



73
2éj

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**"DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA LA OPTIMIZACION
DE LA COMBUSTION EN GENERADORES DE VAPOR
DE CENTRALES TERMoeLECTRICAS."**

TESIS

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

P R E S E N T A:

JOSE OSCAR MARTINEZ FLORES

DIRECTOR: DR. JAIME CERVANTES DE GORTARI

ASESOR: ING. JULIO MILAN FORESSI



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

	PAGINA
INTRODUCCION.	1
CAPITULO 1.	
COMBUSTION EN GENERADORES DE VAPOR.	9
1.1. Características de los Combustóleos Mexicanos.	9
1.2. Combustión Estequiométrica.	11
1.3. Combustión con exceso de aire.	13
1.4. Combustión del combustóleo.	15
1.5. Productos de combustión.	18
1.5.1. Tipos.	18
1.5.2. Productos de combustión del carbono.	18
1.5.3. Productos de combustión del hidrógeno.	20
1.5.4. Productos de combustión del azufre.	21
1.5.5. Productos de combustión del nitrógeno.	21
1.5.6. Productos provenientes del vanadio.	22
1.6. Eficiencia de la combustión.	24
1.7. Optimización de la combustión en Generadores de Vapor.	26
CAPITULO 2	
PRUEBAS QUE SE PROPONEN E INFORMACION QUE APORTA CADA UNA DE ELLAS.	30
2.1. Secuencia de pruebas propuesta.	30
2.2. Descripción e información que aporta cada prueba.	33
2.2.1. Parámetros operativos de la unidad.	50
2.3. Hojas para vaciado de datos para calculos de las pruebas.	51
CAPITULO 3	
SISTEMAS DE MEDICION DE PRODUCTOS DE COMBUSTION.	58
3.1. Técnicas de medición de productos de combustión.	58
3.1.1. Ventajas y desventajas de las técnicas de medición.	90

3.2.	Equipos de medición utilizados en la metodología.	92
3.2.1.	Equipo para muestreo isocinético de partículas.	92
3.2.2.	Analizador de monóxido de carbono.	92
3.2.3.	Analizador de trióxido de azufre.	92
3.2.4.	Analizador de oxígeno.	93
3.3.	Sitios de medición.	94
3.4.	Instalación del equipo de medición para la realización de las pruebas.	103

CAPITULO 4

	APLICACION DE LA METODOLOGIA A UNA UNIDAD DE 300 MW CON QUEMADORES TANGENCIALES Y OTRA DE 150 MW CON QUEMADORES FRONTALES.	105
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

4.1.	Resultados obtenidos en una unidad de 300 MW con quemadores tangenciales.	105
4.1.1.	Mediciones preliminares.	108
4.1.2.	Comportamiento del sistema de combustión a 300 MW en condiciones iniciales.	116
4.1.3.	Influencia de la presión de vapor de atomización en el comportamiento del sistema de combustión.	122
4.1.4.	Influencia de la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar en el comportamiento del sistema de combustión.	130
4.1.5.	Influencia de la temperatura del combustible en el comportamiento del sistema de combustión.	137
4.1.6.	Comportamiento del sistema de combustión a 300 MW en condiciones finales.	148
4.1.7.	Determinación de la eficiencia del generador de vapor del consumo específico de combustible y del régimen térmico bruto de la unidad en condiciones iniciales y finales.	156
4.1.8.	Determinaciones complementarias.	158
4.2.	Resultados obtenidos en una unidad de 150 MW con quemadores frontales.	162

4.2.1. Mediciones preliminares.	165
4.2.2. Comportamiento del sistema de combustión a 150 MW en condiciones iniciales.	171
4.2.3. Influencia de la temperatura del combustible en el comportamiento del sistema de combustión.	176
4.2.4. Influencia de la presión de vapor de atomización en el comportamiento del sistema de combustión.	186
4.2.5. Comportamiento del sistema de combustión a 150 MW en condiciones finales.	196
4.2.6. Determinación de la eficiencia del generador de vapor, del consumo específico del combustible y del régimen térmico bruto de la unidad en condiciones iniciales y en condiciones finales.	201
4.2.7. Determinaciones complementarias.	203
CAPITULO 5	
CONCLUSIONES.	208
REFERENCIAS	
APENDICE 1	
APENDICE 2	

INTRODUCCION.

LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA EN MEXICO.

Dentro del total de generación de energía eléctrica en México, aproximadamente el 65% de la misma es generada por centrales termoeléctricas a partir de combustibles fósiles.

Las centrales termoeléctricas pueden clasificarse en(1):

	CAPACIDAD INSTALADA
a) CENTRALES TERMOELECTRICAS DE VAPOR.....	7786 MW
b) CENTRALES TERMOELECTRICAS TURBOGAS.....	1539 MW
c) CENTRALES TERMOELECTRICAS DE CICLO COMBINADO....	1223 MW
d) CENTRALES GEOTERMOELECTRICAS.....	180 MW
e) CENTRALES TERMOELECTRICAS DE COMBUSTION INTERNA.	180 MW

La capacidad instalada considerada en esta clasificación fue establecida en 1980. Como se desprende de la clasificación anterior, las centrales termoeléctricas de vapor constituyen la mayor cantidad de MW instalados. Para hacer frente a los requerimientos de energía eléctrica del país durante los próximos años, el programa de obras e inversiones permitió aumentar la capacidad instalada en más

de 1000 MW de 1984 a 1985 (tabla 1.1). A partir de 1986 la capacidad instalada registrará un crecimiento promedio anual que fluctuará entre el 7 y 7.5%.

Dados los proyectos de ejecución en el período 1984-1990, se espera incrementar la capacidad instalada en más de 7000 MW de los que, aproximadamente, un 16% serán con base en hidroeléctricas, un 6% con base en geotermoelectricas, 8% de carboeléctricas convencionales, 16% de nucleares y el restante 54% con base en termoelectricas convencionales(2).

TABLA 1.1 CAPACIDAD INSTALADA DE GENERACION ELECTRICA.
PROGRAMADA HASTA 1988 (MW) (2).

TIPO DE PLANTA	1983	1984	1985	1986	1987	1988
HIDROELECTRICAS	6550	6550	6550	7446	7722	7814
GEOTERMICAS	205	425	645	645	645	645
CARBOELECTRICAS	600	600	600	900	1200	1200
NUCLEARES	0	0	0	0	654	1308
TERMoeLECTRICAS	11695	12627	13264	13794	14473	15925
TOTAL	19050	20202	21059	22785	24694	26892

Cabe destacar que, no obstante el crecimiento de la capacidad, se registrará una ligera reducción en la participación de las plantas con base en hidrocarburos dentro de la estructura de la capacidad instalada total, al pasar éstas del 65% en 1985 a aproximadamente 59% para 1990 (sujeto a la situación económica del país).

De acuerdo con lo anterior cabe esperar que se tenga garantizada una oferta de energía siempre superior a la demanda. Esto puede alterarse, ya que se tienen que considerar al menos dos factores adicionales: por un lado, no es seguro que, dada la particular situación económica del país, pueda cumplirse estrictamente con los planes de inversión establecidos; por otro, se debe tener en cuenta que la capacidad real siempre es menor que la instalada, debido a que la disponibilidad nunca alcanza el 100% .

Esta situación plantea la necesidad de considerar la disponibilidad como uno de los principales problemas que tendrá que afrontar el sector eléctrico a corto y mediano plazo.

DISPONIBILIDAD E INDISPONIBILIDAD.

La disponibilidad de una central termoeléctrica se puede definir como el cociente entre la energía generada en un tiempo dado y el producto de la potencia instalada por el tiempo considerado. La disponibilidad expresada en porcentaje es:

$$\text{Disponibilidad} = (\text{MW-h generados} / \text{MW nominales} \times \text{tiempo}) \times 100.$$

De lo anterior puede definirse la indisponibilidad en porcentaje como:

$$\text{Indisponibilidad} = (1 - \text{disponibilidad}) \times 100$$

La indisponibilidad se puede originar por tres diferentes causas:

- a). Mantenimiento
- b). Decremento (disminución de carga)
- c). Falla

La indisponibilidad por mantenimiento está constituida por los tiempos muertos ocasionados por reparaciones de los equipos de la unidad. Los mantenimientos pueden ser correctivos o preventivos.

La indisponibilidad por disminución de carga se produce cuando alguno de los elementos de la unidad funciona defectuosamente o falla de modo tal que no impide la operación de la unidad, pero tampoco permite que opere a plena potencia, o bien en el caso que, por razones de demanda, se disminuye intencionalmente la carga de la unidad.

La indisponibilidad por falla se produce cuando alguno de los elementos de la unidad tiene problemas de funcionamiento, que ocasionan que la unidad salga de operación.

La tabla 1.2 muestra la indisponibilidad por equipos para el

periodo 1983-84 considerando unidades de 80,82,84,150,158 y
300 MW(3).

TABLA 1.2 INDISPONIBILIDAD ASOCIADA A EQUIPOS DE CENTRALES
 TERMoeLECTRICAS DURANTE EL PERIODO 1983-1984
 PARA GENERADORES DE VAPOR DE 80-300 MW(3)..

EQUIPO	PARTICIPACION EN EL TOTAL DE INDISPONIBILIDAD
GENERADOR DE VAPOR	30.56
BOMBAS DE AGUA DE ALIMENTACION	11.03
TURBOGENERADOR	10.40
PRECALENTADOR DE AIRE	10.13
TIROS Y RECIRCULADORES	8.87
TABLEROS Y PROTECCIONES	8.06
CONDENSADOR	5.90
CALENTADORES DE AGUA DE ALIMENTACION.	5.72
BOMBAS DE CIRCULACION FORZADA	5.18
ERRORES EN OPERACION Y/O MANTO	4.15

Puede observarse que el generador de vapor ocupa el primer lugar en cuanto a responsabilidad por la indisponibilidad de centrales termoeléctricas.

