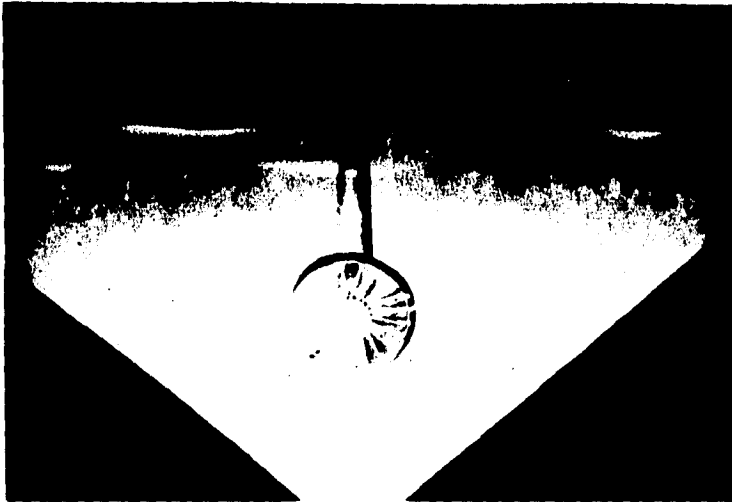
## 5.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL MODELO DEL QUEMADOR FRONTAL.

Los resultados que se presentan fueron obtenidos de un modelo a escala 1:4 de un quemador de tipo frontal, el cual corresponde al quemador usado en el sistema de combustión de una unidad de 300 MW. Este tipo de quemador cuenta con una geometría distinta a comparación del de tipo tangencial presentado anteriormente; sin embargo, la metodología propuesta cuenta con los procedimientos que permiten también la caracterización de este tipo de quemadores.

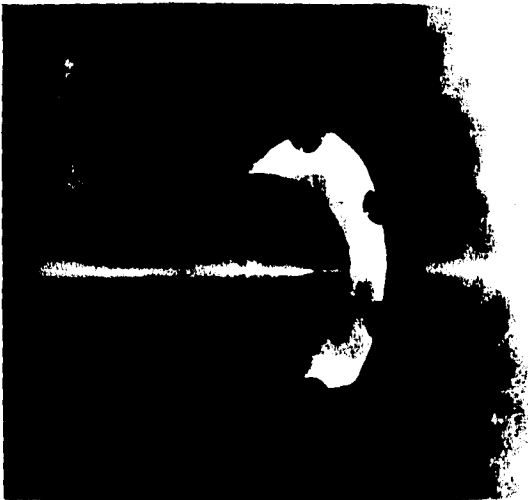
En la fotografía 5.3 se muestra el modelo experimental utilizado, en tanto en la fotografía 5.4 muestra un estabilizador de 22 álabes rectos, de 121 mm. de diámetro, usado en estas pruebas como parámetro constante. Finalmente en la fotografía 5.5 se muestra este tipo de quemador en operación real donde se puede observar el ducto del suministro de combustible, el estabilizador y parte del contorno de la pared del quemador.



Fotografía 5.3 Modelo experimental utilizado.



Fotografía 5.4 Estabilizador de 22 álabes rectos.



Fotografía 5.5 Quemador frontal en operación real.

### 5.2.1 PERFILES DE VELOCIDAD EN EL DUCTO DE ALIMENTACION.

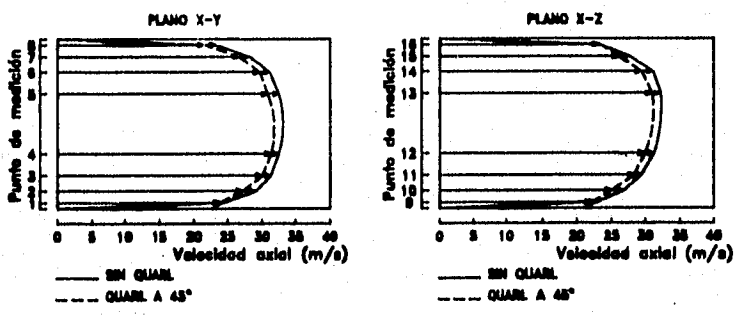
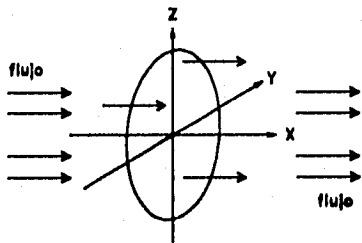
De acuerdo con la metodología, se determinó el perfil de velocidades para un ducto de sección circular, tomándose 16 puntos de medición distribuidos en forma horizontal y verticalmente para el tipo de ducto de este quemador.

En la tabla 5.10 se presentan los valores de velocidad, obtenidos sin la presencia del estabilizador, con y sin quarl a 45° (o ángulo de salida) de diseño de este quemador. Además la tabla presenta los valores obtenidos con estabilizador, con y sin quarl de salida.

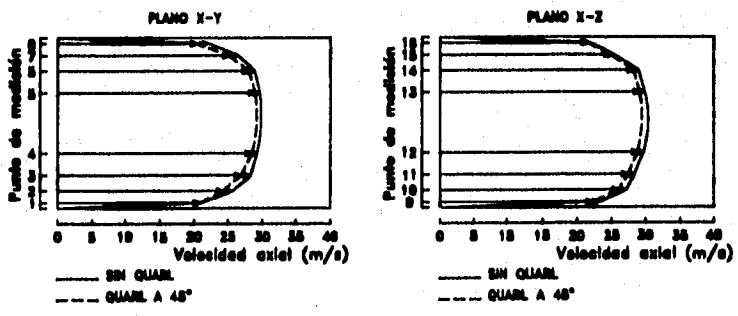
Table 5.10 Valores de velocidad axial en el ducto sin estabilizador con y sin quarl de salida. Con estabilizador, con y sin quarl de salida.

Punto de medición	Sin estab. Sin Quarl Vel. (m/s)	Sin estab. Con Quarl Vel. (m/s)	Con estab. Sin Quarl Vel. (m/s)	Con estab. Con Quarl Vel. (m/s)
1	24.37	23.88	21.06	20.83
2	29.70	27.29	25.79	24.37
3	31.34	30.00	28.20	26.91
4	32.51	31.34	29.25	27.72
5	32.58	30.83	29.62	28.92
6	31.09	29.60	28.87	28.62
7	28.14	26.73	26.55	25.23
8	23.21	21.58	22.16	20.49
9	22.86	22.23	23.21	22.37
10	26.88	25.01	27.14	26.01
11	29.41	28.42	28.42	26.88
12	30.47	29.25	28.28	27.83
13	32.26	31.84	29.94	29.25
14	31.09	29.54	29.52	28.51
15	27.77	26.10	25.33	24.92
16	23.21	23.31	21.87	22.69

Se puede apreciar que los valores de velocidad en el ducto del quemador disminuyen a medida que se integran al mismo más elementos, como el quarl y el estabilizador. Lo anterior es debido a la caída de presión que provoca al sistema debido a su presencia. Así se tiene que los valores de velocidad con estabilizador y con quarl son en promedio casi 10% menores que sin estabilizador y sin quarl.



PERFILES DE VELOCIDAD EN EL DUCTO SIN ESTABILIZADOR



PERFILES DE VELOCIDAD EN EL DUCTO CON ESTABILIZADOR

Figura 5.20 Comparación de los perfiles de velocidad encontrados en el ducto del quemador frontal.

## 5.2.2 CALCULO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL QUEMADOR.

De acuerdo a la metodología y de la misma manera que al quemador tangencial, se calcularon los coeficientes de descarga correspondientes al quemador frontal tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

### 5.2.2.1 CALCULO DEL CD DEL QUEMADOR SIN ESTABILIZADOR Y QUARL VARIABLE.

Esta prueba se realizó con el quemador sin estabilizador, variando el quarl de salida. En la tabla 5.11 se muestran los valores del CD calculados para el quemador sin quarl y con quarl a 45° y 24° empleando las fórmulas (3.1) y (3.2) de la metodología.

Tabla 5.11 CD del quemador sin estabilizador y quarl variable.

Angulo de salida	Gasto teórico (Kg/s)	Gasto real (Kg/s)	CD calculado (adimensional)
sin quarl	2.3294	1.6937	0.7271
quarl a 45°	2.3294	1.6199	0.6954
quarl a 24°	2.3294	1.6984	0.7291

Se puede observar en la tabla que el quarl a 24° presenta el mayor CD (0.7291) ligeramente por arriba del calculado para el quemador sin quarl, seguido del quarl a 45° que fue el que presentó en menor valor del CD (0.6954).

El CD puede calcularse también empleando la fórmula (3.4) de la metodología de manera muy similar al calculado para el quemador tangencial, solo que en este caso no se emplea el concepto del "diámetro hidráulico" (fórmula 3.6 de la metodología) por tener este quemador un área de sección circular. En la tabla 5.12 se muestran los resultados del CD obtenidos al aplicar esta fórmula comparados con los valores del CD obtenidos experimentalmente.

De esta tabla se aprecia que la mayor diferencia se obtuvo con quarl a 24° (6.04%), en tanto la menor diferencia se obtuvo con quarl a 45°, de hecho no existió diferencia. La diferencia promedio para los tres resultados fue de 3.38%.

**Tabla 5.12 Resultados del CD del quemador con quarl variable empleando la fórmula (3.4) de la metodología.**

Angulo de salida	Flujo real (Kg/s)	Caída de presión estat (mmH <sub>2</sub> O)	CD (fórmula) (adimensional)	CD (medición) (adimensional)	Diferencia (%)
sin quarl	1.6937	56.0	0.7570	0.7271	4.10
quarl a 45	1.6199	60.7	0.6954	0.6954	0.00
quarl a 24	1.6984	55.6	0.7731	0.7291	6.04

**5.2.2.2 CALCULO DEL CD DEL QUEMADOR CON QUARL FIJO Y ESTABILIZADOR VARIABLE.**

En la tabla 5.13 que se presenta a continuación se muestran los valores del CD calculados para el quemador, considerando fijos los quarl a 45° y a 24° y variando el estabilizador a 12 álabes y a 22 álabes, ambos de 121 mm. de diámetro.

**Tabla 5.13 CD del quemador con quarl fijo y estabilizador variable.**

Angulo de salida	Gasto teórico (Kg/s)	Gasto real (Kg/s)	CD calculado (adimensional)
quarl a 45°			
estab. 12 álabes	2.3294	1.5255	0.6549
estab. 22 álabes	2.3294	1.5113	0.6488
quarl a 24°			
estab. 12 álabes	2.3294	1.5728	0.6752
estab. 22 álabes	2.3294	1.5817	0.6790

Los valores del CD presentados en esta tabla para cada estabilizador resultan ser prácticamente los mismos para cada quarl de salida, siendo el estabilizador de 22 álabes el que presenta ligeramente las mejores condiciones de operación con un CD de 0.6790 con quarl a 24°, pero también es el estabilizador de 22 álabes el que presenta el menor valor del CD con 0.6488 con quarl a 45°. Esto indica que no siempre el mismo estabilizador presentará las mejores condiciones de operación para cualquier quarl de salida.

Los resultados obtenidos al aplicar la fórmula (3.4) para estos mismos casos se muestran en la tabla 5.14.

Tabla 5.14 Resultados del CD del quemador con quarl fijo y estabilizador variable empleando la fórmula (3.4) de la metodología.

Angulo de salida	Flujo real (Kg/s)	Caída de presión estát (mmH <sub>2</sub> O)	CD (fórmula) (adimensional)	CD (medición) (adimensional)	Diferencia (%)
<b>quarl a 45°</b>					
12 álabes	1.5255	66.7	0.6248	0.6549	4.60
22 álabes	1.5113	67.3	0.6161	0.6488	5.03
<b>quarl a 24°</b>					
12 álabes	1.5728	64.0	0.6575	0.6752	2.62
22 álabes	1.5817	64.4	0.6592	0.6790	2.92

La mayor diferencia que se encontró en esta tabla es para el estabilizador de 22 álabes con quarl a 45° (5.03%), mientras que la menor correspondió a estabilizador de 12 álabes con quarl a 24° (2.62%).

### 5.2.3 CALCULO DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL ESTABILIZADOR.

Aplicando los mismos criterios empleados para el calculo del coeficiente de descarga  $C_s$  de los estabilizadores para el quemador tangencial, se calcularon los  $C_s$  de los empleados en el quemador frontal considerando las fórmulas (5.1) y (5.2) descritas anteriormente. En la tabla 5.15 se presentan los resultados obtenidos referentes a los estabilizadores de 12 y 22 álabes, manteniendo el quarl de salida fijo a 45° y a 24°.

Tabla 5.15  $C_s$  de los estabilizadores con quarl fijo.

Angulo de salida	CD del quemador (adimensional)	Coef. pérdidas del estabilizador $K_s^{1/2}$ (adimensional)	$C_s$ del estabilizador (adimensional)
<b>quarl a 45°</b>			
12 álabes	0.6549	2.7346	0.3657
22 álabes	0.6488	3.6042	0.2775
<b>quarl a 24°</b>			
12 álabes	0.6752	3.6882	0.2711
22 álabes	0.6790	3.1384	0.3186



De la tabla 5.14 se aprecia que cuando se utiliza un quarl a  $45^{\circ}$  el estabilizador de 12 álabes tiene en promedio los mayores valores del CD para el quemador y estabilizador con 0.6549 y 0.3657 respectivamente. De igual manera, al utilizar un quarl a  $24^{\circ}$  el estabilizador de 22 álabes es el que presenta los mayores valores del CD para el quemador y estabilizador con 0.6790 y 0.3186 respectivamente.

#### **5.2.4 PRUEBAS DE CAIDA DE PRESION EN EL DUCTO.**

El objetivo de esta prueba como lo establece la metodología, es poder determinar los parámetros geométricos óptimos del quemador. Para el quemador de tipo frontal se presenta la prueba correspondiente a la variación del ángulo del quarl con y sin estabilizador.