COMBUSTION E INDISPONIBILIDAD.

Dentro de la problemática de disponibilidad y eficiencia de los generadores de vapor de centrales termoeléctricas, el proceso de combustión ocupa un lugar preponderante, ya que de él se derivan buena parte de los problemas de ensuciamiento y deterioro en dichos generadores.

A partir del año de 1979, simultáneamente con un incremento en la incidencia de fallas en los generadores de vapor del país, se comenzó a detectar, mediante análisis sistemáticos, que la calidad de los combustibles empleados para la generación de energía eléctrica había sufrido una degradación con respecto a años anteriores. Tal degradación (como puede apreciarse en la tabla 1.3), afectó principalmente a la viscosidad, al contenido de azufre, al de vanadio y al de asfaltenos.

TABLA 1.3 VARIACION EN EL CONTENIDO DE ALGUNOS COMPONENTES DE LOS COMBUSTIBLES MEXICANOS.

COMPONENTE	1982-1985		
	1979	PROMEDIO	MAXIMO
AZUFRE (%)	3.3	3.7	4.5
VANADIO(p.p.m)	125.0	198.0	283.0
ASFALTENOS(%)	8.2	14.3	19.5
VISCOSIDAD(S.S.U)	350.0	554.0	1537.0

Los problemas ocasionados por el quemado de combustóleo con altos contenidos de azufre, vanadio y asfaltenos en generadores de vapor, pueden resumirse en:

- a). Corrosión y ensuciamiento de los elementos en las regiones de alta temperatura. (sobrecalentadores y recalentadores)
- b). Corrosión y ensuciamiento de los elementos en las regiones de baja temperatura. (precalentadores de aire)
- c). Disminución de la eficiencia de los generadores de vapor. (debida principalmente a ensuciamiento).

Lo anterior origina un aumento en los índices de indisponibilidad de las centrales termoeléctricas.

En la presente tesis, el objetivo fundamental fué el de desarrollar una metodología para la optimización de la combustión en generadores de vapor, la que consiste en una secuencia de pruebas que permiten caracterizar el comportamiento del sistema de combustión del generador de vapor para diferentes condiciones de operación.

A continuación se presenta un breve resumen del contenido de los capítulos subsecuentes.

En el capítulo 1, se describen las características de los combustóleos mexicanos, así como los antecedentes sobre el

proceso de combustión, concluyendo con los productos de combustión que se derivan del quemado de combustóleo.

En el capítulo 2, se propone la secuencia de pruebas de combustión aplicable a toda unidad generadora de vapor, mencionando con detalle en que consiste cada una de estas pruebas, así como el tipo de información que brinda cada una de ellas.

Dentro del capítulo 3, se describen los sistemas de medición de los productos de combustión utilizados en la metodología, sus alcances y limitaciones sus ventajas y desventajas, así como la localización de los sitios de medición donde se aplica la metodología.

En el capítulo 4, se presentan los resultados obtenidos al aplicar la presente metodología a dos diferentes diseños de generadores de vapor, uno de 300 MW con quemadores tangenciales y otro de 150 MW con quemadores frontales para comprobar la validez de esta metodología.

Finalmente en el capítulo 5, se dan las conclusiones y recomendaciones pertinentes obtenidas en el desarrollo de este trabajo.

CAPITULO 1

COMBUSTION EN GENERADORES DE VAPOR.

1.1. CARACTERISTICAS DE LOS COMBUSTIBLES MEXICANOS.

Si bien en algunos casos se usan gas natural, diesel o carbón como combustibles para generación de energía eléctrica, la gran mayoría de las centrales termoeléctricas del país utilizan combustóleo.

El combustóleo es un aceite combustible residual, obtenido como subproducto de la refinación del petróleo en el proceso de destilación al vacío junto con aceites ligeros, aceites pesados y asfaltenos. Está constituido por una mezcla de compuestos hidrocarbonados de varios tipos con complejos orgánicos de azufre, vanadio y materiales inorgánicos no combustibles.

Las características principales de los combustibles mexicanos se presentan en la tabla 1.4.(4)

TABLA 1.4 PROPIEDADES PROMEDIO DE LOS
 COMBUSTOLEOS MEXICANOS.
 (1982-1984)(4).

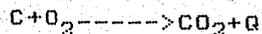
NOMBRE DE LA PROPIEDAD	CARACTERISTICAS.
..AGUA POR DESTILACION (%)	0.617
..AGUA Y SEDIMENTO POR CENTRIFUGACION (%)	0.550
..AROMATICOS (% PESO)	28.336
..ASFALTENOS (% PESO)	13.188
..AZUFRE (% PESO)	3.405
..CALCIO (p.p.m.)	19.212
..CARBON CONRADSON (% PESO)	14.073
..CARBONO (% PESO)	84.866
..CENIZAS (% PESO)	0.052
..COBRE (p.p.m.)	1.000
..FIERRO (p.p.m.)	7.743
..GRAVEDAD ESPECIFICA (A.P.I.)	12.122
..HIDROGENO (% PESO)	10.899
..MAGNESIO (p.p.m.)	4.270
..NIQUEL (p.p.m.)	13.270
..NITROGENO (% PESO)	0.409
..DENSIDAD 20/4 C (gr/ml)	0.983
..PODER CALORIFICO (kcal/kg)	10.130
..POLAR POLIAROMATICOS (% PESO)	26.360
..POTASIO (p.p.m.)	3.624
..SATURADOS (% PESO)	30.682
..SODIO (p.p.m.)	30.613
..TEMPERATURA DE INFLAMACION (C)	95.000
..TENSION SUPERFICIAL 60 C (dina/cm)	29.731
..VANADIO (p.p.m)	183.970
..VISCOSIDAD A 50 C (S.S.F)	152.970
..VISCOSIDAD A 60 C (S.S.F)	223.700
..VISCOSIDAD A 82.2 C (S.S.F)	68.835

1.2. COMBUSTION ESTEQUIOMETRICA.

La combustión puede definirse como una rápida combinación química del oxígeno con los elementos combustibles o el combustible mismo, con desprendimiento de calor.

Desde el punto de vista de combustión, los elementos químicos principales en el combustible son tres: carbono, hidrógeno y azufre.

El oxígeno necesario para la combustión es suministrado por el aire atmosférico y la combinación exotérmica del mismo con el combustible tiene lugar de acuerdo con las siguientes reacciones principales:



De acuerdo con estas reacciones y considerando las composiciones del aire y del combustible, los consumos de oxígeno para la combustión se obtienen mediante cálculos estequiométricos. Las cantidades expresadas en porcentajes en peso de los elementos del combustible se determinan mediante análisis elemental, y se utilizan para calcular la cantidad teórica o estequiométrica de aire requerido para la combustión. Los cálculos se basan en la conversión del porcentaje en peso del combustible a moles o volumen de cada elemento, para después calcular la cantidad de moles de

oxígeno necesarios, y por lo tanto el volumen de aire(5)..

El calor liberado (Q) es: 7,837 kcal por kg de carbono quemado, 33,874 kcal por kg de hidrógeno y 2,212 kcal por kg de azufre y son estos tres elementos los que proporcionan la energía térmica útil durante la combustión.

Cuando se realiza la combustión y sólo se obtienen productos sin quedar combustible u oxígeno libre, se tiene una combustión estequiométrica.

1.3. COMBUSTION CON EXCESO DE AIRE.

En sistemas reales de combustión es necesario un exceso de oxígeno para llevar a cabo en forma completa las reacciones de combustión. Esto significa que se requiere una cantidad de aire mayor que la calculada estequiométricamente.

La razón de utilizar cierto exceso de aire, se debe a la dificultad de lograr un contacto perfecto entre las moléculas de oxígeno del aire y las partículas del combustible a ser oxidadas.

Este exceso de aire está destinado a asegurar una combustión completa y, por tanto, evitar la producción de productos de combustión incompleta. En generadores de vapor, sin embargo, la utilización de excesos de aire elevados provoca disminuciones en la eficiencia del equipo, ya que el aire que está en exceso debe ser calentado a expensas del calor liberado por la combustión. Esto provoca una disminución de la temperatura de la flama y un incremento de la masa de gases de combustión, lo que ha su vez determina que se pierda más calor con los gases que escapan por la chimenea del generador de vapor.

Para el análisis del comportamiento de sistemas de combustión, usualmente se mide la concentración de oxígeno en gases de combustión, indicando este valor el porcentaje que no participó en la reacción y que por lo tanto está en exceso. Este porcentaje está relacionado con el exceso de aire de combustión y se representa por (O_2) . La

relación entre la concentración de (O_2) en gases de combustión y el exceso de aire depende de la composición del combustible y puede deducirse mediante consideraciones estequiométricas (Apendice 1).

Matemáticamente el exceso de aire se puede expresar por:

$$EA(\%) = \frac{(3.762 + F_c) \times (0.21 - (O_2))}{(O_2)} \times 100$$

Donde:

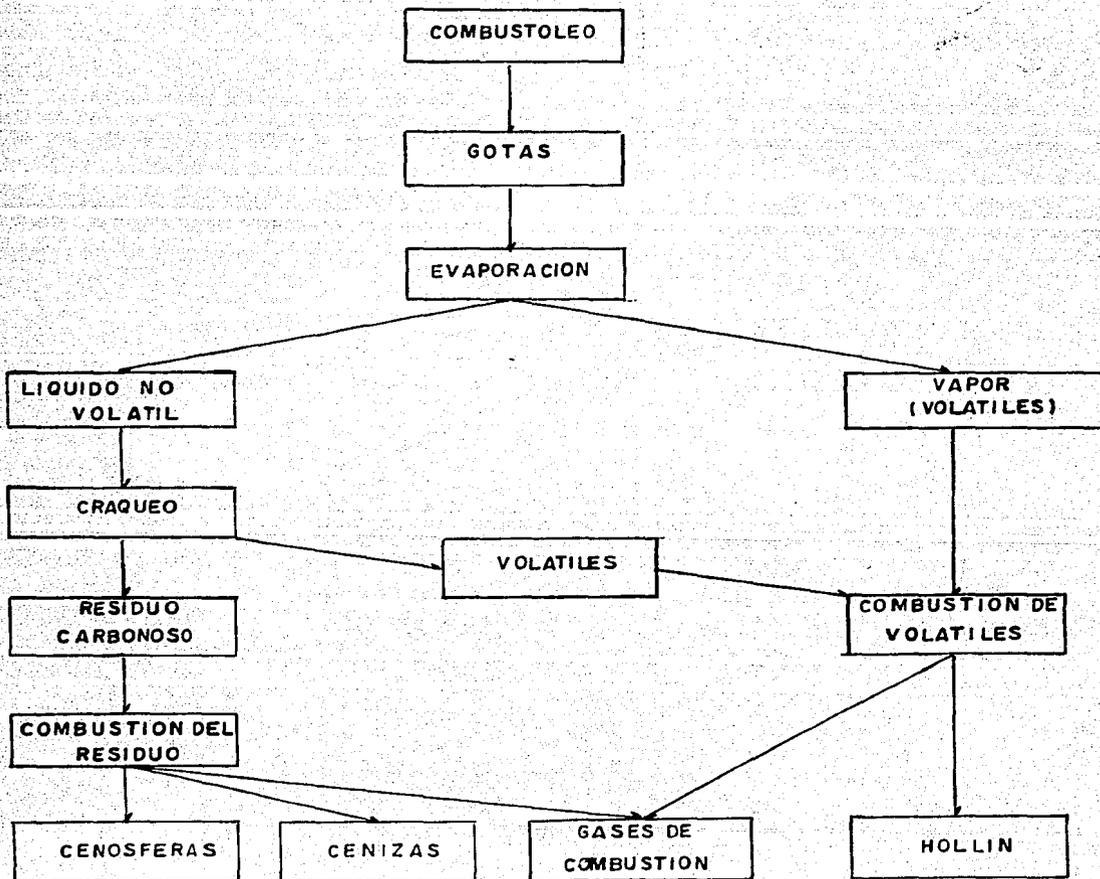
3.762=factor que considera al Nitrógeno presente en el aire.

F_c =Factor de combustión que depende del combustible utilizado.

O_2 =Concentración de oxígeno en gases de combustión.

1.4. COMBUSTION DEL COMBUSTOLEO.

Desde un punto de vista físico, el proceso de combustión del combustóleo puede representarse mediante el siguiente esquema:



El primer paso del proceso lo cumplen los atomizadores. Su función es inyectar el combustible en la cámara de combustión en forma de pequeñas gotas con velocidad y trayectorias tales que propicien un buen mezclado con el aire de combustión. Si bien existen múltiples diseños, el tipo de atomizador más usado en unidades mayores de 150 MW. es el que emplea vapor como fluido auxiliar. En este caso, el tamaño de las gotas producidas aumenta con la viscosidad del combustible (a mayor viscosidad, gotas más grandes), y disminuye con el incremento de la cantidad de vapor utilizado (a mayor relación vapor/combustible gotas más pequeñas).

El diámetro medio de las gotas necesario para lograr una buena combustión depende primordialmente de la calidad del combustible. Para el caso de combustóleo con altos contenidos de asfaltenos se requiere una atomización muy fina (diámetro promedio 100 micras), para evitar la producción de partículas carbonosas.

Producida la atomización del combustible, se forma una mezcla macroscópica de las gotitas con el aire de combustión y con los gases calientes recirculantes.

Esta mezcla produce un calentamiento de las gotitas por transferencia convectiva de calor del aire precalentado y de los flujos recirculantes de gases de combustión y por radiación de la flama, lo que determina la evaporación parcial de las gotitas y la mezcla de los vapores de combustible con el aire de combustión. Durante la

evaporación se separan los volátiles de los no-volátiles. Dentro de los no-volátiles se encuentran los asfaltenos y los metales pesados.

Cuando la composición y temperatura son adecuadas (mezcla dentro de los límites de inflamabilidad y temperatura necesaria para iniciar las reacciones), se produce el encendido de la mezcla. Las gotitas más pequeñas se evaporan y encienden más rápido. La combustión es esencialmente la del vapor de combustible(6).

Simultáneamente los asfaltenos son fraccionados por efecto térmico. Este efecto denominado craqueo produce volátiles y un residuo carbonoso; los volátiles se queman produciendo gases de combustión y hollín, mientras que el residuo carbonoso se puede quemar total ó parcialmente, produciendo cenósferas, cenizas y gases de combustión (las cenósferas se forman a partir del residuo carbonoso, por la combustión incompleta del mismo).

1.5. PRODUCTOS DE COMBUSTION.

1.5.1 TIPOS

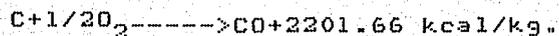
Los productos obtenidos mediante la combustión de combustóleo en un generador de vapor dependen de las particularidades del combustóleo y del estado de conservación y operación del generador. Estas condiciones determinan la concentración de cada producto e incluso, la presencia ó ausencia de algunos de ellos.

Los productos de combustión incluyen compuestos gaseosos, vapores y sólidos. Entre los dos primeros se encuentran los óxidos de carbono, agua, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrógeno, compuestos hidrocarbonados, etc.

Los sólidos pueden dividirse en dos grupos; los que se depositan en la zona de alta temperatura, formados por compuestos inorgánicos provenientes de los elementos metálicos presentes en el combustible, y los que son transportados por los gases de combustión hasta las regiones de baja temperatura, constituidos por carbón, óxidos y sales metálicas.

1.5.2. PRODUCTOS DE COMBUSTION DEL CARBONO.

En las primeras etapas de la combustión y como resultado de la combustión incompleta del carbono del combustible se forma monóxido de carbono según la reacción:



Casi inmediatamente, en presencia de oxígeno y siempre que la temperatura sea superior a 1000°C, el CO se oxida a CO_2 siguiendo la reacción:
 $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \text{-----} \rightarrow \text{CO}_2 + 5635.8 \text{ kcal/kg.}$

Para que la oxidación de CO a CO_2 se complete antes de que los gases abandonen la región fuertemente reactiva de la flama se requiere un buen mezclado aire combustible.

Si la aerodinámica de los quemadores no propicia esta mezcla, en los gases de salida se observarán altas concentraciones de CO coexistiendo con concentraciones de O_2 también elevadas.

Esta situación es perjudicial ya que, debido al elevado calor de combustión de la reacción de oxidación del CO, su presencia en los gases de escape implica una disminución apreciable de la eficiencia del generador de vapor.

Por ello es conveniente quemar al combustible utilizando todo el exceso de aire que resulte necesario para evitar la presencia de CO en los gases de combustión, esto es, para lograr la oxidación completa del C a CO_2 . En la práctica esta oxidación puede considerarse "completa" cuando la concentración de CO en los gases de combustión es menor o igual que 200 p.p.m. en volumen.

También provienen de la combustión incompleta del C las partículas sólidas presentes en las regiones de baja temperatura (precalentador de aire y chimenea); dichas

partículas son, como se ha dicho, básicamente de dos tipos: el hollín (o soot), constituido predominantemente por carbón y con un tamaño inferior a 5 micras, y las cenósferas, de tamaño entre 10 y 100 micras, formadas por una matriz carbonosa que incluye óxidos y sulfatos provenientes principalmente de los metales presentes en el combustible.

La concentración de partículas carbonosas, así como su contenido de carbon y su morfología, están ligados a varios factores: cantidad de compuestos asfálticos y polar-aromáticos del combustible, diámetro medio de las gotas producidas por los atomizadores, exceso de aire de combustión y tiempo de residencia en la región de muy alta temperatura.

Las partículas pequeñas (soot) deben quemarse después de efectuar su aporte a la radiación total de la flama. Su presencia en los productos finales de combustión se debe a defectos locales de oxígeno, es decir a una aerodinámica defectuosa.

Asimismo, la presencia de cenósferas en dichos productos, indica que la atomización no fue lo suficientemente buena como para permitir la combustión eficiente del combustible utilizado.

1.5.3. PRODUCTOS DE COMBUSTION DEL HIDROGENO.

La combustión del hidrógeno forma agua siguiendo la reacción:

$$\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$$

1.5.4. PRODUCTOS DE COMBUSTION DEL AZUFRE.

Durante las primeras etapas del proceso de combustión, el azufre del combustible se oxida a dióxido de azufre:



En posteriores etapas, una pequeña cantidad de dióxido de azufre (1 a 3%) se oxida a trióxido de azufre (SO_3) siguiendo diversos mecanismos de reacción(7). La reacción es en realidad un equilibrio representado por:



El SO_3 es susceptible de combinarse con el agua presente en los gases de combustión para formar ácido sulfúrico, el cual puede depositarse en las zonas de baja temperatura del generador de vapor causando fuerte corrosión en las mismas.

Debido a que, cualquiera que sea el mecanismo de la reacción, siempre se requerirá oxígeno para convertir al SO_2 en SO_3 (y este oxígeno solo podrá provenir del exceso de aire de combustión), resulta evidente la conveniencia de quemar al combustible con el menor exceso de aire posible para minimizar la conversión ya citada.

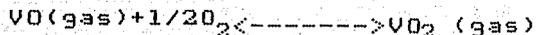
1.5.5 PRODUCTOS DE LA COMBUSTION DEL NITROGENO.

El aire contiene 79% en volumen de nitrógeno, parte del cual reacciona con el oxígeno junto con el nitrógeno que posee el combustible, a temperaturas superiores a 1500°C, formando diversos óxidos (NO_x) que se incorporan a los productos de

combustión. La composición de estos productos, depende del combustible utilizado, de la relación aire/combustible y de las condiciones en que se realice la combustión.