##### **5.2.4.1 PRUEBA VARIACION DEL ANGULO DEL QUARL SIN ESTABILIZADOR.**

En esta prueba se empleo el quemador sin estabilizador, variando el quarl de salida a  $15^{\circ}$ ,  $24^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  y  $45^{\circ}$ . En la figura 5.21 se muestran los resultados determinados y la comparación de los mismos con el quemador sin quarl de salida.

Se observa de la misma gráfica que al utilizar un quarl a  $45^{\circ}$  el quemador presenta los mayores valores de pérdidas de presión (C.S.) para números de Reynolds iguales, por el contrario, al utilizar un quarl de salida a  $24^{\circ}$  se tienen los menores valores de pérdidas de presión traduciéndose en una mejor operación del quemador para números de Reynolds iguales, inclusive es mejor en comparación a los resultados que se obtienen del quemador trabajando sin quarl de salida, esto es por el efecto de difusión que presenta el quarl a  $24^{\circ}$ .

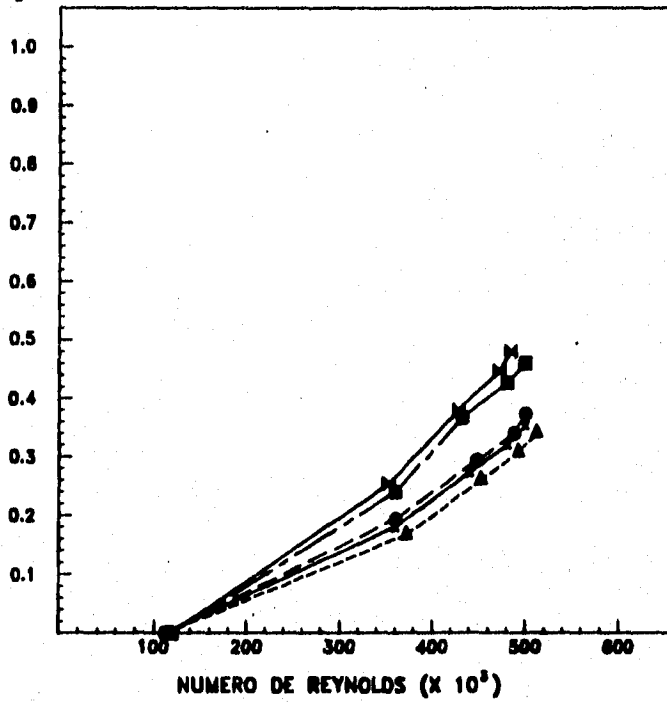
##### **5.2.4.2 PRUEBA VARIACION DEL ANGULO DEL QUARL CON ESTABILIZADOR.**

Para la realización de esta prueba se considero el estabilizador de 22 álabes como elemento constante o fijo mientras se variaba el ángulo de salida del quemador. En la figura 5.22 se presentan los resultados determinados para esta prueba.

Se observa en esta figura que al emplearse el quarl a  $45^{\circ}$  se siguen presentando los mayores valores de pérdidas de presión para números de Reynolds iguales, además se observa que estos valores aumentan considerablemente a medida que se involucran elementos al sistema como lo es en este caso la presencia del estabilizador.

Al utilizarse el quarl a  $24^{\circ}$  se obtienen los menores valores de pérdidas aunque estos se hallen incrementaron también con la presencia del estabilizador. El quarl a  $15^{\circ}$  muestra cierta mejora de operación con respecto a la prueba anterior, encontrándose valores de pérdidas inclusive por debajo de las determinadas con el quemador sin quarl.

$$C.S. = \frac{\Delta P_q}{\frac{1}{2} \rho V_{max}^2}$$



- SIN QUARL DE SALIDA
- CON QUARL A 15°
- ▲- CON QUARL A 24°
- CON QUARL A 30°
- ×- CON QUARL A 45°

Figura 5.21 Prueba variación del ángulo del quarl sin estabilizador.

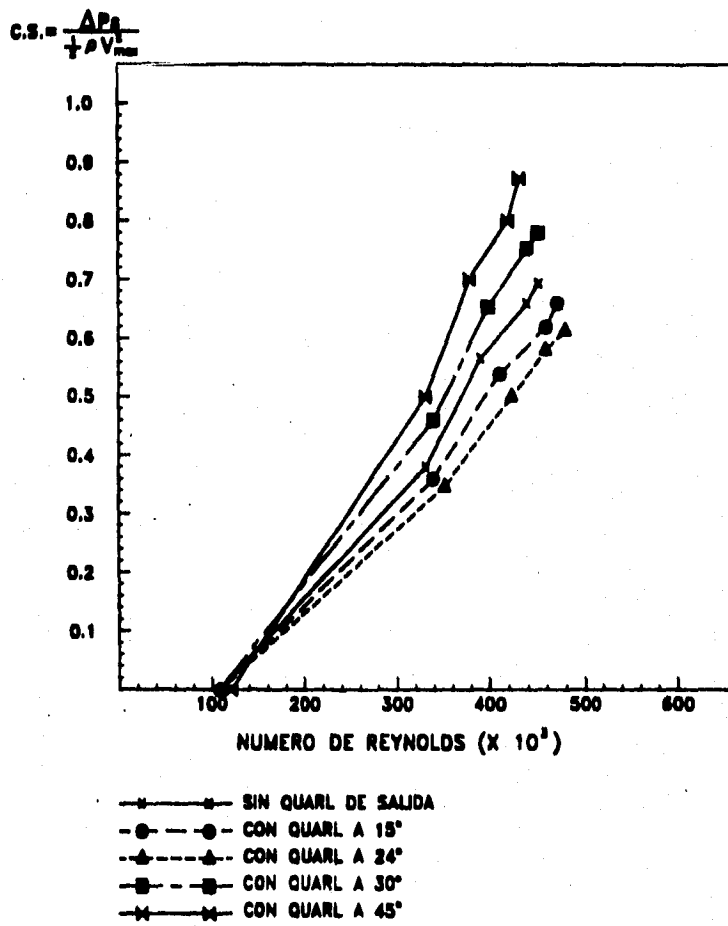


Figura 5.22 Prueba variación del ángulo del quarl con estabilizador.

## 5.2.5 DETERMINACION DE LA ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD.

### 5.2.5.1 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL.

Para la realización de esta prueba se tomo como elemento constante al estabilizador de 22 álabes, determinándose los cambios en la zona de recirculación y en los perfiles de velocidad al variar el ángulo de salida en el quemador.

En las figuras 5.23 y 5.24 se presentan los perfiles de velocidad producidos por el estabilizador con quarl a  $45^{\circ}$  y quarl a  $24^{\circ}$  respectivamente. Puede notarse en ambas figuras que los perfiles de velocidad son prácticamente idénticos, mostrándose los valores de máxima velocidad axial hacia los costados del perfil en cada plano, decrementándose y cambiando de dirección hacia el centro, coincidiendo con el eje de simetría del estabilizador.

En la tabla 5.16 se presentan los valores de velocidad máximos alcanzados para cada plano por el estabilizador con cada quarl de salida.

Tabla 5.16 Velocidades máximas alcanzadas por el estabilizador con diferente quarl de salida.

Angulo de salida	X=5.0 cm. Vel. (m/s)		X=10.0 cm. Vel. (m/s)		X=15.0 cm. Vel. (m/s)	
	V <sub>x</sub>	V <sub>-x</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>-x</sub>	V <sub>x</sub>	V <sub>-x</sub>
quarl a $45^{\circ}$	39.64	7.86	40.60	6.89	40.86	5.63
quarl a $24^{\circ}$	41.38	9.33	40.51	7.01	40.13	5.77

Comparando las zonas de recirculación, se observa que la producida con quarl a  $24^{\circ}$  es ligeramente más ancha hacia la base de la misma, en tanto que la producida con quarl a  $45^{\circ}$  es ligeramente más larga. Ambas zonas de recirculación se aprecian con buena simetría y de proporciones adecuadas con respecto a sus dimensiones largo-ancho.

La tabla 5.17 contiene los valores dimensionales de estas zonas de recirculación para cada plano de medición y su longitud correspondiente.

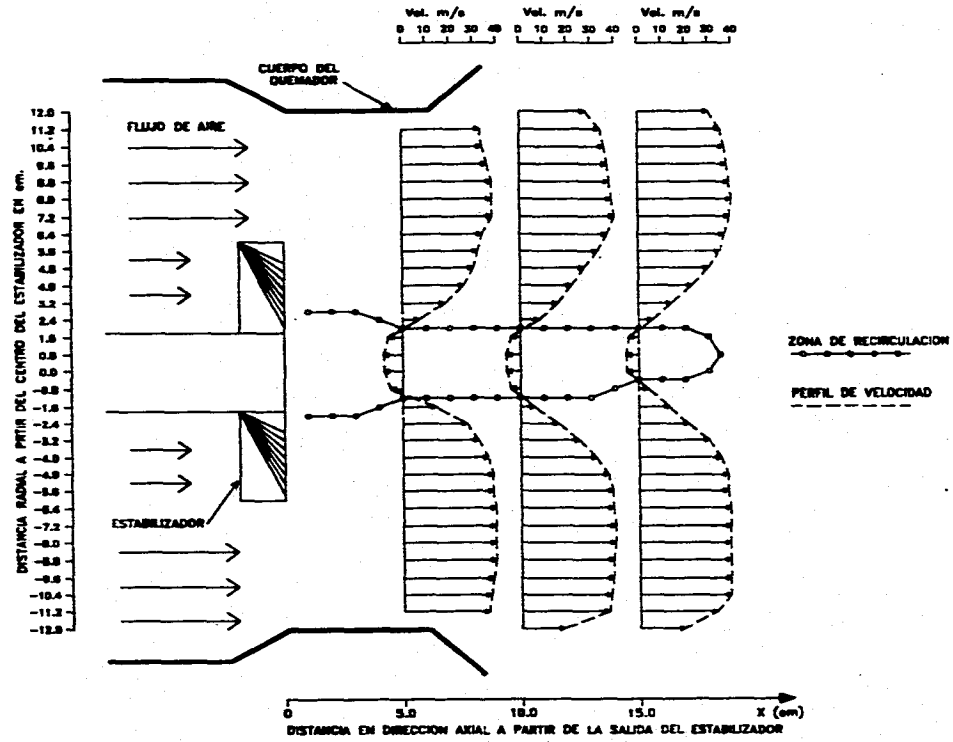


FIGURA 5.23 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL PRODUCIDOS CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 45°.

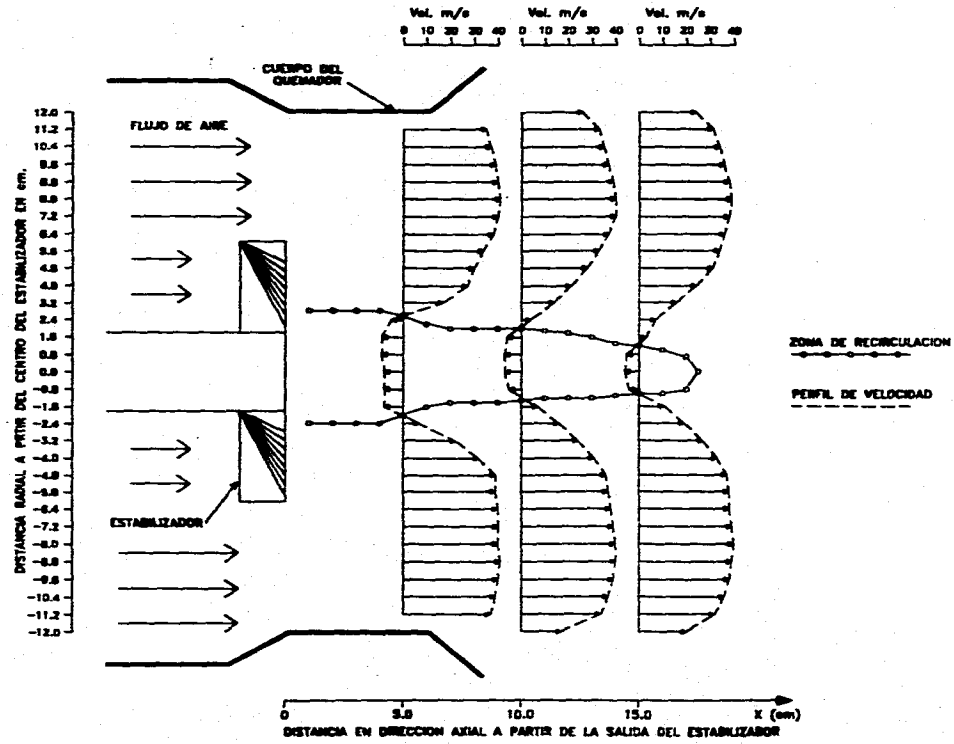


FIGURA 5.24 ZONA DE RECIRCULACION Y PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL PRODUCIDOS CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 24°.

**Tabla 5.17 Dimensiones de las zonas de recirculación obtenidas con cada quarl de salida.**

Angulo de salida	X=5.0 cm. ancho (mm.)	X=10.0 cm. ancho (mm.)	X=15.0 cm. ancho (mm.)	Longitud. (mm.)
quarl a 45°	48	32	24	185
quarl a 24°	52	33	22	175

#### **5.2.5.2 PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL.**

Esta prueba se realizó girando la sonda de dos orificios 90° como ya se describió en las pruebas hechas al modelo del quemador tangencial, sólo que para este caso se tomaron tres planos de medición para el estabilizador con quarl a 45° y a 24°. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 5.25 y 5.26 con cada quarl de salida respectivamente.

En ambas figuras se observa una gran similitud, prácticamente son idénticas, además no se aprecian diferencias significativas en las hélices que forman los perfiles salvo pequeñísimos movimientos en los extremos de los mismos. Las velocidades máximas alcanzadas en promedio para ambos perfiles fueron de 41.28 m/s para X=5.0 cm., 35.72 m/s para X=10.0 cm. y 35.16 m/s para X=15.0 cm.

En las figuras 5.27 y 5.28 se represente las esquematizaciones tridimensionales de estos perfiles.