1.5.6. PRODUCTOS PROVENIENTES DEL VANADIO.

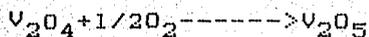
Los productos iniciales en que se transforma el vanadio durante el proceso de combustión son probablemente VO y VO_2 (monóxido y dióxido de vanadio respectivamente). La proporción relativa de los mismos queda determinada por la temperatura y la concentración de oxígeno en los gases.



Como estos óxidos tienen una presión de vapor muy baja aparecen en la flama como partículas sólidas o semisólidas de V_2O_3 y V_2O_4 (trióxido y tetraóxido de vanadio respectivamente) debido a las reacciones:



A medida que los gases se van enfriando, las partículas de V_2O_3 y V_2O_4 pueden absorber oxígeno transformándose en V_2O_5 (pentóxido de vanadio, con P.F.=667°C), siguiendo las siguientes reacciones:



Por su gran agresividad química y su bajo punto de fusión el V_2O_5 es uno de los principales promotores de la corrosión en las zonas de alta temperatura del generador de vapor (bancos de sobrecalentadores y recalentadores). Combinado con el Sodio (Na) del combustible, forma sobre dichos bancos depósitos fundidos que, además de corrosivos son aislantes del calor y reducen la eficiencia del generador de vapor. Por ello resulta conveniente tratar de inhibir la formación de V_2O_5 . El modo más simple de hacerlo es reduciendo el exceso de aire de combustión para que los óxidos inferiores de vanadio (V_2O_3 y V_2O_4) no dispongan de oxígeno para oxidarse a V_2O_5 .

1.6. EFICIENCIA DE LA COMBUSTION.

En todo sistema de combustión, y en particular en el de un generador de vapor, el proceso de quemado del combustible se puede realizar con diversos grados de eficiencia.

Considerando al proceso desde el punto de vista de una reacción química del tipo:

COMBUSTIBLE+AIRE----->PRODUCTOS

la máxima eficiencia de combustión correspondería al caso en el que tanto el combustible como el aire se consumen completamente para dar lugar a los productos, esto es, lo que se ha definido como una combustión estequiométrica.

En los sistemas reales (y sobre todo con combustibles líquidos no volátiles) esta condición es prácticamente inalcanzable.

Como ya se ha dicho, diversas imperfecciones del proceso hacen necesario incorporar una cierta cantidad de aire adicional o "exceso de aire" para que las reacciones tiendan a completarse y, como es natural, este exceso de aire se incorporará a los productos de la combustión del combustible. Si bien cuanto mayor sea el exceso de aire, tanto más podrán completarse las reacciones de combustión, un gran exceso de aire produce dos efectos indeseables: provoca disminuciones en la eficiencia térmica del generador de vapor e incrementa la conversión de SO_2 a SO_3 y de V_2O_3 a V_2O_5 y con ello la corrosión del

propio generador.

De lo expuesto puede deducirse que, para un sistema de combustión dado, que utilice un combustible determinado, la combustión más eficiente será aquella que se verifique con un exceso de aire tal que, al mismo tiempo, sea lo suficientemente grande como para minimizar la formación de productos de combustión incompleta (CO y partículas) y a la vez lo suficientemente pequeño como para no incrementar la producción de SO_3 y V_2O_5 , así como para no disminuir la eficiencia térmica.

El control de la eficiencia de la combustión podrá por lo tanto llevarse a cabo mediante el conocimiento de la composición de los gases de combustión, particularmente las concentraciones de CO, partículas, O_2 y SO_3 .

Las correlaciones entre estas concentraciones para diversas condiciones de operación permitirá entonces definir las condiciones más favorables para una combustión eficiente, y, al mismo tiempo, el mínimo exceso de aire requerido por el proceso.

1.7. OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION EN GENERADORES DE VAPOR.

De acuerdo con las consideraciones expuestas y teniendo en cuenta que, como ya se ha mencionado, la calidad de los combustibles utilizados en México para la generación de energía eléctrica ha cambiado en los últimos años, resulta evidente la necesidad de adecuar los parámetros de operación de los sistemas de combustión de los generadores de vapor de Centrales Termoeléctricas a las nuevas características de los combustibles en uso, con el objeto de contribuir a incrementar su disponibilidad y restituir en la medida en que sea posible su eficiencia a los valores esperados por diseño.

Para alcanzar tal objetivo se requiere de una metodología que permita caracterizar el funcionamiento de los sistemas de combustión con los combustibles actuales y, con base en los resultados de la caracterización, definir los valores de los parámetros de operación que posibiliten que el proceso de combustión se realice en forma óptima.

Desde 1981 a la fecha el I.I.E. ha venido realizando trabajos de diagnóstico para la puesta a punto del sistema de combustión en calderas de C.F.E.

Actualmente se está trabajando en un programa que comprende las 16 unidades de 300 MW. que utilizan combustóleo y que C.F.E. tiene en operación en todo el país.

La experiencia adquirida en los mismos ha permitido ir enriqueciendo la metodología inicial, incorporando nuevas

pruebas y mejorando el modo de obtener e interpretar resultados. La cantidad de resultados obtenidos así como la diversidad de diseños de generadores de vapor sobre los que se ha trabajado, hacen ver la conveniencia de realizar un ordenamiento y sistematización de las pruebas que permita proponer una secuencia de pruebas tanto para la realización de las mismas como para la interpretación de resultados, que sea única y aplicable a los diferentes diseños de generadores de vapor.

En el presente trabajo se propone una metodología para la optimización del proceso de combustión en generadores de vapor que consiste básicamente en: una evaluación del comportamiento del sistema de combustión para varias condiciones de operación. Las más importantes son:

- a). Carga de la unidad (Potencia Generada).
- b). Temperatura del combustible a quemadores.
- c). Relación vapor/combustible en los atomizadores.
- d). Diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar.
- e). Posición de compuertas de aire a quemadores.

La evaluación se realiza a través de una serie de pruebas. En ellas, para cada conjunto de valores de las condiciones mencionadas se modifica el exceso de aire con que opera el generador de vapor y para cada exceso de aire se determina la composición de los gases de combustión a la salida del economizador (entrada de gases a los precalentadores de aire

regenerativos) mediante el análisis de las concentraciones de:

- a). Oxígeno (O_2 , %).
- b). Monóxido de Carbono (CO, p.p.m.).
- c). Dióxido de azufre (SO_2 , p.p.m.).
- d). Trióxido de azufre (SO_3 , p.p.m.).
- e). Contenido de Partículas (Part, mg/Nm³)

Con los datos obtenidos se construyen las llamadas "curvas de operación" del sistema, que muestran las variaciones en el contenido de SO_3 , CO y partículas de los gases de combustión en función del contenido de O_2 . Estas curvas permiten definir el exceso de aire más adecuado para cada conjunto de valores de las condiciones de operación, siguiendo los lineamientos explicados en 1.6.

Comparando entre sí las curvas de operación se puede poner de manifiesto la influencia aislada de cada una de las condiciones de operación en el comportamiento del sistema de combustión y, de este modo, seleccionar los valores que brinden una combustión más eficiente.

Durante las pruebas se toman muestras del combustible utilizado (para su posterior análisis) y se realizan mediciones de las temperaturas y presiones del circuito aire-gases del generador con el objeto de detectar cualquier alteración.

Se determina además la eficiencia del generador de vapor tanto en condiciones iniciales como finales, de modo que los

valores de la misma permitan cuantificar los resultados que en este aspecto brinda la aplicación de la metodología.

CAPITULO 2

PRUEBAS QUE SE PROPONEN E INFORMACION QUE APORTA CADA UNA DE ELLAS.

2.1. SECUENCIA DE PRUEBAS PROPUESTA (8).

Las pruebas que se proponen para caracterizar el comportamiento del sistema de combustión se han clasificado en "pruebas principales", "pruebas complementarias" y "determinaciones complementarias".

Las primeras son aquellas que posibilitan la elaboración de las curvas de operación del sistema de combustión, esto es, las que permiten conocer la influencia de los principales parámetros de operación en la eficiencia del sistema de combustión.

Dentro de las pruebas principales se tienen las pruebas de condiciones iniciales y condiciones finales; ambas pruebas se comparan entre sí para poner de manifiesto la mejoría que se obtiene en la combustión del generador de vapor al aplicar la metodología.

Las demás pruebas permiten conocer los valores de los parámetros de operación (presión vapor de atomización, temperatura de combustible, diferencia de presiones entre

las cajas de aire y el hogar y la posición de las compuertas de aire a quemadores), que posibilitan que el proceso de combustión generador de vapor se realice en forma eficiente.

Las segundas son aquellas que se utilizan para detectar y corregir anomalías en el sistema.

Las últimas brindan información adicional así como el marco de referencia para los resultados anteriores.

2.1.1. PRUEBAS PRINCIPALES.

Estas son:

1. Mediciones preliminares.
2. Comportamiento del sistema de combustión a una determinada carga (condiciones iniciales).
3. Influencia de la presión del vapor de atomización en el comportamiento del sistema de combustión.
4. Influencia de la temperatura del combustible en el comportamiento del sistema de combustión.
5. Influencia de la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar en el comportamiento del sistema de combustión. Esta prueba solo se aplica a generadores de vapor que utilizan quemadores tangenciales.
6. Influencia de la posición de las compuertas de aire a los quemadores en el comportamiento del sistema de combustión. Esta prueba se aplica a generadores de vapor que utilizan quemadores frontales.
7. Comportamiento del sistema de combustión a una determinada carga (condiciones finales).

8. Determinación de la eficiencia del generador de vapor, del consumo específico de combustible y del régimen térmico bruto de la unidad en condiciones iniciales y en condiciones finales.