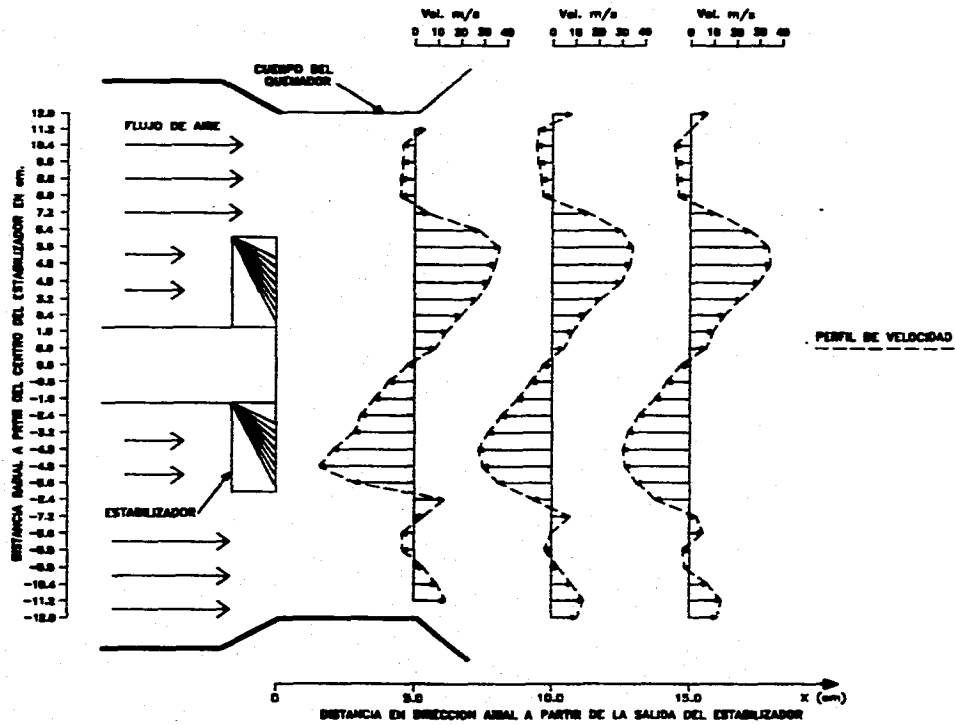


FIGURA 5.25 PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL PRODUCIDOS CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 45°.



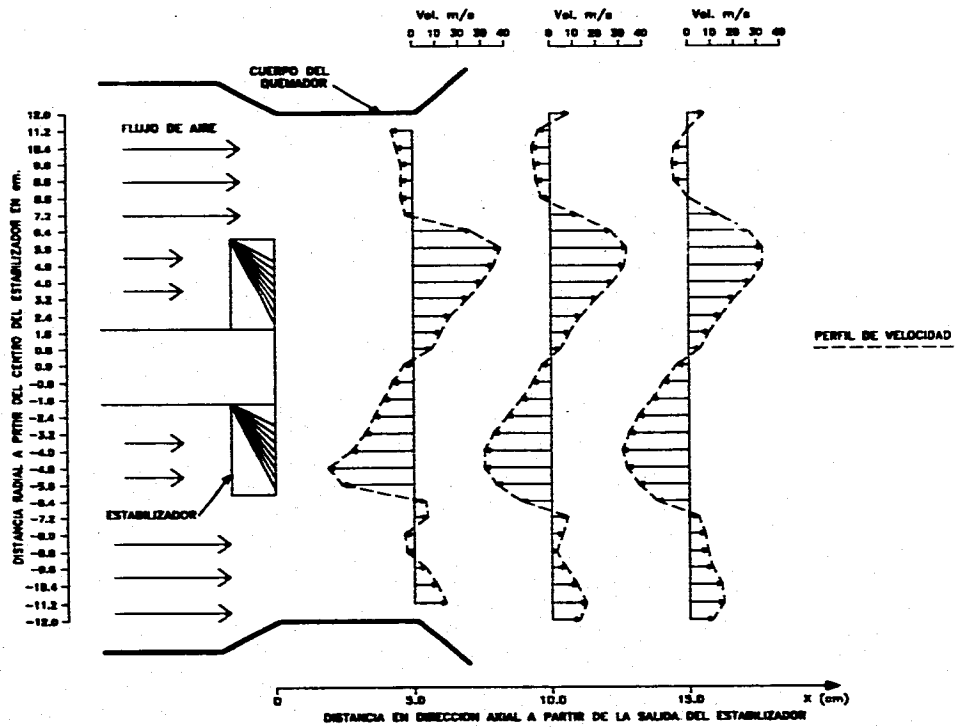


FIGURA 5.26 PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL PRODUCIDOS CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 24°.

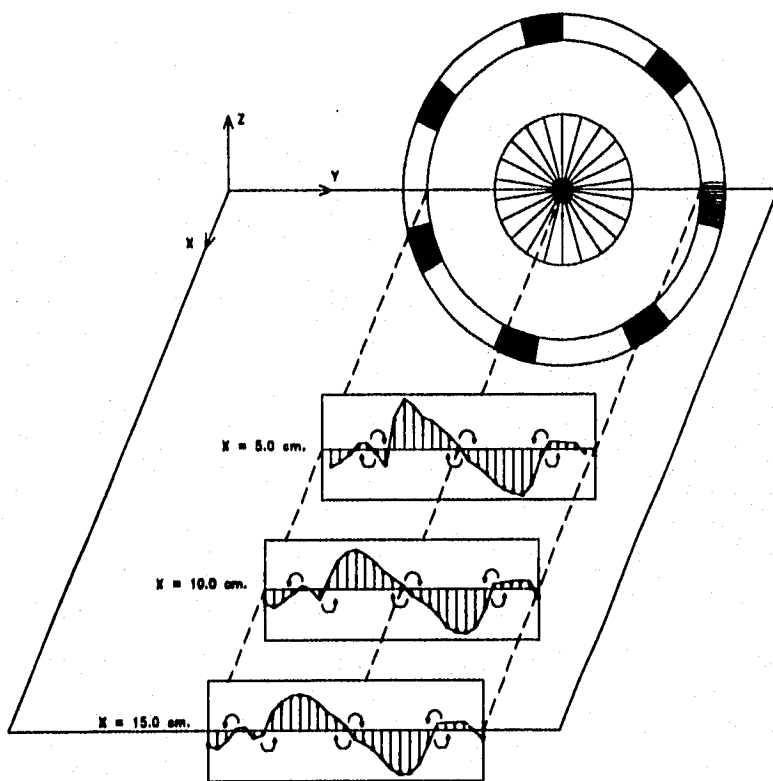
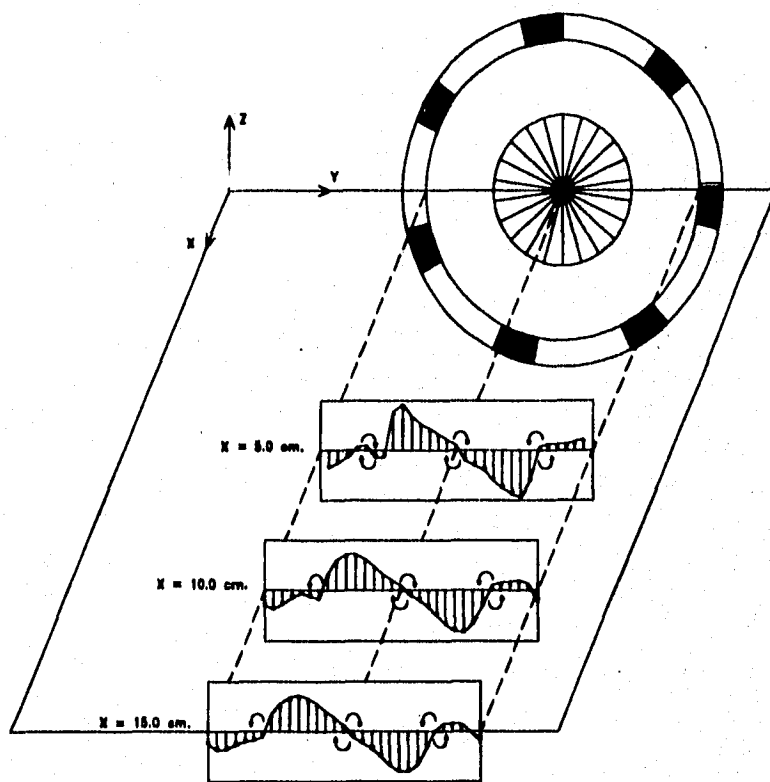


FIGURA 5.27 ESQUEMATIZACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 45°.



**FIGURA 5.28 ESQUEMATIZACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD TANGENCIAL CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 24°.**

### 5.2.5.3 PRUEBA DE CAIDA DE PRESION ESTATICA AGUAS ABAJO DEL ESTABILIZADOR.

Para la obtención de los perfiles de caída de presión estática aguas abajo del estabilizador, se consideró al estabilizador de 22 álabes también como elemento fijo, variándose el ángulo de salida con los que se obtuvo los siguientes resultados:

En la figura 5.29 se representa gráficamente el comportamiento de los perfiles de caída de presión con diferente quarl de salida. Puede observarse que ambos perfiles varían ligeramente en magnitud hacia el centro del perfil, justo en el eje de simetría del estabilizador, siendo más grande (12.4%) el determinado con quarl a 45°, en cambio, el perfil obtenido con quarl a 24° recupera parte de presión estática hacia los contados del mismo notándose gráficamente en forma de picos o crestas, las magnitudes de caída de presión en los extremos es por consiguiente mayor (73.3%) para el quarl a 24° que el obtenido con quarl a 45°.

Ambos perfiles muestran buena simetría decreciendo paulatinamente a medida que se alejan de la salida del quemador. En la tabla 5.18 se presentan los valores máximos promedio de caída de presión para cada quarl de salida en sus respectivos planos de medición.

Tabla 5.18 Caídas de presión estática aguas abajo del quemador para dos diferentes quarl de salida.

Angulo de salida	X=5.0 cm. mmH2O	X=10.0 cm. mmH2O	X=15.0 cm. mmH2O
quarl a 45°	-49.1	-36.8	-30.1
quarl a 24°	-43.0	-34.2	-29.0

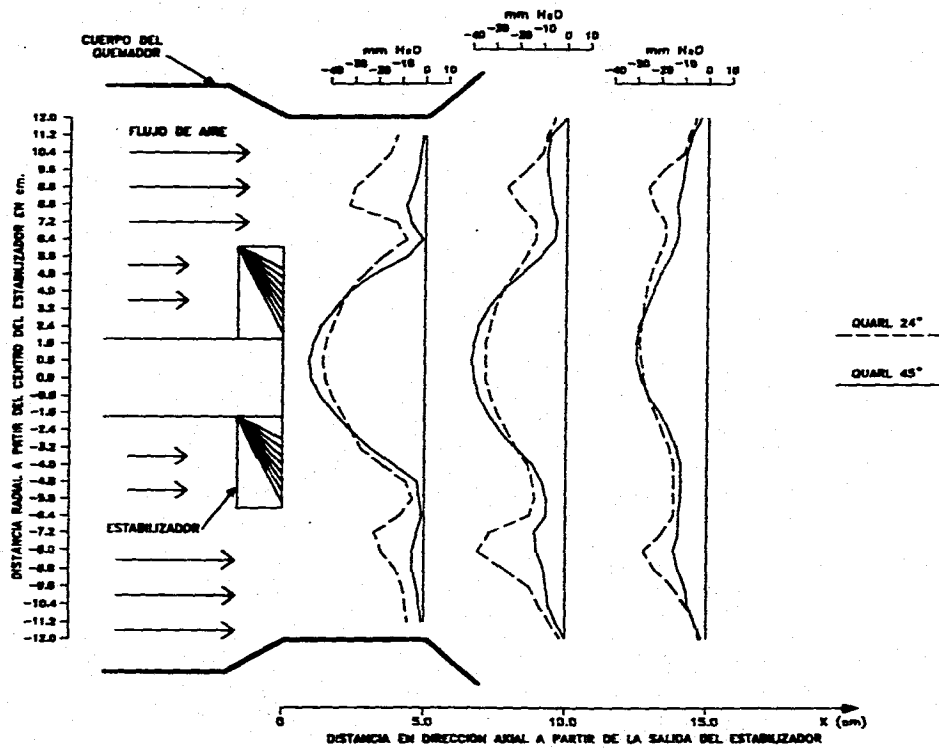


FIGURA 5.29 PERFILES DE CAIDA DE PRESION ESTATICA AGUAS ABAJO DEL ESTABILIZADOR PARA DOS DIFERENTES QUARL DE SALIDA.

### 5.2.6 DETERMINACION DEL NUMERO DE GIRO.

En esta prueba se determinó el número de giro para los quari de salida a  $45^\circ$  y a  $24^\circ$ , considerando también el estabilizador de 22 álabes como fijo, de acuerdo al planteamiento propuesto en la metodología. De manera semejante como se ha hecho, se presenta en la tabla 5.19 los valores promedio del número de giro determinados con cada quari de salida.

Tabla 5.19 Números de giro determinados con dos diferentes quari de salida.

Angulo de salida	X = 5.0 cm. adimensional	X = 10.0 cm. adimensional	X = 15.0 cm. adimensional
quari a $45^\circ$	0.40	0.31	0.22
quari a $24^\circ$	0.34	0.19	0.14

De esta tabla se puede apreciar que al utilizar un quari a  $45^\circ$  se presentan los mayores valores del número de giro para cada plano con 0.40, 0.31 y 0.22 para X=5, 10 y 15 cm. respectivamente.

En las figuras 5.30 y 5.31 que se presentan a continuación, los vectores de velocidad, graficados en el plano "X-Y", muestran una buena orientación y simetría, presentándose los vectores de mayor magnitud hacia el centro de cada plano y decrementándose hacia los costados y a medida que se aleja de la salida del quemador. Puede notarse que la zona de recirculación se conserva para cada caso indicadas con pequeños círculos.

En realidad no existen diferencias muy significativas para cada gráfica, excepto aquellas que permiten definir la mejor orientación de los vectores de velocidad, representativos del fenómeno en estudio para cada quari de salida.