2.1.2. PRUEBAS COMPLEMENTARIAS.

1. Limpieza y comportamiento de quemadores.

2.1.3. DETERMINACIONES COMPLEMENTARIAS.

1. Análisis de combustible utilizado durante las pruebas.

2. Composición de partículas contenidas en los gases de combustión.

3. Análisis de las presiones y temperaturas del circuito aire-gases.

2.2. DESCRIPCION E INFORMACION QUE APORTA CADA PRUEBA.

1. MEDICIONES PRELIMINARES.

Las Mediciones Preliminares tienen los siguientes objetivos:

- a) Determinar la posición para las sondas de toma de muestra.
- b) Verificar el estado en que se encuentra el sistema de combustión del generador de vapor.
- c) Establecer los rangos de operación de los equipos de medición.
- d) Establecer el rango de variación del exceso de aire de combustión, el cual será utilizado en los demás pruebas.
- e) Conocer el comportamiento del control automático del sistema de combustión.

Los productos de combustión que se miden en esta prueba son: Oxígeno (O_2), Monóxido de Carbono (CO), Trióxido de Azufre (SO_3) y Partículas Carbonosas.

En primer lugar se realiza un mapeo de la composición de los gases de combustión en el ducto de salida del economizador, con el objeto de determinar la mejor posición de las sondas de muestreo dentro del ducto de entrada de gases de combustión a los precalentadores de aire regenerativos.

(para una explicación más detallada ver capítulo 3). Una vez posicionadas las sondas en el punto que corresponde al promedio, se procede a variar el exceso de aire midiendo la concentración de los productos de combustión antes mencionados.

Las gráficas que se elaboran con los resultados de estas pruebas son las de CO , SO_3 y Partículas en función de la concentración de O_2 . La información que aportan las gráficas permite establecer si el sistema de combustión presenta desbalance.

La correlación entre los valores de los controles y las variaciones en la composición de los gases de combustión permite definir el comportamiento del sistema de control automático de combustión.

Si el sistema de combustión presenta desbalances (los cuales se manifiestan porque se obtienen dos curvas separadas de CO y/o Partículas, uno para cada ducto de salida del economizador), una opción dirigida a corregir este problema es realizar la prueba "Limpieza y Comportamiento de Quemadores", la cual será descrita como "prueba complementaria".

2. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A UNA DETERMINADA CARGA (CONDICIONES INICIALES).

Para la realización de esta prueba es necesario que se cumplan las siguientes condiciones :

- a) El sistema de combustión debe estar balanceado.
- b) Mantener fija la carga de la unidad.

La prueba consiste en evaluar el comportamiento del sistema de combustión, mediante la medición detallada de la composición de los gases de combustión (O_2 , CO , SO_2 y Partículas), en función de la variación del exceso de aire dentro del rango establecido en las mediciones preliminares.

Con los datos obtenidos se pueden construir las curvas de operación del sistema de combustión, las que a su vez, hacen posible determinar el exceso de aire óptimo de combustión.

Para operar el generador de vapor con el exceso de aire óptimo determinado, será necesario que tanto los analizadores de oxígeno de la unidad como su sistema de control automático de combustión operen correctamente. De no ser así, pueden construirse curvas complementarias, (Amperaje en los ventiladores de tiro forzado y/o posición de la selectora de exceso de aire vs. por ciento de oxígeno en gases de combustión), que auxilien en la operación del generador de vapor.

3. INFLUENCIA DE LA PRESION DEL VAPOR DE ATOMIZACION EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

El objetivo de esta prueba es determinar la influencia de la presión del vapor de atomización en el comportamiento del sistema de combustión. Como se ha dicho, esta presión influye en el tamaño y velocidad de las gotas de combustible producidas por los atomizadores. Por ello es también válido interpretar que en esta prueba se cuantifica la influencia de tales variables en el comportamiento del sistema de combustión.

Los productos de combustión que se miden en esta prueba son: Oxígeno, Monóxido de Carbono y Partículas. Las mediciones se realizan manteniendo constantes tanto la temperatura del combustible como la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar (o la posición de las compuertas de aire en calderas frontales), variando el exceso de aire y tomando como mínimo tres mediciones (a diferentes excesos de aire) para cada valor de la presión del vapor de atomización.

Las gráficas que se trazan con los resultados de esta prueba son CO y Partículas vs. concentración de O_2 , a diferentes presiones de vapor de atomización. Estas gráficas permiten, por medio de un corte a exceso de aire constante, construir una curva de de CO y Partículas como función de la variación de la Presión de Vapor de Atomización.

La información que aporta esta última gráfica permite conocer cual es la Presión de Vapor de Atomización que brinda mejor combustión en el generador de vapor, esto es la que produce menor cantidad tanto de CO como de Partículas para excesos de aire equivalentes.

4. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

El objetivo de esta prueba es determinar la influencia de la temperatura del combustible en el comportamiento del sistema de combustión.

La temperatura del combustible influye directamente en la viscosidad del mismo. Si el combustible utilizado presenta bajo contenido de asfaltenos, baja viscosidad y bajo contenido de azufre, se puede decir que es un combustible de buena calidad por lo tanto de fácil manejo y quemado. Lo contrario ocurre con combustibles muy viscosos y con altos contenidos de azufre y asfaltenos.

Los productos de combustión que se miden en esta prueba son Monóxido de Carbono, Oxígeno y Partículas, las mediciones se realizan variando el exceso de aire y tomando al menos tres mediciones para cada valor de la temperatura del combustible.

Los resultados obtenidos sirven para realizar las gráficas de concentración de CO y Partículas como función de la concentración de O_2 para diferentes temperaturas de combustible. Estas gráficas permiten por medio de un corte a exceso de aire constante, construir una curva de CO y Partículas como función de la temperatura del combustible.

De la información que aporta la gráfica se puede inferir

cual es la temperatura del combustible que permite operar con la máxima eficiencia de combustión, permitida tanto por los quemadores como por el combustible mismo. Al igual que en la prueba anterior, dicha temperatura es la que brinda menor concentración de CO y Partículas.

5. INFLUENCIA DE LA DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

Esta prueba sólo se aplica a generadores de vapor que utilizan quemadores tangenciales.

La prueba consiste en modificar la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar de la caldera, con el objeto de determinar el efecto de los cambios aerodinámicos en el comportamiento del sistema de combustión.

El efecto físico de los movimientos efectuados en las compuertas se traducen en un cambio en la distribución de aire a los quemadores, sin modificar la cantidad total de aire. Esto es, un aumento en la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar hace que penetre más aire por los compartimientos de quemadores y menos aire por los de aire auxiliar. Por el contrario, una disminución en la diferencia de presiones propicia que entre más aire a los compartimientos de aire auxiliar que a los de quemadores.

Los productos de combustión que se miden en esta prueba son: monóxido de carbono, oxígeno y partículas. Las mediciones se realizan variando el exceso de aire y tomando al menos tres composiciones para cada uno de los valores de la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar.

Los resultados obtenidos permiten construir las gráficas de

concentración de CO y partículas como función del exceso de aire a diferentes valores de la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar. Estas gráficas permiten, por medio de un corte a exceso de aire constante, construir las curvas de monóxido de carbono y partículas como función de la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar.

La información que aportan las gráficas anteriores permite inferir cual es la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar que logra junto con la temperatura del combustible, presión de vapor de atomización y exceso de oxígeno, mejorar la combustión del generador de vapor.

6. INFLUENCIA DE LA POSICION DE LAS COMPUERTAS DE AIRE A QUEMADORES EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION..

Está prueba solo se aplica a generadores de vapor que utilizan quemadores frontales.

La prueba consiste en modificar la posición de las compuertas de aire a quemadores, con el objeto de determinar el efecto de los cambios aerodinámicos en el comportamiento del sistema de combustión.

El efecto físico en el cambio de posición de las compuertas se traduce en cambios en el número de giro (número de Swirl) con el que opera el quemador*.

Los componentes axial y tangencial del flujo de aire de combustión forman una zona de recirculación que se incrementa al aumentar el número de giro. Esto provoca que la flama sea más corta, más estable y más ancha.

Los productos de combustión que se miden en está prueba son al igual que la prueba anterior: monóxido de carbono, oxígeno y partículas. La prueba se realiza variando el exceso de aire y tomando diferentes mediciones, correspondientes a las posiciones que tengan las compuertas de aire.

Los resultados obtenidos permiten construir las gráficas de concentración de monóxido de carbono y partículas como

función del exceso de aire, a diferentes posiciones de las compuertas de aire a quemadores.

Estas gráficas permiten por medio de un corte a exceso de aire constante construir las curvas de CO y partículas como función de la posición de las compuertas de aire a quemadores.

La información que aportan las graficas anteriores sirve para determinar, cual es la posición de las compuertas de aire a quemadores, que logra mejorar la combustión del generador de vapor.

*El número de giro se define como la relación entre el momento tangencial del giro, M_t y el impulso axial I_a , el cual se vuelve adimensional con el radio del quemador.

$$S = M_t / (I_a \times r_o)$$

7. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A UNA DETERMINADA CARGA (CONDICIONES FINALES).

Esta prueba se realiza en forma similar a las anteriores, pero fijando los parámetros de operación (Temperatura del combustible, Presión vapor de atomización, Diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar ó Posición de las compuertas de aire a quemadores) en aquellos valores que brindaron mayor eficiencia de combustión en cada una de ellas.

Los resultados del análisis de los gases de combustión para diferentes excesos de aire, graficados en la forma de curvas de operación reflejan la influencia combinada de las condiciones modificadas en las pruebas anteriores en el comportamiento del sistema de combustión.

A partir de estas curvas, y con base en las consideraciones planteadas en el capítulo 1, puede definirse el mínimo exceso de aire con que puede operar el generador de vapor, esto es, el que brinda mayor eficiencia de combustión y que por lo tanto se recomienda para operación normal.