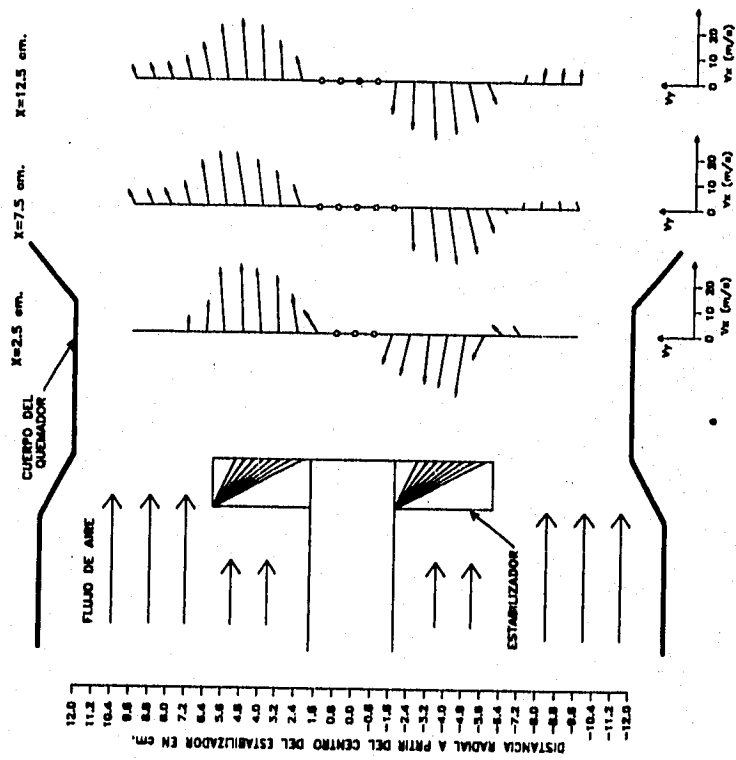


FIGURA 5.30 VECTORES DE VELOCIDAD EN EL PLANO "X-Y" CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 45°.

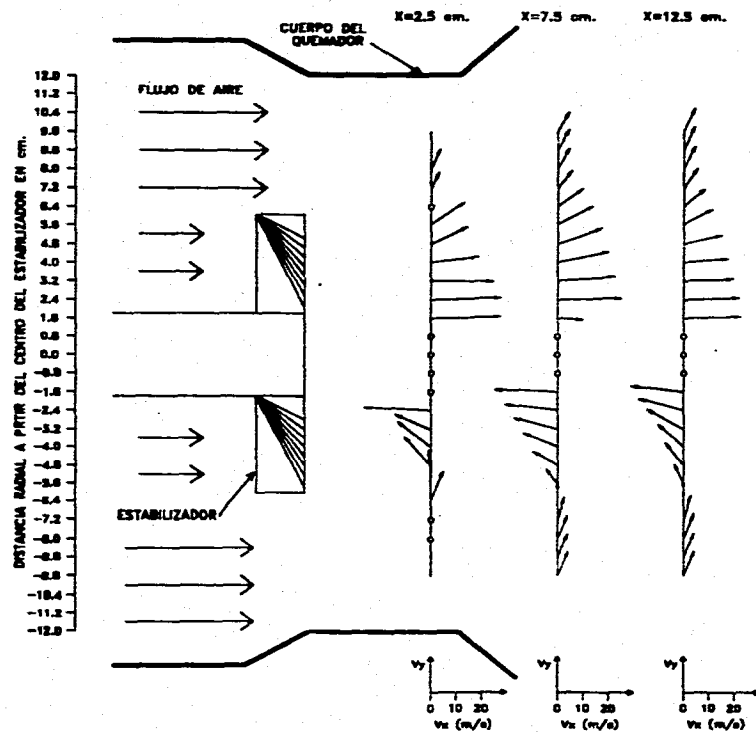


FIGURA 5.31 VECTORES DE VELOCIDAD EN EL PLANO "X-Y" CON ESTABILIZADOR Y QUARL A 24°.



### **5.3 DETERMINACION DE LA INTENSIDAD DE TURBULENCIA.**

Esta prueba tiene por objetivo definir la intensidad de turbulencia producida por los estabilizadores aguas abajo del mismo. Debido a que no se tuvo acceso al equipo necesario para desarrollar esta prueba, se presentan los resultados obtenidos por Martínez F. José O. [8] y se comparan con las pruebas obtenidas en este trabajo.

En la figura 5.32 se presentan los resultados obtenidos por el autor al aplicar la prueba de intensidad de turbulencia en dirección X a un estabilizador de plato, puede notarse que los valores más altos de intensidad de turbulencia (" $I$ " adimensional) se encuentran en las secciones correspondientes a la zona de recirculación que produce este tipo de estabilizador. Comparando los resultados del autor con los resultados obtenidos con el estabilizador de plato en la prueba de presión estática de esta tesis (figura 5.16), se observa que los perfiles de " $I$ " son directamente proporcionalmente a los perfiles de presión estática producidos por el estabilizador de plato analizado.

En la figura 5.33 se muestra la gráfica correspondiente a los valores de " $I$ " encontrados por el autor [8] para un estabilizador de álabes. Puede observarse que los máximos valores de " $I$ " se determinaron en el centro del eje axial del flujo, en el área de la zona de recirculación. Estos perfiles de intensidad de turbulencia son también directamente proporcionalmente a los perfiles de presión estática determinados para los estabilizadores de álabes (figura 5.16) evaluados en este trabajo.

La interpretación física de esta comparación es que a medida que se tiene una mayor presión estática (de vacío) dentro de la zona de recirculación se tendrá una mayor fluctuación en la velocidad media del fluido y por consiguiente una mayor intensidad de turbulencia asociada a dicha zona.

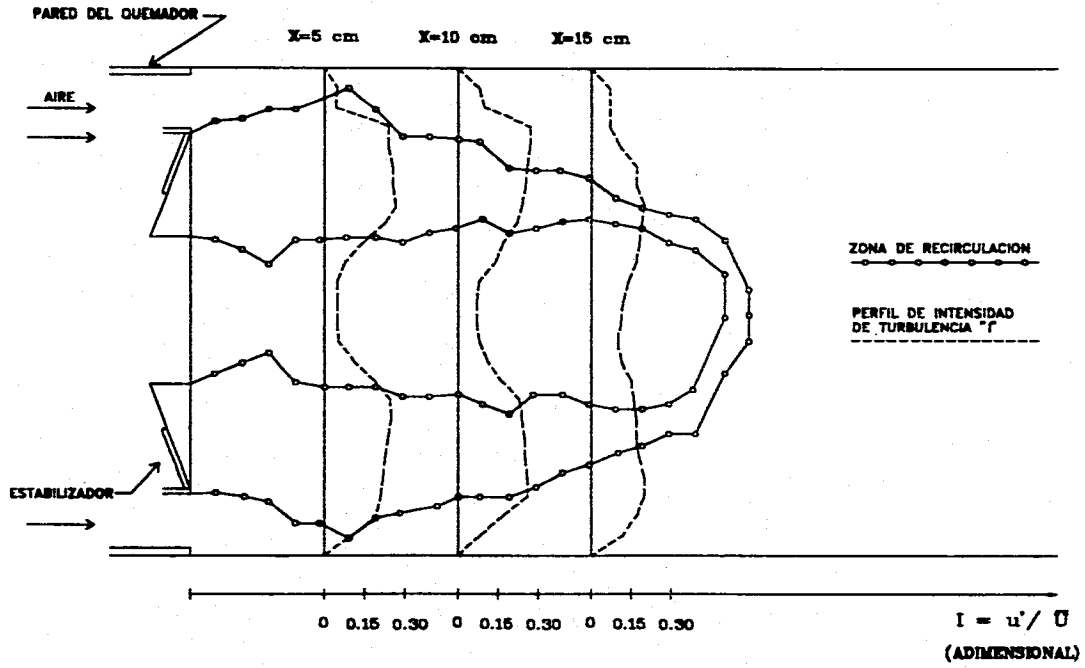


FIGURA 5.32 INTENSIDADES DE TURBULENCIA EN DIRECCION "X" PRODUCIDOS POR UN ESTABILIZADOR DE PLATO.

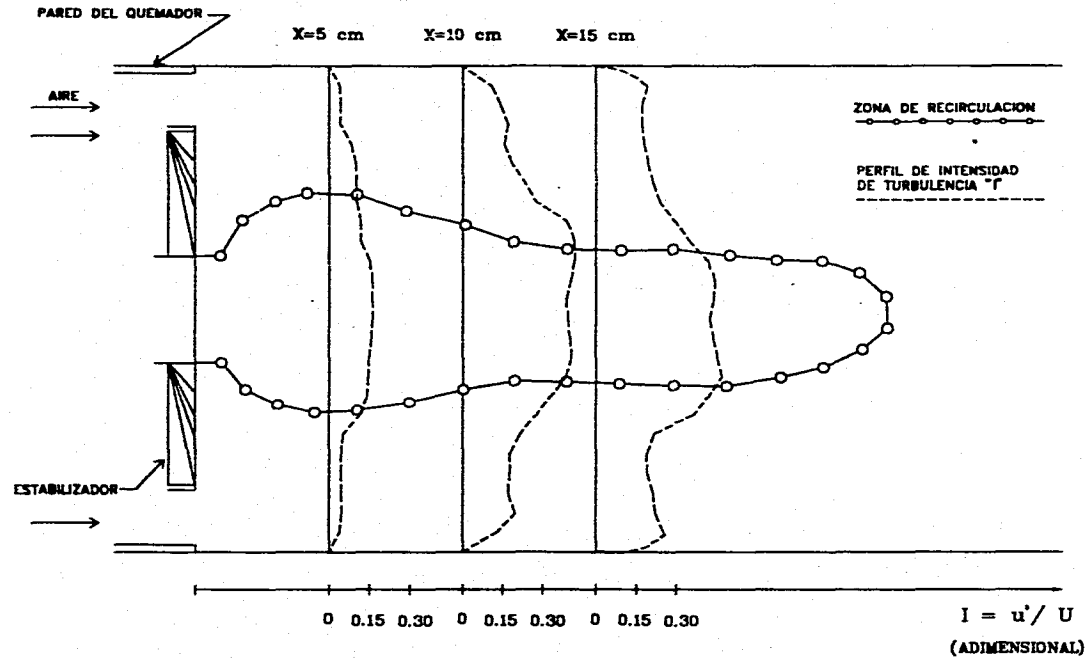


FIGURA 5.33 INTENSIDADES DE TURBULENCIA EN DIRECCION "X" PRODUCIDOS POR UN ESTABILIZADOR DE ALABES.

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La creciente demanda de la energía eléctrica, así como el incrementar la disponibilidad y eficiencia de las centrales termoeléctricas utilizadas por C.F.E. han dado origen al desarrollo de estudios enfocados a la caracterización fluidodinámica de quemadores usados por los generadores de vapor de dichas centrales. Los trabajos anteriores junto con la recopilación bibliográfica de trabajos desarrollados sobre el tema a nivel internacional dieron origen a la elaboración de una metodología que permitiera caracterizar fluidodinámicamente quemadores.

El objetivo principal de este trabajo fue realizar la validación experimental de esta metodología, para lograr lo anterior se presentaron en el capítulo 5 de este trabajo, los resultados obtenidos al aplicar la misma a dos diferentes tipos de quemadores, uno utilizado en el sistema de combustión de un generador de vapor de tipo tangencial con capacidad de 158 MW y otro utilizado en una unidad de 300 MW de tipo frontal. De acuerdo a los resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

#### Conclusiones obtenidas en el modelo de quemador tangencial.

Al comparar el perfil de velocidades dentro del ducto del quemador sin la presencia del estabilizador, con el perfil promedio formado por el estabilizador de plato y el de 8 álabes, se observa que sin estabilizador, las magnitudes de la velocidad son en promedio un 8% mayor que con estabilizador. De lo anterior se puede concluir que el 8% de la presión dinámica del flujo se transforma en presión estática para vencer la caída de presión provocada por la presencia del estabilizador y debida al diseño del mismo. Independientemente de la caída de presión provocada por el estabilizador, la geometría del perfil de velocidades se conserva, aunque no así su magnitud. La obtención de un perfil completamente desarrollado es importante ya que de éste depende la formación de las zonas de recirculación aguas abajo del quemador.

Respecto al CD del quemador (tabla 5.3) los mayores valores se presentaron con un estabilizador de 12 álabes rectos, siendo estos de 0.5864 y 0.5712 obtenidos por medición y por fórmula respectivamente, con una diferencia entre ambos valores de 2.59%. Para esta prueba puede concluirse que al emplearse un estabilizador de 12 álabes, el quemador mostrará mejores condiciones de operación que si se empleara otro estabilizador del mismo tamaño, ya que tener mayores valores de CD se traduce como un mayor grado de eficiencia.

El coeficiente de descarga de estabilizador  $C_s$  es un parámetro que relaciona el coeficiente de pérdidas totales del sistema con los coeficientes de pérdidas de cada uno de los elementos del quemador. De la tabla 5.4 del capítulo 5 se obtiene que el estabilizador de 12 álabes es el que presenta el mayor valor del  $C_s$  con 0.7012 y el menor valor del coeficiente de pérdidas  $K_s^{1/2}$  con 1.4260, concluyéndose con esta prueba que a mayor coeficiente de descarga del estabilizador le corresponderá un mayor coeficiente de descarga del quemador y viceversa, ambos coeficientes son directamente proporcionales.

Las pruebas de caída de presión en el ducto tuvieron por objetivo evaluar la eficiencia en el diseño del estabilizador. De la figura 5.2 prueba de la variación en la forma del estabilizador, se concluye que el estabilizador de 8 álabes junto con el estabilizador de doble ángulo, presentan mejores comportamientos, ya que obtuvieron menores coeficientes de pérdidas C.S. para números de Reynolds iguales con respecto a un estabilizador de plato.

Al variar el número de álabes en las pruebas de caída de presión (ver figura 5.3), se concluye que los tres estabilizadores probados de 8, 12 y 16 álabes mostraron prácticamente los mismos C.S. para números de Re iguales.