La comparación de las curvas de operación obtenidas en esta prueba con las que se obtuvieron en la prueba número 2, permite poner de manifiesto la mejoría que se logra operando al sistema de combustión del generador de vapor con los valores óptimos de los parámetros de operación definidos mediante las pruebas 3 a 6.

B. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR DEL CONSUMO ESPECIFICO DEL COMBUSTIBLE Y DEL REGIMEN TERMICO BRUTO DE LA UNIDAD EN CONDICIONES INICIALES Y CONDICIONES FINALES.

La prueba tiene por objetivos:

- a) Determinar bajo dos condiciones distintas la eficiencia del generador de vapor, el consumo específico de combustible y el régimen térmico bruto de la unidad.
- b) Comparar el efecto que se presenta en la eficiencia del generador de vapor al operar con los parámetros obtenidos con las pruebas realizadas en la presente metodología (temperatura del combustible, presión del vapor de atomización etc), y las condiciones iniciales con que operaba el mismo, así como comparar estas eficiencias con las de diseño.

El cálculo de la eficiencia del generador de vapor se realiza mediante el método de las pérdidas del código A.S.M.E, PTC.4.1(19).

Las pérdidas evaluadas por este método son:

P.G.S. Pérdida por gases secos.

P.h.A. Pérdida por humedad del aire.

P.h.C. Pérdida por humedad del combustible.

P.C.H. Pérdida por combustión del hidrógeno.

P.C.I. Pérdida por combustible inquemado (CO y partículas).

P.R. Pérdida por radiación

P.N.C. Pérdidas no contabilizadas.

La secuencia de cálculo para determinar la eficiencia del generador, el consumo específico de combustible y el régimen térmico bruto de la unidad se anexa en el apéndice 2.

PRUEBAS COMPLEMENTARIAS.

LIMPIEZA Y COMPORTAMIENTO DE QUEMADORES.

Como se mencionó en la prueba preliminar, si el sistema de combustión presenta desbalances, una forma de intentar la corrección de este problema es realizar la prueba de limpieza y comportamiento de quemadores, ya que los desbalances tienen su origen en el comportamiento deficiente (generalmente por suciedad) de uno o más quemadores.

La prueba consiste en apagar sucesivamente cada uno de los quemadores (realizando la limpieza del quemador apagado por medio de vapor) y observar el comportamiento del sistema de combustión en cada caso, hasta obtener el balance del sistema.

La prueba comprende la medición de O_2 , CO y partículas en ambos precalentadores, esperando el tiempo necesario para la estabilización de las mediciones cuando se saca de servicio uno de los quemadores. Además es necesario tener disponibles fichas de atomización para reemplazo, así como la posibilidad de mover las compuertas de aire, variar la presiones de vapor y combustible a la entrada de cada quemador, para modificarlas, hasta que todos los quemadores manejen la misma relación combustible/aire.

Las gráficas que se realizan en esta prueba son: concentración de CO y partículas producidas en función de los quemadores en servicio y fuera de servicio.

DETERMINACIONES COMPLEMENTARIAS

ANALISIS DE COMBUSTIBLE UTILIZADO DURANTE LAS PRUEBAS.

Se toman distintas muestras de combustóleo, correspondientes a los días en que se realizan las pruebas y se determina el contenido de azufre, asfaltenos, viscosidad a diferentes temperaturas y otras características como lo muestra la tabla 2-1.

Los porcentajes de azufre y asfaltenos, determinan en cierto modo la calidad del combustóleo utilizado, Así por ejemplo si el contenido de azufre es mayor al 3% y el de asfaltenos mayor al 10%, estos valores indican que el combustible presenta dificultades en su manejo y quemado.

La tabla 2-1 presenta el formato utilizado para vaciar los datos del análisis del combustible.

COMPOSICION DE PARTICULAS CONTENIDAS EN LOS GASES DE COMBUSTION.

Las partículas son muestreadas isocinéticamente, es decir, succionando los gases a la misma velocidad y temperatura que llevan en el ducto, lo que permite tomar una muestra representativa.

La tabla 2-4 muestra el formato utilizado para vaciar los datos de la composición de partículas contenidas en los gases de combustión (determinados mediante análisis químico). Estos datos permiten conocer la cantidad de carbono residual (sin quemar) que contienen las partículas

en función del exceso de aire de combustión.
ANALISIS DE LAS PRESIONES Y TEMPERATURAS DEL
CIRCUITO AIRE-GASES.

Esta determinación complementaria tiene por objeto conocer las presiones y temperaturas del circuito aire-gases para poder compararlo con los parámetros de diseño de la unidad.

Las mediciones de presiones y temperaturas son utilizadas para la determinación de la eficiencia del generador, consumo específico de combustible y el régimen térmico bruto del generador. Asimismo sirve para la evaluación de los precalentadores de aire regenerativos.

2.2.1 PARAMETROS OPERATIVOS.

Los parámetros operativos de la unidad son tomados de la sala de control de la central (B.T.G).

Los parámetros de operación más importantes para evaluar el comportamiento del sistema de combustión son:

CARGA : MW
CONCENTRACION DE OXIGENO : %
SELECTORA DE EXCESO DE AIRE : %
COMBUSTIBLE A QUEMADORES :

FLUJO : T/h
PRESION : kg/cm²
TEMPERATURA : :C
VAPOR DE ATOMIZACION :
TEMPERATURA : :C
PRESION : kg/cm²
AIRE DE COMBUSTION :
FLUJO : T/h ó %
TEMPERATURA : :C
TEMPERATURA DEL VAPOR A LA
TURBINA :
SOBRECALENTADO : :C
RECALENTADO : :C
PRESION EN EL DOMO : kg/cm²
QUEMADORES :
E/S (en servicio) :
F/S (fuera de servicio) :
V.R.G. (ventilador recirculador de gases) : %
V.T.F. (ventilador de tiro forzado) :
lado A: A y/o %
lado B: A y/o %
ATEMPERACION DEL VAPOR :T/h
BP cajas de aire hogar: mm de H₂O
POSICION DE LAS COMPUERTAS
DE AIRE A QUEMADORES :

2.3. HOJAS PARA VACIADO DE DATOS PARA CALCULOS
DE LAS PRUEBAS.

DEPARTAMENTO DE COMBUSTIBLES FOSILES.
LABORATORIO QUIMICO.
ANALISIS DE COMBUSTOLEO..

TABLA 2-1 FORMATO PARA VACIADO DE DATOS DEL COMBUSTOLEO.

Procedencia de la muestra
Número de muestra
Fecha de muestreo
Agua y sedimento % en volumen
Agua por destilación % en volumen
Asfaltenos en nC_{10} % en peso
Azufre % en peso
Temperatura de inflamación :C
Viscosidad S.S.F. a 50 :C
Viscosidad S.S.F. a 60 :C
Viscosidad S.S.F. a 80 :C
Peso específico a 20/4 :C
:API
Estabilidad térmica
Carbon Conradson % en peso
Tensión superficial Dinas/cm a 60 :C
Cenizas totales % en peso

Análisis elemental (% peso).

C

H

N

O

O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₂		% SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (RTE)	PRESION VAPOR ATOMIZACION kg/cm ²	Tc. °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/Hr	AMPERAJE V.T.F		AGUA DE ATENPERACION T/Hr	AP CAJAS DE AIRE-HOGAR mm. c. H ₂ O	
% vol.		p.p.m.		mg/Nm ³		p.p.m.					E/S	F/S		A	B			
A	B	A	B	A	B	A	B											
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		
9																		
10																		
11																		
12																		
13																		
14																		

54

TABLA 2.2 FORMA PARA VACIADO DE DATOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A GENERADORES DE VAPOR QUE UTILIZAN QUEMADORES TANGENCIALES.

55

O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₃		%SELECTORA DE EXCESO DE AIRE(D.T.G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION	T _c °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE	AMPERAJE V. T. F		AGUA DE ATEMPERACION
% vol		p.p.m.		mg/Nm ³		p.p.m.			Kg/cm ²		ES	F/S	T/Hr	A	B	T/Hr
A	B	A	B	A	B	A	B									
1																
2																
3																
4																
5																
6																
7																
8																
9																
10																
11																
12																
13																
14																

TABLA 2.3 FORMA PARA VACIADO DE DATOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS A GENERADORES DE VAPOR QUE UTILIZAN QUEMADORES FRONTALES.

MUESTRA No.	COMPOSICION		CONDICIONES DE OPERACION	
	% AZUFRE	% CARBONO	% OXIGENO	CANTIDAD mg/No.

TABLA 2.4. COMPOSICION DE PARTICULAS. CONTENIDOS DE AZUFRE Y CARBONO.

ESQUINA	1	2	3	4	PROMEDIO	ANGULOS PROMEDIO
ELEVACION "Nox"						
ELEVACION						
ELEVACION						
ELEVACION						
ELEVACION						
PROMEDIO						
ANGULOS PROMEDIO						

CARGA:

PRE SION DIFERENCIAL:

% O XIGENO:

TABLA 2.5 POSICION DE LAS COMPUERTAS PRINCIPALES Y
AUXILIARES (PRINC-AUX).

ESQUINA		1	2	3	4
ELEVACION	$P_{vot} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				
	$P_{com} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				
ELEVACION	$P_{vot} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				
	$P_{com} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				
ELEVACION	$P_{vot} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				
	$P_{com} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				
ELEVACION	$P_{vot} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				
	$P_{com} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$				

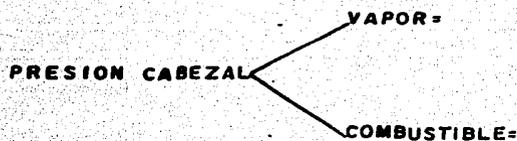


TABLA 2.6 PRESIONES DE VAPOR Y COMBUSTIBLE A QUEMADORES.