De Los resultados de variar el diámetro del estabilizador (figura 5.4), se concluye que las mejores condiciones de operación fueron presentadas por el estabilizador de 12 álabes modificado, el cual mostró los menores valores del C.S. para números de Re iguales con respecto a todos los estabilizadores anteriores. A sí mismo se comprobó que éste operaba más eficientemente al determinar su  $C_s$ , el cual fue el mayor que el de todos los estabilizadores analizados.

La prueba de determinación de los perfiles de velocidad axial y zona de recirculación es importante, ya que provee los datos cuantitativos y cualitativos de la formación del perfil de flama a la salida de estabilizador. Con respecto a esta prueba el estabilizador de 12 álabes modificado fue el que presentó los perfiles de velocidad axial de mayor magnitud, así como una zona de recirculación más grande y simétrica. Esta zona de recirculación es importante, ya que de acuerdo a su geometría se define la geometría de la flama, además, es precisamente en ella, sobre todo en las primeras etapas de la formación de la flama donde se atrapa la mayor cantidad de las gotas de combustible atomizado por la gran caída de presión concentrada en esa zona, estas gotas viajan a lo largo de la zona de recirculación aumentando su tiempo de residencia en las zonas de mayor temperatura de la flama trayendo como consecuencia que se lleve a cabo una combustión más completa y por consiguiente una generación de menor cantidad de inquemados que se expulsan a la atmósfera en forma de contaminantes.

Los perfiles de velocidad tangencial se pueden interpretar como una medida cualitativa de la intensidad de vorticidad que los estabilizadores de álabes le provocan al flujo presentándose gráficamente en forma de hélices, no así para el estabilizador

de plato donde estos perfiles se presentan en forma desordenada. Dentro de los perfiles de mayor magnitud encontrados se presentan nuevamente los aportados por el estabilizador de 12 álabes modificado el cual imparte una fuerte componente rotacional al flujo lográndose con esto que en operación real se tenga un mejor mezclado del aire y combustible y por consiguiente una combustión más eficiente.

La prueba de caída de presión estática aguas abajo del estabilizador es una medida del vórtice generado, asimismo se le asocia con la intensidad de turbulencia producida por los estabilizadores. De los resultados obtenidos para esta prueba (figura 5.16), se concluye que el estabilizador de 12 álabes modificado es el que presente los mayores valores de presión estática, lo que se traduce en un mayor grado de vorticidad y por consiguiente en una mayor intensidad de turbulencia asociada al funcionamiento del estabilizador.

El número de giro es un parámetro adimensional, el cual representa cuantitativamente el grado de vorticidad del flujo de aire, en otras palabras es la relación existente entre la cantidad de aire que circula aguas abajo en dirección tangencial con respecto a la que circula en dirección axial. De esta manera los mayores números de giro encontrados fueron en promedio los determinados (tabla 5.9) con el estabilizador de 12 álabes modificado para cada plano de medición.

La conclusión general de los resultados obtenidos, al aplicar la metodología experimental, es que se debe cambiar el estabilizador de flama de 8 álabes usado actualmente en el sistema de combustión de tipo tangencial de 158 MW, por el estabilizador de 12 álabes modificado, ya que éste presentó el mayor valor del coeficiente de descarga de estabilizador, los menores coeficientes de pérdidas de presión para números de Reynolds iguales, la mejor zona de recirculación, así como los mejores perfiles de velocidad tanto axial como tangencial. Además presentó los valores más altos tanto de número de giro como de presión estática, lo cual indica que la zona de recirculación provoca un alta vorticidad para todos los planos de medición evaluados.

#### **Conclusiones obtenidas en el modelo de quemador frontal.**

Los perfiles de velocidad determinados para el quemador tipo frontal presentó el mismo fenómeno que para el quemador tipo tangencial, solo que en este caso se trata de un ducto de sección circular. Se puede concluir que a medida que se integran elementos al sistema tales como el quarl de salida y la presencia del estabilizador el perfil se ve disminuido por la caída de presión que genera cada uno de estos elementos. A pesar de perder magnitud, estos perfiles conservan las características principales de su geometría, al continuar mostrando los máximos valores de velocidad hacia el centro y decrecientandose hasta cero en las paredes del ducto.

En base a los resultados obtenidos del CD puede establecerse que las mejores condiciones de operación del quemador sin estabilizador, se logran con un quarl de 24° (con 0.7291), sin embargo como es necesario la presencia del estabilizador como dispositivo de control de la flama, el que mejor CD presentó con quarl a 24° fue el estabilizador de 22 álabes (con 0.6790). Por otro lado, el estabilizador de 12 álabes fue el que mostró el mejor Cs (con 0.3657) y quarl a 45°, seguido del estabilizador de 22 álabes (con 0.3186) y quarl a 24°. Con esto se puede concluir que al fijar un elemento del quemador, el quarl por ejemplo, el mejor coeficiente de descarga determinado para un estabilizador será correspondiente al mejor coeficiente de descarga encontrado para el quemador. Con lo anterior se concluye que la metodología empleada para estas pruebas da la alternativa de poder seleccionar la mejor opción de operación del quemador al establecerse el mejor diseño del quarl y/o del estabilizador.

De la prueba de caída de presión en el ducto se concluye que las pérdidas de presión se incrementan a medida que se integran al sistema más elementos, en este caso la prueba que arrojó los menores valores de pérdidas de presión C.S. fue la obtenida con quarl a 24° con y sin la presencia del estabilizador.

Respecto a la prueba de determinación de los perfiles de velocidad axial y zona de recirculación en la cual se considero a un estabilizador de 22 álabes como elemento fijo o constante para determinar los cambios que ocurrían al variar el quarl de salida, se presentaron prácticamente los mismos perfiles de velocidad axial y las mismas zonas de recirculación así como los mismos perfiles de velocidad tangencial, concluyéndose que el diseño del estabilizador tiene más peso en la formación de la zona de recirculación que el ángulo de salida.

En la prueba de caída de presión estática aguas abajo del quemador con estabilizador fijo y quarl variable, se concluye que es significativo el movimiento del aire hacia adentro de la zona de recirculación, con el consecuente decremento de la presión dinámica dentro de la misma para ambos quarl, en el eje central a la salida del estabilizador, en cambio, la diferencia en cuanto a la presencia del quarl a 24° con respecto al quarl de 45°, solo radica en la formación de crestas de caída de presión estática en las orillas de cada plano (fig 5.29) y que representan mayor movimiento del flujo de aire en esas zonas con respecto a los perfiles obtenidos con quarl a 45°.

Finalmente el número de giro producido por el estabilizador con ambos quarl de salida fueron pequeños, considerando que un número de giro aceptable mínimo deba ser de 0.6 para que exista una buena turbulencia, con esto puede concluirse que el diseño del estabilizador empleado en estas pruebas, no es el adecuado para este tipo de quemador, sin embargo la metodología ofrece los parámetros que permiten indicar la eficiencia o ineficiencia de un estabilizador o de algún otro elemento para cualquier tipo de quemador.

## RECOMENDACIONES.

Las recomendaciones derivadas de este trabajo son:

Utilizar los resultados obtenidos durante este trabajo, para compararlos con los resultados obtenidos por medio de un programa de computo que caracterice este tipo de patrones de flujo, en tal sentido actualmente se este desarrollado un programa en el departamento de sistemas de combustión del IIE, el cual a la fecha permite determinar:

- Las líneas de corriente producidas por el flujo.
- El tensor de esfuerzos máximo.
- La energía de turbulencia producida.

Comparar y juntar los resultados a fin de dar mayor soporte a la presentación de los resultados obtenidos al aplicar la metodología.

Buscar la interacción entre la aerodinámica y la atomización, mediante el desarrollo de un proyecto de investigación, el cual contemple la puesta en operación e escala de un quemador definido como eficiente por medio de la metodología, e fin de evaluar su funcionamiento, considerando la medición de los siguientes parámetros:

- Perfiles de velocidad antes y después del estabilizador.
- Concentración de los productos de combustión.
- Perfiles de temperatura.

Para el cambio del estabilizador de 8 álabes usado en una unidad de 158 MW por un estabilizador de 12 álabes modificado se recomienda lo siguiente.

Realizar reuniones con el personal de la central, afín de definir los parámetros geométricos del prototipo e instalar en el sistema de combustión, así como las modificaciones a las cajas de aire de acuerdo con las características físicas del prototipo, las cuales son el tamaño del estabilizador, la longitud y el ancho del álabe y la inclinación del mismo.

Antes de realizar la validación experimental instrumentar la caldera con termopares tipo "Chordal", con el objeto de llevar un registro continuo de temperaturas de pared de agua, lo anterior permitirá identificar alguna variación de la misma durante el desarrollo de las pruebas a fin de comprobar que no se alteran las temperaturas de diseño de las paredes de agua, evitando con ello el problema de falle de los mismos por calentamiento.

Balancear los flujos de aire y combustible que utiliza el sistema de combustión. Para lograr lo anterior se recomienda instalar o habilitar para cada caja de aire de los quemadores, una toma de presión estática, con el objeto de medir la caída de presión



producida en cada quemador. Si las caídas de presión son diferentes para cada quemador, balancear el sistema de combustión por medio del cierre o apertura de las compuertas de aire de cada quemador hasta obtener caídas de presión semejantes.

Para balancear el flujo de combustible, se recomienda realizar la caracterización de un juego de fichas de atomización nuevo, en el banco de pruebas de atomización con que cuenta la C.F.E. en la C.T. Francisco Pérez Ríos de Tula Hgo. Determinar por medio de esta caracterización para cada ficha, su curva de comportamiento Presión-Gasto de combustible. Toda vez que sean caracterizadas las fichas seleccionar e instalar por niveles de quemadores las fichas que presenten curvas de operación semejantes.

Toda vez que se tenga construido el prototipo del estabilizador de flama modificado, se recomienda realizar su validación experimental en operación real mediante la aplicación de la metodología para la evaluación de los sistemas de combustión (desarrollado por el IIE), tanto para el estabilizador de 8 alabes como el estabilizador modificado. Esta metodología permitirá definir y comparar las condiciones de operación óptimas para cada estabilizador, de acuerdo con el mínimo exceso de aire requerido por el sistema de combustión. Este exceso de aire se define de acuerdo con las normas ecológicas mexicanas sobre contaminantes emitidas a la atmósfera por fuentes fijas. Básicamente la metodología para evaluar sistemas de combustión, consiste de una serie de pruebas, en las cuales para cada conjunto de valores de las principales condiciones de operación del generador de vapor (presión vapor de atomización, temperatura de combustible y diferencial cajas de aire-hogar), se modifica el exceso de aire con que opera el generador y para cada modificación, se determina la composición de oxígeno y monóxido de carbono en los gases de combustión a la entrada de gases del precalentador regenerativo.

Con los datos que se obtienen en cada prueba, se elaboran las curvas de operación del sistema de combustión, las cuales muestran la variación del monóxido de carbono como función del oxígeno. Del análisis de las curvas anteriores, la metodología permite definir las condiciones finales óptimas con el mínimo exceso de aire de combustión, que permita satisfacer las normas establecidas por SEDESOL.

Adicionalmente determinar la producción de partículas inquemadas en ( $\text{mg}/\text{m}^3\text{N}$ ), así como la distribución del tamaño de las mismas (micras), en condiciones iniciales y finales para ambos estabilizadores, ya que estas determinaciones son una medida de cómo se está realizando el mezclado entre el aire y el combustible y directamente evalúa la relación atomizador estabilizador.

De ser posible se recomienda realizar la comparación cualitativa, por medio de fotografías tomadas a través de las mirillas del hogar de la caldera. El objetivo de éstas, es mostrar visualmente qué ocurre con las flamas producidas antes y después del cambio del estabilizador.

**Evaluar la eficiencia del generador de vapor en condiciones iniciales y finales para ambos estabilizadores y realizar la comparación con la eficiencia de diseño del mismo, para determinar la mejora (en caso de existir) al cambiar el estabilizador de flama.**

**Finalmente se desea que la metodología se aplique a todas aquellas unidades que presentan problemas de diseño en su sistema de combustión, a fin de obtener resultados que permitan incrementar la eficiencia de funcionamiento de los mismos y así poder incrementar los índices de disponibilidad y eficiencia de los generadores de vapor que se utilizan en las centrales termoeléctricas del país.**

## BIBLIOGRAFIA

1. MEXICO, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, "Introducción a centrales termoeléctricas". Celaya, Gto., México : Gerencia de Generación y Transmisión, Febrero 1987, 102 p.
2. GILL A.B. "General Plant Considerations - Part I". En : Power Plants Performance. Ed. Butterworths, London, England : c 1984, pp. 7-9 30-31.
3. DIXON, JOHN R. "Thermodynamics I : an introduction to energy". Ed, Prentice - Hall, New Jersey, USA : c 1975 pp. 263-267.
4. MEXICO, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, "Teoría y pruebas de combustión". Celaya, Gto., México : Subdirección de Producción, 1991, 150p.
5. MEXICO, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, "Manual del generador de vapor (Central Termoeléctrica Manzanillo II)". Mayo 1987, 539 p.
6. MEXICO, COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD, "Prontuario de datos técnicos de la central termoeléctrica José Aceves Pozos". G.E.G.D., Mayo 1990, 72 p.
7. MARTINEZ F. MARCO A. "Modelación fluidodinámica de quemadores tangenciales correspondiente a un generador de vapor de 973,950 Kg/hr. (2'150,000 lb/hr) usado para la generación de energía eléctrica". Tesis licenciatura, UNAM, México D.F., 1984, 148 p.
8. MARTINEZ F. JOSE O. "Caracterización en frío de estabilizadores de flama utilizados en generadores de vapor de centrales termoeléctricas". Tesis posgrado, UNAM, México D.F., 1992, 129 p.
9. MUNOZ V. FRANCISCO J. "Revisión de las normas de diseño aerodinámico de quemadores". Tesis licenciatura, Instituto Tecnológico de Acapulco, Acapulco ,Gro., México, 1994, 127 p.
10. PERRY, ROBERT L. "Thermodynamics for engineering technology". Ed. Breton Publishers, California, USA : c 1984, pp. 307-309, 313-315.
11. J.G. SINGER. "Combustion Fossil Power". Combustion Engineering, Inc. Windsor, Connecticut 06095, 1991.

12. HUERTA E. MARIO. "Caracterización fluidodinámica de un quemador para combustible líquido". Tesis licenciatura, Universidad Veracruzana, México, 1987.
13. MILLER V. H. "Industrial flames part 7: burner design heat transfer and fluid flow service". National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow, 1980.
14. BEER J.M. "On the stability and combustion intensity of pressure - jet oil flames". International Flame Research Foundation. Ijmuiden 22nd July 1964.
15. J.L. LIVSEY, P.L. WILCOX and R.D. SOUTH. "Isothermal aerodynamic investigation of a suspended flame register". Journal of the Institute of fuel, April 1968, pp. 169-186.
16. ANSON D., TINDALL D. "A general expression for the discharge coefficient of a burner register". Journal of the Institute of fuel, June 1967.
17. BANHAWY Y.E., WHITELOW J.K. "Experimental study of interaction between a fuel spray and surrounding combustion air". Combustion and flames, 1981.
18. MARTINEZ O., BOLADO E. "Caracterización en frío de estabilizadores de flama utilizados en generadores de vapor tangenciales de generadores de vapor de centrales termoeléctricas de 158 MW". Informe final IIE/15/5587/I 04/F Cuernavaca, Mor., 1994.
19. HEMSAT KLAUS H., SCHULTZ TOMAS J., CHOJNNACKI DENNIS A. "Designin furnaces for low NOx emissions". Conf on Nat. Gas Res. and Technol, 3rd, Proc. Sess, Pap, Dallas, Tex, Mar 6-8 1974 Sess 3, Pap 1, 22 p. Available from Inf Serv, Inst.
20. WHITE M. FRANK. "Mecánica de fluidos". Ed. Mc Graw Hill, México D.F., 1984.
21. HOLMAN J.P. "Métodos numéricos para ingenieros". Ed. Mc Graw Hill, 1977, pp. 86-89.
22. MORA J. JAIME. "Comportamientos fluidodinámicos de flujos rotatorios en un modelo de una cámara de combustión". Tesis licenciatura, Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Mich., México, 1984. p. 118.
23. Boletines de DISA "Information measurement and analysis". Números del 12 al 25.

## **APENDICE A**

**PROGRAMA PARA CALCULAR VELOCIDADES EN EL DUCTO DEL QUEMADOR,  
COEFICIENTES DE DESCARGA DEL QUEMADOR Y ESTABILIZADOR,  
CAIDAS DE PRESION Y VELOCIDADES CON LA SONDA DE DOS ORIFICIOS.**

```

10 OPEN "RESUL.DAT" FOR OUTPUT AS #1
15 CLS
20 PRINT "PROGRAMA PARA CALCULAR VELOCIDADES EN EL DUCTO DEL QUEMADOR"
30 PRINT "COEFICIENTES DE DESCARGA DE QUEMADOR Y ESTABILIZADOR"
40 PRINT "CAIDAS DE PRESION Y VELOCIDADES CON LA SONDA DE 2 ORIFICIOS"
50 PRINT
60 PRINT "SELECCIONA LA QUE DESEAS CALCULAR ANOTANDO EL NUMERO"
70 PRINT "CORRESPONDIENTE EN LA OPCION DE SELECCION"
75 PRINT
77 PRINT "*****OPCIONES*****"
78 PRINT
80 PRINT "VELOCIDADES EN EL DUCTO Y CD'S DE QUEMADOR Y ESTABILIZADOR: 1"
90 PRINT "CAIDAS DE PRESION: 2"
100 PRINT "VELOCIDADES CON LA SONDA DE 2 ORIFICIOS: 3"
105 PRINT "SALIR DEL PROGRAMA: 4"
110 PRINT
120 INPUT "DAME TU SELECCION"; SE
125 PRINT
130 IF SE = 1 THEN GOTO 140
135 IF SE = 2 THEN GOTO 890
136 IF SE = 3 THEN GOTO 1300
137 IF SE = 4 THEN GOTO 3090
140 CLS
145 PRINT "DATOS PARA CALCULAR LA VEL. EN EL DUCTO Y CD'S DE QUEM. Y EST."
146 PRINT
150 INPUT "DAME EL NOMBRE DEL ESTABILIZADOR"; NOMBRES
180 INPUT "DAME EL NUMERO DE PUNTOS MEDIDOS"; N
190 INPUT "DAME EL VALOR DE LA TEMPERATURA EN GRADOS C"; T
200 INPUT "DAME EL AREA DE MEDICION EN M2"; A
210 INPUT "DAME EL FLUJO VOLUMETRICO DEL VENTILADOR EN M3/S"; WT
220 INPUT "DAME EL DIA. HIDRAULICO DEL DUCTO DEL QUEMADOR EN METROS"; DH
230 INPUT "DAME LA CAIDA DE PRESION DEL SISTEMA EN mm H2O"; DP
240 REDIM PD(N), V(N)
250 PAT = 87387.48
260 KR = 287
270 RHO = PAT / ((T + 273) * (KR))
275 WT = WT * RHO
280 DP = DP * 9.81
290 SUM = 0
300 FOR I = 1 TO N
310 PRINT
320 PRINT "EL PUNTO DE MEDICION ES"; I
330 INPUT "DAME LA PRES. DINAMICA"; PD(I)
340 NEXT I
350 FOR J = 1 TO N
360 V(J) = .2538 * (SQR((T + 273) * PD(J)))
380 SUM = SUM + V(J)
390 NEXT J
400 WR = RHO * A * SUM
410 CD1 = WR / WT
420 CD2 = SQR(8 * WR ^ 2 / (3.14156 ^ 2 * RHO * DH ^ 4 * DP))
500 DIF = ABS((CD1 - CD2) / CD1) * 100
510 PRINT
520 PRINT "PUNTO", "PRES.DIN", "VEL"

```

```

530 PRINT "MEDIC", "MM H20", "M/S"
540 PRINT
550 FOR K = 1 TO N
560 PRINT K, PD(K), V(K)
570 NEXT K
580 PRINT
590 PRINT "EL COEF. DE DESCARGA DEL QUEMADOR POR MEDICION ES"; CD1
600 PRINT "EL COEF. DE DESCARGA DEL QUEMADOR POR FORMULA ES"; CD2
610 PRINT "LA DIFERENCIA EN % ES"; DIF
620 KT = 1 / CD1 ^ 2
630 KE = 1.5806
640 KS = .442 / (SQR(1 / (KT - KE)) - .558)
650 CDS = 1 / KS
660 PRINT "EL COEF. DE PERDIDAS DEL ESTABILIZADOR ES"; KS
670 PRINT "EL COEF. DE DESCARGA DEL ESTABILIZADOR ES"; CDS
680 PRINT #1,
690 PRINT #1, "PROGRAMA PARA CALCULAR LAS VELOCIDADES EN EL DUCTO"
700 PRINT #1, "Y LOS COEFICIENTES DE DESCARGA DE QUEMADOR Y ESTABILIZADOR"
710 PRINT #1,
720 PRINT #1, "EL NOMBRE DEL ESTABILIZADOR", NOMBRES
730 PRINT #1,
740 PRINT #1, "PUNTO", "PRES.DIN", "VEL"
750 PRINT #1, "MEDIC", "MM H20", "M/S"
760 PRINT #1,
780 FOR K = 1 TO N
790 PRINT #1, K, PD(K), V(K)
800 NEXT K
805 PRINT #1,
810 PRINT #1, "EL COEF. DE DESCARGA DEL QUEMADOR POR MEDICION ES"; CD1
820 PRINT #1, "EL COEF. DE DESCARGA DEL QUEMADOR POR FORMULA ES"; CD2
830 PRINT #1, "LA DIFERENCIA EN % ES"; DIF
840 PRINT #1, "EL COEF. DE PERDIDAS DEL ESTABILIZADOR ES"; KS
850 PRINT #1, "EL COEF. DE DESCARGA DEL ESTABILIZADOR ES"; CDS
855 PRINT
860 INPUT "QUIERES HACER OTRO CALCULO SI=1:NO=2"; RES
870 IF RES = 1 THEN GOTO 15
875 IF RES = 2 THEN GOTO 3090
880 END
890 CLS
900 PRINT "PROGRAMA PARA CALCULAR LAS CAIDAS DE PRESION"
910 PRINT
920 INPUT "DAME EL NUMERO DE MEDICIONES"; NM
930 REDIM PE(NM), PD2(NM), VEL(NM), RE(NM), CP(NM)
940 INPUT "DAME LA TEMPERATURA DEL AIRE"; TA
950 INPUT "DAME EL DIAMETRO HIDRAULICO DEL QUEMADOR EN MTS"; DH
960 INPUT "DAME LA VISCOSIDAD DINAMICA"; NU
970 KR = 287
980 PA = 87387.48
990 RHO = PA / (KR * (TA + 273))
1000 FOR I = 1 TO NM
1010 PRINT
1020 PRINT "EL PUNTO DE MEDICION ES"; I
1030 INPUT "DAME LA CAIDA DE PRESION ESTATICA"; PE(I)
1040 INPUT "DAME LA PRESION DINAMICA"; PD2(I)

```

```

1050 CPM = PD2(NM)
1060 NEXT I
1070 FOR J = 1 TO NM
1080 VEL(J) = .2538 * (SQR((TA + 273) * PD2(J)))
1090 RE(J) = RHO * VEL(J) * DH / NU
1100 CP(J) = PE(J) / CPM
1110 NEXT J
1120 PRINT
1130 PRINT "PRESION", "PRESION", "VELO", "NUMERO DE", "CAIDA"
1140 PRINT "ESTATICA", "DINAMICA", " ", "REYNOLDS", "DE PRES."
1150 PRINT "mm H2O", "mm H2O", "m/s", "ADIM.", "ADIM."
1160 PRINT
1170 FOR K = 1 TO NM
1180 PRINT PE(K), PD2(K), VEL(K), RE(K), CP(K)
1190 NEXT K
1195 PRINT #1,
1200 PRINT #1, "RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE CAIDA DE PRESION"
1210 PRINT #1, "NOMBRE DEL ESTABILIZADOR "; NOMBRES
1220 PRINT #1,
1230 PRINT #1, "PRESION", "PRESION", "VELO", "NUMERO DE", "CAIDA"
1240 PRINT #1, "ESTATICA", "DINAMICA", " ", "REYNOLDS", "DE PRES."
1250 PRINT #1, "mm H2O", "mm H2O", "m/s", "ADIM.", "ADIM."
1260 PRINT #1,
1262 FOR K = 1 TO NM
1264 PRINT #1, PE(K), PD2(K), VEL(K), RE(K), CP(K)
1266 NEXT K
1268 PRINT
1270 INPUT "QUIERES HACER OTRO CALCULO SI=1:NO=2"; RES
1280 IF RES = 1 THEN GOTO 15
1285 IF RES = 2 THEN GOTO 3090
1290 END
1300 CLS
1310 PRINT "PROGRAMA PARA CALCULAR VELOCIDADES CON LA Sonda DE 2 ORIFICIOS"
1320 PRINT
1330 INPUT "DAME EL NUMERO DE PUNTOS MEDIDOS"; N
1335 REDIM PR(N), PD1(N), V1(N)
1340 INPUT "DAME EL NOMBRE DEL ESTABILIZADOR"; NOMBRES
1350 INPUT "DAME EL PLANO DE MEDICION"; PLANOS
1355 PRINT
1360 INPUT "DAME EL VALOR DE LA TEMPERATURA EN GRADOS C"; T
1370 INPUT "DAME EL INCREMENTO RADIAL"; DR
1380 AD = 0
1381 FOR I = 1 TO N
1382 PR(I) = AD + DR
1383 AD = PR(I)
1384 NEXT I
1385 RHO = (87387.48 / (287 * (T + 273)))
1390 FOR I = 1 TO N
1400 PRINT
1410 PRINT "EL PUNTO DE MEDICION ES"; I
1420 INPUT "DAME LA PRES. DINAMICA"; PD1(I)
1430 NEXT I
1440 FOR J = 1 TO N
1450 IF PD1(J) < 0 THEN GOTO 1480

```



```
1460 V1(J) = .2299 * (SQR((T + 273) * PD1(J)))
1470 GOTO 1490
1480 V1(J) = -.2299 * (SQR((T + 273) * ABS(PD1(J))))
1490 NEXT J
2500 PRINT "COOR RAD", "PRES DIN", "VEL"
2520 PRINT "MM", "MM H2O", "M/S"
2530 PRINT
2540 FOR K = 1 TO N
2550 PRINT PR(K), PD1(K), V1(K)
2560 NEXT K
2570 PRINT #1, "VELOCIDADES CON LA SONDA DE 2 ORIFICIOS"
2575 PRINT #1,
2580 PRINT #1, "NOMBRE DEL ESTABILIZADOR", NOMBRES
2590 PRINT #1, "PLANO DE MEDICION", PLANOS
2595 PRINT #1,
3000 PRINT #1, "COOR RAD", "PRES DIN", "VEL; ""
3010 PRINT #1, "MM ", "MM H2O", "M/S"
3020 PRINT #1,
3030 FOR K = 1 TO N
3040 PRINT #1, PR(K), PD1(K), V1(K)
3050 NEXT K
3060 PRINT
3070 INPUT "QUIERES HACER OTRO PLANO SI=1:NO=2"; RES
3080 IF RES = 1 THEN GOTO 1300
3085 IF RES = 2 THEN GOTO 15
3090 END
```

**APENDICE B**

**PROGRAMA "CAMSE" PARA CALCULAR EL NUMERO DE GIRO  
CON LOS DATOS DE LA SONDA DE 5 ORIFICIOS.**

## OPERACION DEL PROGRAMA

El programa CAMSE se ha escrito en lenguaje FORTRAN y sirve para el cálculo de datos de medición obtenidos por la sonda de 5 orificios. Este programa contiene los suficientes comentarios dentro de sí, lo que permite reducir la explicación del mismo.