PUNTO DE MEDICION				
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (A)				
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (B)				
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (A)				
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (B)				
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (A)				
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (B)				
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (A)				
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (B)				

TABLA 2.7 FORMA PARA VACIADO DE LAS MEDICIONES DE TEMPERATURAS DEL CIRCUITO AIRE-GASES.

CAPITULO 3

SISTEMAS DE MEDICION DE PRODUCTOS DE COMBUSTION.

3.1. TECNICAS PARA LA MEDICION DE PRODUCTOS DE COMBUSTION.

Existen diversas técnicas para la medición de productos de combustión, las más usuales se presentan en la tabla 3.1.

TABLA 3.1. TECNICAS DE MEDICION DE PRODUCTOS DE COMBUSTION.

DIOXIDO DE AZUFRE	MEDICION POR FLUORESCENCIA.
	MEDICION POR INFRARROJO NO DISPERSIVO
	CONDENSACION Y TITULACION VOLUMETRICA
TRIOXIDO DE AZUFRE	ESPECTROMETRIA VISIBLE DE FLUJO CONTINUO POR DESPLAZAMIENTO.
	MEDIDOR DE PUNTO DE ROCIO ACIDO
	METODO EPA 8
OXIGENO	APARATO DE ORSAT
	METODO PARAMAGNETICO
	METODO ELECTROQUIMICO
MONOXIDO Y DIOXIDO DE CARBON	APARATO DE ORSAT
	MEDICION POR INFRARROJO NO DISPERSIVO
PARTICULAS	NEFELOMETRO
	EQUIPO ISOCINETICO PARA MUESTREO DE PARTICULAS.

Se describen a continuación las características más importantes de cada una de ellas.

MEDICION POR FLUORESCENCIA (9).

La medición por fluorescencia es aplicable a la determinación de SO_2 .

El principio de operación está ilustrado en la figura 3.1. Por la cámara de medición y a través de un filtro se hacen pasar pulsaciones de luz ultravioleta; estas pulsaciones excitan a las moléculas de SO_2 . Cuando las moléculas ya excitadas regresan a su estado original, emiten una fluorescencia característica con intensidad linealmente proporcional a la concentración de SO_2 que existe en la muestra. La luz fluorescente emitida pasa a través de un segundo filtro, para después iluminar la superficie sensitiva de un tubo fotomultiplicador. La salida del fotomultiplicador es amplificada electrónicamente para proveer una lectura en el medidor y una señal electrónica analógica para el registro de salida.

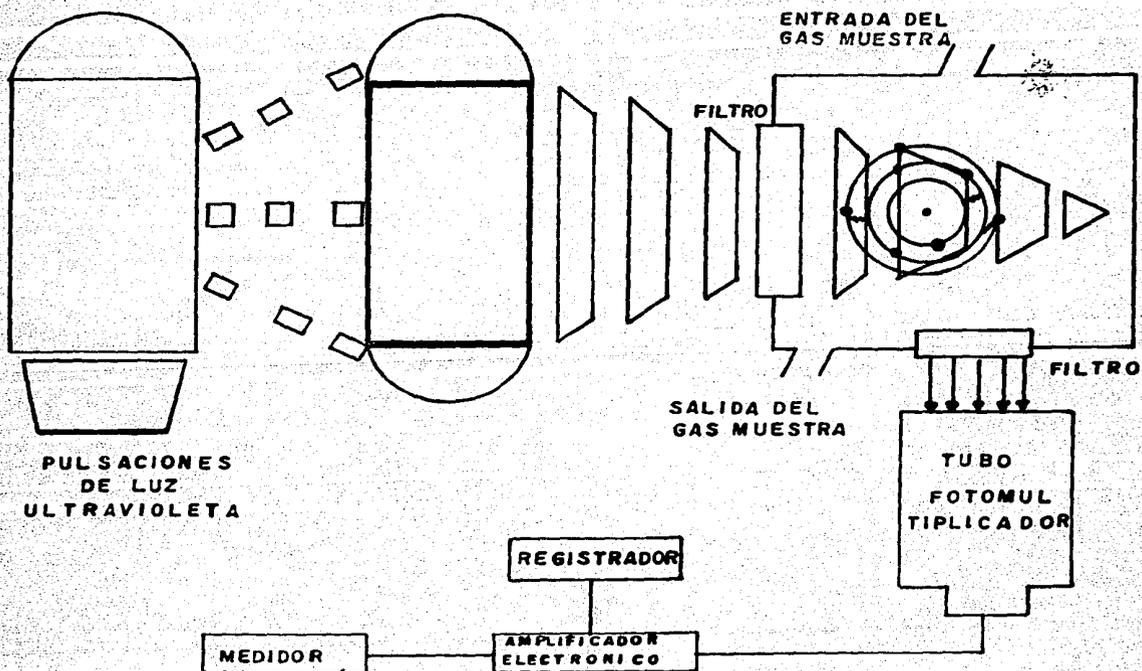


FIGURA 3.1 PRINCIPIO DE OPERACION DEL MEDIDOR POR FLUORESCENCIA.

MEDICION POR INFRARROJO NO DISPERSIVO (10).

PRINCIPIO DE OPERACION.

El principio de operación se basa en la medición diferencial de absorción de la energía infrarroja. Es aplicable a la determinación SO_2 , CO y CO_2 .

La figura 3.2 muestra el diagrama funcional del sistema de detección. Dentro del analizador, dos haces de energía infrarroja son dirigidos a través de dos celdas ópticas, una por donde fluye la muestra y otra que contiene un gas neutro (por ejemplo nitrógeno) y que constituye la celda sellada de referencia.

Durante la operación una porción de la radiación infrarroja es absorbida por el componente de interés en la muestra. Un detector eléctrico, mide continuamente la diferencia entre las cantidades de energía infrarroja absorbida por el componente de interés y la celda de referencia. Esta diferencia es una medida de la concentración del componente de interés. La lectura se realiza en el medidor del panel frontal que tiene una escala de 0-100 mV. Se usa una curva de calibración para convertir las lecturas del medidor a los valores de concentración correspondiente (figura 3.3).

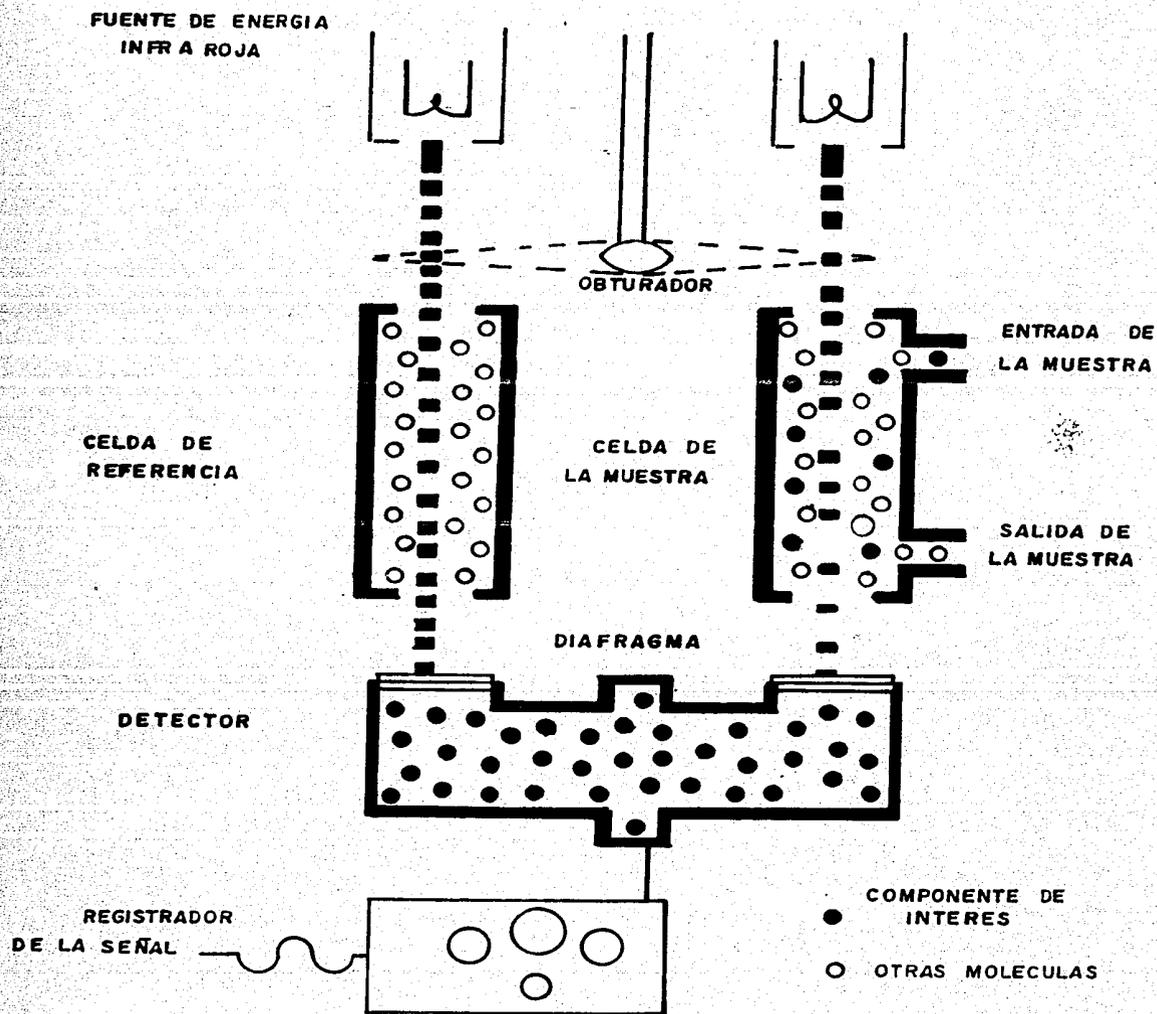


FIGURA 3.2 DIAGRAMA FUNCIONAL DEL SISTEMA DE DETECCION INFRAROJA.