Los datos de entrada correspondientes a la mediciones de presión se escriben en un archivo de datos con formato libre. Se empieza a la izquierda con por lo menos un espacio entre los datos. A continuación se muestra y explica un ejemplo (tomado de la referencia ?2).

DATOS	EXPLICACION
1	NE
MITSUBISHI	COMENTARIO
655 20 1 0 10 10 4 1000 0	PU T H SM RA RB NS VSOLL P17
9 22.5 20.5 18.9 90	S P0-P17 P0-P2 P0-P4 ALPHA
5 22.5 20.5 18.9 90	
2 22.5 20.5 18.9 90	
0 22.5 20.5 18.9 90	

Donde:

NE : Número de los planos de medición.

COMENTARIO : Hasta 60 letras.

PU : Presión atmosférica (torr = mm Hg).

T : Temperatura del aire.

H : Coordenada X del plano.

SM : Coordenada radial del eje del flujo.

RA : Radio de la cámara (mm).

RB : Radio del quemador (mm).

NS : Número de mediciones en este plano.

VSOLL : Flujo volumétrico del aire (m<sup>3</sup>/h).

P17 : Presión contra la cual se hacen las mediciones (mm columna de agua).

Si se mide contra la presión atmosférica P17 = 0.

S : Coordenada radial.

P0 : Presión en el orificio central de la sonda.

P2 : Presión en el orificio 2 de la sonda.

P4 : Presión en el orificio 4 de la sonda.

ALPHA : Angulo  $\alpha$ .

```

C *****
C PROGRAMA PARA CALCULAR LOS RESULTADOS DE LAS MEDICIONES
C CON LA SONDA DE CINCO ORIFICIOS.
C PRIMERA EDICION SEGUN LA TESIS DE AHLHEIM 1975.
C SEGUNDA EDICION SEGUN LA TESIS DE HALLET (UNIVERSIDAD
C DE KARLSRUHE 1981)
C ULTIMA EDICION SEGUN LA TESIS DE ESCALERA (PROGRAMA SALFORD/
C IIE/CONACYT 1994)
C ADEMAS DE LOS RESULTADOS DE LA MEDICION ENTRAN LOS COEFICIENTES
C DE LAS CURVAS DE CALIBRACION CK02, CK04, CBETA Y CALPHA,
C DETERMINADOS POR UN METODO DE "LEAST SQUARES".
C LA RUTINA TRAPEZ SIRVE COMO SUBROUTINA DE INTEGRACION EN
C ESTE PROGRAMA.
C *****

```

```

DIMENSION P0(50),P2(50),P4(50),ALPHA(50),ALPHA(50),
1 BETA(50),Y(50),R(50),V(50),UAX(50),UTAN(50),UR(50),P(50),
2 EINS(50),LV(50),CBETA(6,12),CK02(6,12),CK04(6,12),
3 CALPHA(12),PST(50),CKPS(6,12),VX(50),VY(50),VZ(50),
4 RHOUAX(50),PDYN(50),PZ(50),PGES(50),RURUCK(50),
6 PHI(50),RHO(50),VVXY(50),VVXZ(50),VDELTA(50),
7 VDELTI(50)
C PDZST(50),VD(50),UDR(50),DLMS(50),UDAX(50),PDGES(50)
C PDST(50),UDTAN(50)
CHARACTER IBCDY*70,ENT*6,SAL*6,NOMBRE*10,NOMI*10
DATA EINS/50*1./
C CHARACTER*30 ENTRADA,SALIDA
PI=3.1416

```

```

C *****
C SE LEEN LOS COEFICIENTES DE LAS CURVAS DE CALIBRACION
C CBETA,CK02,CK04,CKPS Y CALPHA,LOS CUALES SON POLINOMIOS DE
C GRADO 11. EXISTEN CALIBRACIONES A 5 VELOCIDADES DIFERENTES.
C (CALPHA ES UNA EXCEPCION, SU VALOR ES EL MISMO PARA CUALQUIER
C VELOCIDAD.
C *****

```

```

OPEN(UNIT=15,FILE='COEF.MOD',STATUS='OLD')
DO L1=1,5
READ(15,*) (CBETA(L1,L2), L2=1,12)
READ(15,*) (CK02(L1,L2), L2=1,12)
READ(15,*) (CK04(L1,L2), L2=1,12)
READ(15,*) (CKPS(L1,L2), L2=1,12)
ENDDO
READ(15,*) CALPHA
11 FORMAT(6(1X,E12.6)/1X,6(1X,E12.6))
RHO00=1.293*273.15/(1.013E5)
WRITE(*,*)'EN QUE ARCHIVO ESTAN TUS DATOS DE ENTRADA?'
READ I2, ENT
NOMBRE=ENT//'.DAT'
OPEN(UNIT=5,FILE=NOMBRE,STATUS='OLD')
WRITE(*,*)'EN QUE ARCHIVO QUIERES TUS RESULTADOS?'
READ (*,12) SAL
12 FORMAT(A6)
NOMI=SAL//'.DAT'
OPEN(UNIT=6,FILE=NOMI,STATUS='NEW')

```

```

READ(5,*) NE
C.....
C NE= NUMERO DE PLANOS DE MEDICION
C IBCDY= TEXTO PARA IDENTIFICAR ESTE PLANO (MAXIMO 70 CARACT.)
C.....
DO I=1,NE
  READ(5,25) IBCDY
25 FORMAT(A70)
C.....
C SE LEEN LOS DATOS GENERALES QUE VALEN EN ESTE PLANO
C DE MEDICION:
C PU= PRESION ATMOSFERICA (TORR= MM DE MERCURIO)
C T= TEMPERATURA DEL AIRE (GRADOS CENTIGRADOS)
C H= COORDENADA X DEL PLANO, POSICION DE LA SONDA EN UN COMPARTIMIENTO
C SM= COORDENADA Y DEL EJE DEL FLUJO. LA CUAL ES CERO SI EL ORIGEN DE
C LAS COORDENADAS COINCIDE CON EL EJE DEL FLUJO
C RA= RADIO DE LA CAMARA DE COMBUSTION (MM)
C RB= RADIO DEL QUEMADOR (MM)
C NS= NUMERO DE MEDICIONES EN ESTE PLANO
C VSOLL= FLUJO DE AIRE (M3/H)
C P17= PRESION CONTRA LA CUAL SE HACEN LAS MEDICIONES
C (MM DE AGUA). SI SE MIDE CONTRA LA PRESION DEL AMBIENTE P17=0.
C CUANDO SE MIDE EN UNA CAMARA DE COMBUSTION ES MAS FAVORABLE MEDIR
C CONTRA LA PRESION ESTATICA A LA SALIDA DE LA CAMARA.
C.....
  READ(5,*) PU,T,H,SM,RA,RB,NS,VSOLL,P17
  RI=0.0
  PU=PU*1.33E2
  P17=P17*9.81
  WRITE(6,1) IBCDY
1 FORMAT(1H,9X,67(' '),9X,'0',3X,A60,T76,'0')
  WRITE(6,80) H
80 FORMAT(9X,'0' POSICION DE LA SONDA EN EL EJE Z EN MM-',F6.0,
1 T76,'0')
  WRITE(6,2) PU,T
2 FORMAT(9X,'0', PRESION ATMOSFERICA',F6.0,
1 NM=2 TEMPERATURA DEL AIRE',F6.0,'C',T76,'0',9X,67(' '))
  WRITE(6,3)
3 FORMAT(/,10X,'DATOS DE MEDICION')
  WRITE(6,801)
801 FORMAT(14X,'Y',7X,T(0)-P(AMB),2X,T(0)-P(2),2X,T(0)-P(4),
1 2X,'ALPHAMED',4X,'ALPHAREAL')
  RHOO=RHOO/(273.15+T)
  NS=NS+1
  NS1=NS-1
  NS2=NS-2
  NNEG=1
C.....
C NNEG=NUMERO DE LOS PUNTOS DE MEDICION CON COORDENADAS POSITIVAS.
C PARA CALCULARLOS VALORES INTEGRALES SOLO SE USAN LOS VALORES CON
C COORDENADAS POSITIVAS.
C.....
DO I=2,NS
C.....

```

```

C SE LEEN LOS VALORES DE LA MEDICION.
C S= COORDENADA RADIAL (MM). SE CORRIGE ESTE VALOR CON SM
C Y GUARDA COMO Y(10). EL RADIO ES EL VALOR ABSOLUTO DE
C Y(10).
C P0= PRESION AL ORIFICIO CENTRAL (MM DE AGUA)
C P02,P04 SON LAS DIFERENCIAS DE PRESION ENTRE P0-P2
C Y P0-P4 (MM DE AGUA)
C ALPHA= ES EL ANGULO DE LA SONDA.
C SE TIENE QUE EMPEZAR CON EL RADIO MAS GRANDE (CERCA DE
C LA PARED DONDE ENTRA LA SONDA).
C*****
      READ(5,*) S,P0(10),P02,P04,ALPHA(10)
      WRITE(6,*) S,P0(10),P02,P04,ALPHA(10)
      ALP=ALPHA(10)
      ALPHA(10)=ALPHA(10)-90.
      IF (ALPHA(10).GT. 180.) ALPHA(10)=ALPHA(10)-360.
      WRITE(6,800) S,P0(10),P02,P04,ALP,ALPHA(10)
800  FORMAT(9X,6(F8.2,4X))
      P2(10)=P0(10)-P02
      P4(10)=P0(10)-P04
      RHO(10)=RHO*PU
      Y(10)=S-SM
      IF(Y(10).GT. 0.) NNEG=NNEG+1
      R(10)=ABS(Y(10))
      ENDDO
      Y(1)=+RA
      R(1)=RA
C  ENDF
C*****
C POR EL PRIMER CALCULO DE LA VELOCIDAD SE USA LA CURVA
C DE CALIBRACION PARA LA VELOCIDAD MAS PEQUEÑA. (LV(11)=1
C RESPECTIVO LVALT=1)
C*****
55  DO 11=2,N5
      LV(11)=1
      ENDDO
      DO J=1,2
C*****
C EL PROGRAMA CALCULA LA VELOCIDAD DOS VECES. LA PRIMERA
C VEZ CHECA LA VELOCIDAD PARA ELEGIR LA CURVA DE CALIBRACION
C ADECUADA.
C*****
      DO 12=2,N5
      FAKTOR=1.
      LVALT=LV(12)
      BETA(12)=CBETA(LVALT,1)
      CPS=CKPS(LVALT,1)
      ALPHAK(12)=ALPHA(12)-CALPHA(1)
      IF(((P0(12)-P2(12)).LE. 0.) .AND. ((P0(12)-P4(12))
      1 .LE. 0.)) GOTO 98
C*****
C ERROR EN LA MEDICION. EL FLUJO VIENE POR ATRAS. (SE ELIMINARA
C ESTE RESULTADO DESPUES)
C*****

```

```

IF(P2(I2)-P4(I2)) 50,51,51
C.....
C SE DETERMINA QUE ECUACION SE TIENE QUE USAR PARA CALCULAR
C LA VELOCIDAD. EN EL CASO P2MENORP4 SE CALCULA  $PV=(P2-P4)/(P0-P2)$ 
C (P0-P2); EN EL CASO P4MENORP2 SE CALCULA  $PV=(P2-P4)/(P0-P4)$ .
C.....
50 P(I2)=(P2(I2)-P4(I2))/(P0(I2)-P2(I2))
57 CV=CK02(L,VALT,1)
   CP=P0(I2)-P2(I2)
   IF (FAKTOR .LT. 0) CP=P0(I2)-P4(I2)
   IF (ABS(P(I2)) .LT. 1.E-10) GOTO 53
C.....
C CALCULO DEL VALOR CV EN FUNCION DEL VALOR PV Y EL POLINOMIO
C CK02
C.....
DO L=2,12
CV=CV+CK02(L,VALT,L)*(P(I2)**(L-1))
ENDDO
GOTO 52
51 P(I2)=(P2(I2)-P4(I2))/(P0(I2)-P4(I2))
CV=CK04(L,VALT,1)
CP=P0(I2)-P4(I2)
IF (ABS(P(I2)) .LT. 1.E-10) GOTO 53
C.....
C CALCULO DE CK04 ANALOGO DE CK02
C.....
DO L=2,12
CV=CV+CK04(L,VALT,L)*(P(I2)**(L-1))
ENDDO
52 CONTINUE
C.....
C INVESTIGACION DEL ANGULO BETA, SI ESTA DENTRO DEL
C RANGO -60 BETA 60. SI NO SE ELIMINA EL VALOR.
C.....
IF ((P(I2) .GE. -1.82) .AND. (P(I2) .LE. 1.57)) GOTO 54
IF ((P(I2) .GT. 1.82) .OR. (P(I2) .LT. -1.82)) GOTO 98
P(I2)=-P(I2)
FAKTOR=-1.
GOTO 57
98 WRITE(6,4) Y(I2),P(I2),P0(I2),P2(I2),P4(I2)
C.....
C VALOR DE LA MEDICION FUERA DEL RANGO PERMITIDO. SE
C ELIMINA ESTE VALOR Y SE RENUMERAN LOS OTROS
C.....
4 FORMAT(1H0,3(5X,F10.5),5X,'BETA GT. +60 O LT. -60')
NS=NS-1
NS1=NS1-1
IF (Y(I2) .GT. 0.) NNEG=NNEG-1
N17=NS+1
DO IL=12,N17
Y(IL)=Y(IL+1)
R(IL)=R(IL+1)
ALPHA(IL)=ALPHA(IL+1)
P0(IL)=P0(IL+1)

```

```

P2(IL)=P2(IL+1)
P4(IL)=P4(IL+1)
RHO(IL)=RHO(IL+1)
ENDDO
GOTO 55

54 CONTINUE
C.....
C CALCULO DEL ANGULO BETA Y DEL VALOR CPS EN FUNCION DEL
C VALOR PV Y DE LOS POLINOMIOS CBETA Y CKPS
C.....
DO L=2,12
BETA(L2)=BETA(L2)+CBETA(L,VALT,L)*(P(L2)**(L-1))
CPS=CPS+CKPS(L,VALT,L)*(P(L2)**(L-1))
ENDDO
IF (ABS(BETA(L2)) .LT. 1.E-10) GOTO 56
C.....
C CORRECCION DEL ANGULO ALPHA EN FUNCION DEL POLINOMIO CALPHA
C Y DEL ANGULO BETA
C.....
53 DO L=2,12
ALPHA(L2)=ALPHAK(L2)-CALPHA(L)*(BETA(L2)**(L-1))*FAKTOR
ENDDO
BETA(L2)=BETA(L2)*FAKTOR

56 CONTINUE
C.....
C CALCULO DE LA VELOCIDAD.DEBIDO A LA DIFERENCIA ENTRE
C LA PRESION EN EL FLUJO Y EL AMBIENTE, LA DENSIDAD DEL
C FLUJO CAMBIA UN POCO.
C ENTONCES SE USA UNA ITERACION (2 VECES) PARA CALCULAR
C LA PRESION ESTATICA, LA DENSIDAD Y LA VELOCIDAD.
C EN EL CASO EN QUE SE MIDA EN FLAMAS, SE DEBE DE TENER
C EN CUENTA LA COMPOSICION Y LA TEMPERATURA DEL FLUJO.
C.....
DO IRHO=1,2
V(L2)=SQRT(2.*CP*9.81/(RHO(L2)*CV))
PST(L2)=-.125*RHO(L2)*V(L2)*V(L2)*CPS+0.25*(2*P0(L2)+
1 P2(L2)+P4(L2))*9.81
RHO(L2)=RHO0*(PST(L2)+PU+P17)
ENDDO

70 CONTINUE
C.....
C A PARTIR DEL VALOR DE LA VELOCIDAD CALCULADA SE CHECA
C SI LA CURVA DE CALIBRACION UTILIZADA FUE LA ADECUADA.
C.....
IF(V(L2) .GT. 96.75) LV(L2)=5
IF(V(L2) .LE. 96.75) LV(L2)=4
IF(V(L2) .LE. 66.35) LV(L2)=3
IF(V(L2) .LE. 42.05) LV(L2)=2
IF(V(L2) .LE. 20.90) LV(L2)=1
ENDDO
ENDDO
WRITE(6,802)
802 FORMAT(/,3X,72(°),/,3X,'° RESULTADOS',59X,°)
WRITE(6,87)

```



```

87  FORMAT(3X,'0',4X,'Y',6X,'V',3X,'BETA',3X,'ALPHA',3X,'UAX',
1 5X,'UR',4X,'UTAN',4X,'Vxy',4X,'Vxz',2X,'DELTA',1X,'0')
WRITE(6,133)
133  FORMAT(3X,'0',3X,'MM',5X,'M/S',3X,'DEG',4X,'DEG',5X,'M/S',
1 4X,'M/S',4X,'M/S',4X,'M/S',4X,'M/S',2X,'DEG',3X,'0')
C*****
C LA VELOCIDAD TOTAL SE DESCOMPONE EN SUS TRES COMPONENTES:
C AXIAL, RADIAL Y TANGENCIAL. ADEMAS DSE CALCULAN LA DENSIDAD
C MASICA DEL FLUJO A PARTIR DE LA DENSIDAD LOCAL.
C*****
DO 110=2,NS
BE=BETA(110)*PI/180.
AL=ALPHA(110)*PI/180.
IF (ALPHA(110).LE. -110.) ALPHA(110)=ALPHA(110)+360.
PDYN(110)=0.5*RHO(110)*V(110)*V(110)
PGES(110)=PST(110)+PDYN(110)
VZ(110)=-V(110)*COS(BE)*SIN(AL)
VX(110)=V(110)*COS(BE)*COS(AL)
VY(110)=-V(110)*SIN(BE)
UAX(110)=VX(110)
RHOUAX(110)=RHO(110)*UAX(110)
RURUCK(110)=(ABS(RHOUAX(110))-RHOUAX(110))/2.
UTAN(110)=VZ(110)*(SIGN(1.,Y(110)))
UR(110)=VY(110)*(SIGN(1.,Y(110)))
ENDDO
C*****
C CONDICIONES DE FRONTERA PARA LAS INTEGRACIONES:
C A LA PARED TODAS LAS VELOCIDADES SON CERO.
C LA PRESION ESTATICA DE LA PARED SE TOMA COMO LA PRESION
C ESTATICA MEDIDA EN EL PUNTO MAS CERCANO A ESTE.
C LA PRESION DINAMICA ES CERO SEGUN EL HECHO QUE NO EXISTE
C NINGUNA VELOCIDAD, ENTONCES VALE PTOTAL=PESTATICA.
C*****
UAX(1)=0.
RHOUAX(1)=0.
RURUCK(1)=0.
UTAN(1)=0.
PWAND=PST(2)
PST(1)=PWAND
PGES(1)=PST(1)
C CONTINUE
C*****
C CALCULO DE LOS VALORES INTEGRALES COMO FLUJO VOLUMETRICO
C FLUJO MASICO Y FLUJO DEL IMPULSO. CADA FLUJO TOTAL SE
C DESCOMPONE EN FLUJO EN DIRECCION ADELANTE Y FLUJO EN
C DIRECCION HACIA ATRAS (RECIRCULACION). PARA ESTO SE USA
C LA SUBROUTINA TRAPEZ QUE SE TIENE QUE COMPILAR POR SEPARADO.
C*****
VOLPSI=TRAPEZ(UAX,EINS,EINS,R,NNEG)
VOLAX=VOLPSI*3.6*PI*(2.E-03)
AMAX=PI*3.6*TRAPEZ(RHOUAX,EINS,EINS,R,NNEG)*(1.E-03)*2.
AMSOLL=VSOLL*1.293
FEHLM=(AMAX-AMSOLL)/AMSOLL*100.
AMRUCK=PI*3.6*TRAPEZ(RURUCK,EINS,EINS,R,NNEG)*(1.E-03)*2.

```

```

PRUCK=AMRUCK/AMAX*100.
A1AX=PI*TRAPEZ(UAX,RHOUAX,EINS,R,NNEG)*(1.E-06)*2.
DTAN=PI*TRAPEZ(RHOUAX,UTAN,R,R,NNEG)*(1.E-09)*2.
SDRUCK=PI*TRAPEZ(PST,EINS,EINS,R,NNEG)*(1.E-06)*2.
SSCHUB=A1AX+SDRUCK
EAX=PI*TRAPEZ(UAX,UAX,RHOUAX,R,NNEG)*(0.5E-6)*2.
EDRUCK=PI*TRAPEZ(PST,UAX,EINS,R,NNEG)*(1.E-6)*2.
ETAN=PI*TRAPEZ(RHOUAX,UTAN,UTAN,R,NNEG)*(0.5E-6)*2.
EGES=EAX+ETAN+EDRUCK
PZ(1)=PST(1)
PZ(2)=PST(2)
PHI(1)=1.
PSI=0.
NNEG1=NNEG-1.

```

```

C*****
C CALCULO DE LA PRESION ESTATICA A PARTIR DE LA ECUACION
C SIMPLIFICADA DE CONSERVACION DEL IMPULSO EN FUNCION DEL
C TRASCURSO DE LA VELOCIDAD RADIAL. MUCHAS VECES ESTE METODO
C ES MAS EXACTO QUE EL METODO DIRECTO A PARTIR DE LOS VALORES
C DE MEDICION DE LA SONDA.
C PHI ES LA PARTE DEL FLUJO VOLUMETRICO QUE CORRE DENTRO DEL
C RADIO EN CONSIDERACION RELACIONADO AL FLUJO VOLUMETRICO
C TOTAL (VOLPSI).
C*****

```

```

DO 110=2,NNEG1
PZ(110+1)=PZ(110)-0.5*(RHO(110)*UTAN(110)**2./R(110)+
1 RHO(110)*UTAN(110+1)**2./R(110+1))*(R(110)-R(110+1))
PSI=PSI+0.5*(UAX(110)*R(110)+UAX(110-1)*R(110-1))*
1 ABS(R(110)-R(110-1))
PHI(110)=1.-PSI/VOLPSI
ENDDO
PHI(NNEG)=0
NNEG1=NNEG+1

```

```

C*****
C TODOS LOS VALORES PARA PHI Y PZ EN LOS PUNTOS CON COORDENADAS
C NEGATIVAS SE IGUALAN A CERO.
C*****

```

```

DO 112=NNEG1,NS
PZ(112)=0.
PHI(112)=0.
ENDDO

```

```

C*****
C IMPRESION DE LOS RESULTADOS
C*****

```

```

DO 110=2,NS
VVXY(110)=SQRT(UAX(110)**2.+UR(110)**2.)
VVXZ(110)=SQRT(UTAN(110)**2.+UAX(110)**2.)
VDELTA(110)=ATAN(UR(110)/UAX(110))
VDELTI(110)=VDELTA(110)*180./PI
WRITE (6,5)Y(110),V(110),BETA(110),ALPHAX(110),UAX(110),
1 UR(110),UTAN(110),VVXY(110),VVXZ(110),VDELTI(110)
5 FORMAT(3X,'*',F6.1,9(1X,F6.1),1X,'*')
ENDDO
CONTINUE

```

```

WRITE(6,803)
803 FORMAT(3X,72(' '))
ZDRUCK=PI*TRAPEZ(PZ,EINS,EINS,R,NNEG)*(1.E-6)*2.
ZEDRUK=PI*TRAPEZ(PZ,UAX,EINS,R,NNEG)*(1.E-6)*2.
ZSCHUB=AIAX+ZDRUCK
C*****
C CALCULO DEL NUMERO DE SWIRL SEGUN DIFERENTES DEFINICIONES:
C SDRALL = MOMENTO DEL IMPULSO TANGENCIAL/RADIO*TENSION AXIAL
C ZDRALL = EL MISMO,PERO SE UTILIZA LA PRESION ESTATICA PZ
C CALCULADA CON LA CONVERSION DEL IMPULSO.
C DRALL2 = MOMENTO DEL IMPULSO TANGENCIAL/RADIO*IMPULSO AXIAL
C NO SE TIENE EN CUENTA LA FUERZA DE LA PRESION.
C DRALL3 = FLUJO DE LA ENERGIA DEL SWIRL (TANGENCIAL)/FLUJO
C DE LA ENERGIA (AXIAL).
C*****
SDRALL=DTAN/(RB*(AIAX+SDRUCK))*1.E+03
ZDRALL=DTAN/(RB*(AIAX+ZDRUCK))*1.E+03
DRALL2=DTAN/(RB*AIAX)*1.E+03
DRALL3=ETAN/EAX
WRITE(6,140) IBCDY
140 FORMAT(/,5X,A60/,5X,'VALORES INTEGRALES -TODAS LAS '
1 'PRESIONES Y VALORES CALCULADOS',/,5X,
2 'SON RELACIONADOS A LA PRESION ATMOSFERICA-')
WRITE(6,30) VOLAX,AMAX,AMSOLL,FEHLM
30 FORMAT(/,5X,'FLUJO VOLUMETRICO AXIAL:',T33,F8.2,' m3/h',/,5X,
1 'FLUJO MASICO AXIAL:',T33,F8.2,' kg/h',/,5X,
2 'FLUJO MASICO A LA ENTRADA:',F8.2,' kg/h',
3 ' DISCREPANCIA:',F6.1,'%')
WRITE(6,34) AMRUCK,PRUCK
34 FORMAT(/,5X,'FLUJO MASICO RECIRCULANTE',F7.1,
1 ' kg/h',3X,F5.1,'% DEL FLUJO MASICO TOTAL')
WRITE(6,31) AIAX,SDRUCK,SSCHUB,DTAN
31 FORMAT(/,5X,'IMPULSO AXIAL:',T42,F10.5,' N',/,
1 5X,'PROMEDIO DE LA FUERZA DE PRESION:',T42,F10.5,' N',/,5X,
2 'PROMEDIO DE LA FUERZA DE TENSION:',F10.5,' N',/,5X,
3 'IMPULSO DEL SWIRL:',T42,F10.5,' N-m')
WRITE(6,32) EAX,ETAN,EDRUCK,EGES
32 FORMAT(/,5X,'ENERGIA AXIAL:',T30,F8.3,' Watt',/,5X,
1 'ENERGIA DEL SWIRL:',T30,F8.3,' Watt',/,5X,
2 'ENERGIA DE LA PRESION:',F8.3,' Watt',/,5X,
3 'ENERGIA TOTAL:',T30,F8.3,' Watt')
WRITE(6,33) SDRALL,DRALL2,DRALL3
33 FORMAT(/,5X,'NUMERO DE SWIRL (PROMEDIO):',T36,F10.5/,5X,
1 'SWIRL2 (DRALL2):',T36,F10.5/,5X,'SWIRL3 (DRALL3):',T36,F10.5)
WRITE(6,16) ZDRUCK,ZSCHUB,ZEDRUK,ZDRALL
16 FORMAT(/,5X,'VALORES CALCULADOS CON LA PRESION ESTATICA',/,
2 5X,'DETERMINADA CON EL METODO INTEGRAL:',/,
2 5X,'FUERZA DE PRESION',F8.4,' N', 'FUERZA DE TENSION',
3 F8.4,' N',/,5X,'ENERGIA DE PRESION',F9.3,' Watt',15X,'SWIRL',
4 F8.4)
ENDDO
STOP
END

```

```

C.....
C FUNCTION ZUR NUMERISCHEN INTEGRATION MIT HILFE DER TRAPEZ-REGEL
C.....
FUNCTION TRAPEZ(A,B,C,D,NT)
DIMENSION A(50),B(50),C(50),D(50)
TRAPEZ=0.
DO K=2,NT
TRAPEZ=TRAPEZ+0.5*(A(K)*B(K)*C(K)*D(K)+A(K-1)*B(K-1)*
1 C(K-1)*D(K-1))*ABS(D(K)-D(K-1))
ENDDO
RETURN
END

```