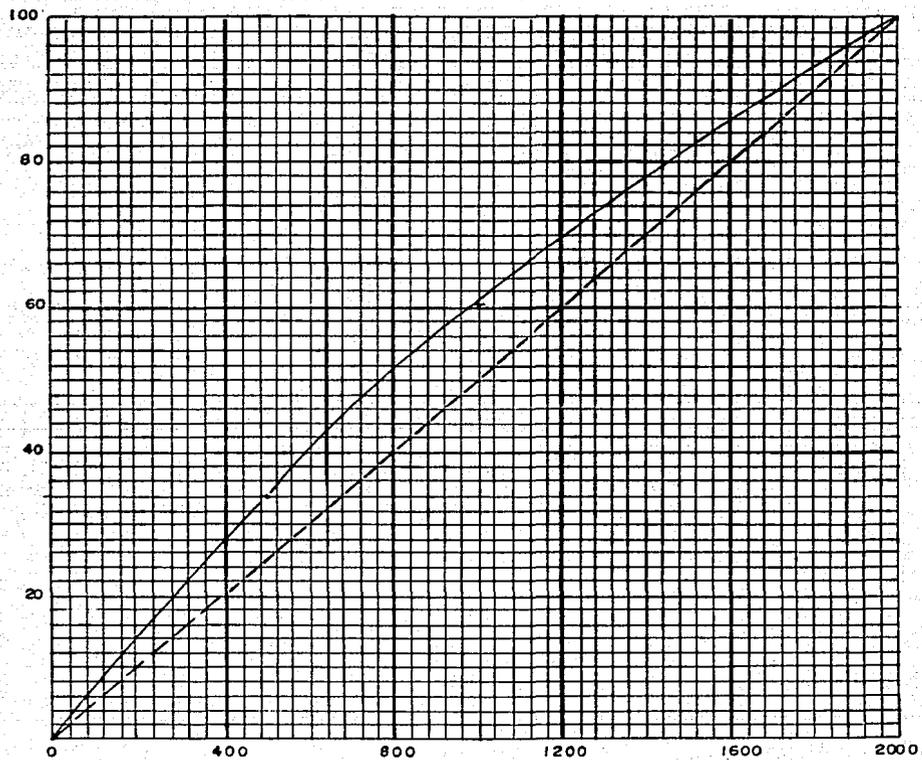


FIGURA 3.3 CURVA DE CALIBRACION PARA EL MEDIDOR DE CO.

MEDICION POR CONDENSACION Y TITULACION VOLUMETRICA (11).

La medición es aplicable para la determinación de SO_3 .

PRINCIPIO DE OPERACION.

El principio de operación consiste en hacer pasar la muestra de gases a través de un condensador de serpentín y coleccionar el condensado al final del período de muestreo. Realizada la labor de condensación y enfriamiento se procede a la titulación volumétrica del condensado por medio de una base (hidróxido de sodio) y un indicador apropiado (fenolftaleína), para determinar así, la cantidad de ácido. Esta cantidad, junto con el volumen de gases extraídos, permite calcular la concentración de SO_3 .

DESCRIPCION DEL EQUIPO

El aparato, mostrado en la figura 3.4, consiste básicamente en: condensador, trampa de humedad, bomba y medidor de gas.

La temperatura del condensador se fija por debajo de la temperatura del punto de rocío del ácido sulfúrico y por ~~extracción de punto de rocío de ácido sulfúrico~~ medio de la

El ácido sulfúrico se condensa en el tubo del condensador y se colecciona al final del período de muestreo. El ácido coleccionado se titula con hidróxido de sodio y un indicador, para determinar su concentración.

Conocida la humedad de los gases de combustión y la

concentración del SO_3 , el punto de rocío puede determinarse con la ayuda de las curvas de Muller o las de Verhoff y Banchemo (12).

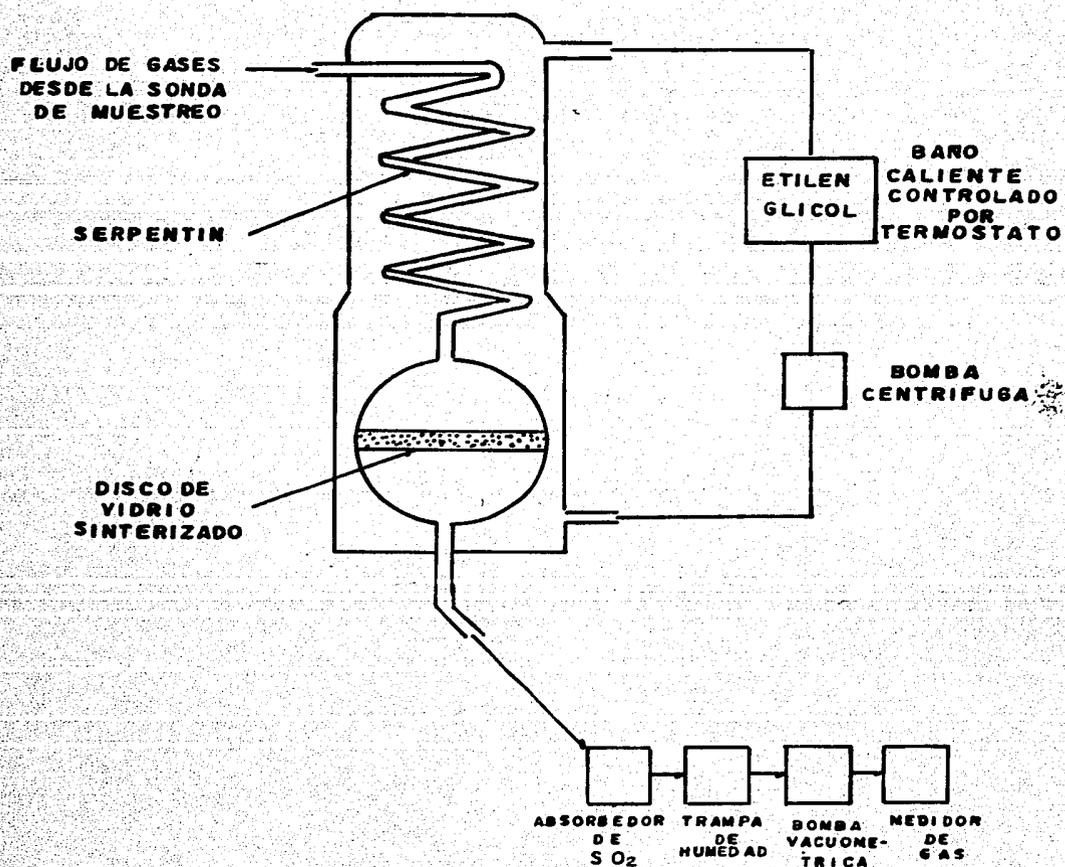


FIGURA 3.4 MEDIDOR POR CONDENSACION Y TITULACION VOLUMETRICA.

MEDICION POR ESPECTROMETRIA VISIBLE DE
FLUJO CONTINUO POR DESPLAZAMIENTO (13).

PRINCIPIO DE OPERACION..

El SO_3 contenido en los gases, es absorbido como iones sulfato (SO_4), por contacto directo con una mezcla de isopropanol/agua ($(\text{CH}_3)_2\text{CHOH}$), con una relación de 4:1. La solución se hace pasar a través de un lecho poroso, el cual contiene cloranilato de bario, produciéndose la siguiente reacción:



Los iones cloranilato ácido liberados absorben luz preferentemente a 535 nanómetros y su concentración es medida directamente usando un fotómetro de flujo continuo.

Dado que la reacción anterior es estequiométrica la concentración de iones cloranilato ácido es directamente proporcional a la concentración de iones sulfato en la solución de isopropanol y por consiguiente a la concentración de SO_3 en el gas.

INSTALACION Y OPERACION.

El analizador consta de tres unidades; sonda de muestreo, unidad analizadora, y un registrador de 0-100 mV (figura 3.5).

SONDA DE MUESTREO.

La sonda está conectada al analizador por un cordón, el cual contiene dos conductos para la solución y un cable de conexión para la energía eléctrica.

El gas entra a la sonda a 0.5 litros/minuto a través de un tubo calentado electricamente a 200°C para prevenir la condensación ácida, antes de que se produzca la absorción. Cualquier sólido presente en la corriente de gases es removido por un filtro de fibra de vidrio antes de que el gas entre en contacto con la solución de isopropanol/agua.

El isopropanol inhibe la oxidación del SO_2 , el cual está invariablemente presente y reduce la solubilidad de los sulfatos de bario, los cuales se forman en las primeras etapas del proceso.

La mezcla de solución y gas es transferida desde la sonda por medio de un ducto hasta el analizador. La temperatura del analizador está controlada para mantener estable la operación del fotómetro y prevenir la condensación del isopropanol.

En el analizador se completa la absorción del SO_3 en el líquido; esta operación se lleva a cabo por el paso de la

mezcla de solución y gas a través de un diafragma de vidrio sinterizado de porosidad fina.

La solución líquida pasa a través de un lecho de reacción, el cual contiene cloranilato de bario. Los sulfatos son retenidos en el lecho como sulfatos de bario, mientras que la solución de iones de cloranilato ácido (proporcionales a la concentración de SO_3 en el gas), fluyen continuamente a través de la celda del fotómetro, el cual mide su absorbancia a 535 nm. Dicha absorbancia, transformada electrónicamente en una señal de voltaje, varía casi exponencialmente con la concentración de SO_3 .

La calibración del instrumento se realiza mediante soluciones de ácido sulfúrico de concentración conocida en isopropanol acuoso.

La sonda de muestreo y el propio analizador se mantienen a temperatura constante para evitar interferencias debidas a variaciones de la misma.

El rango de la escala estandar es de 0-100 p.p.m. por volumen, pero puede ser ampliada para dar una escala de lectura entre 20 y 200 p.p.m.

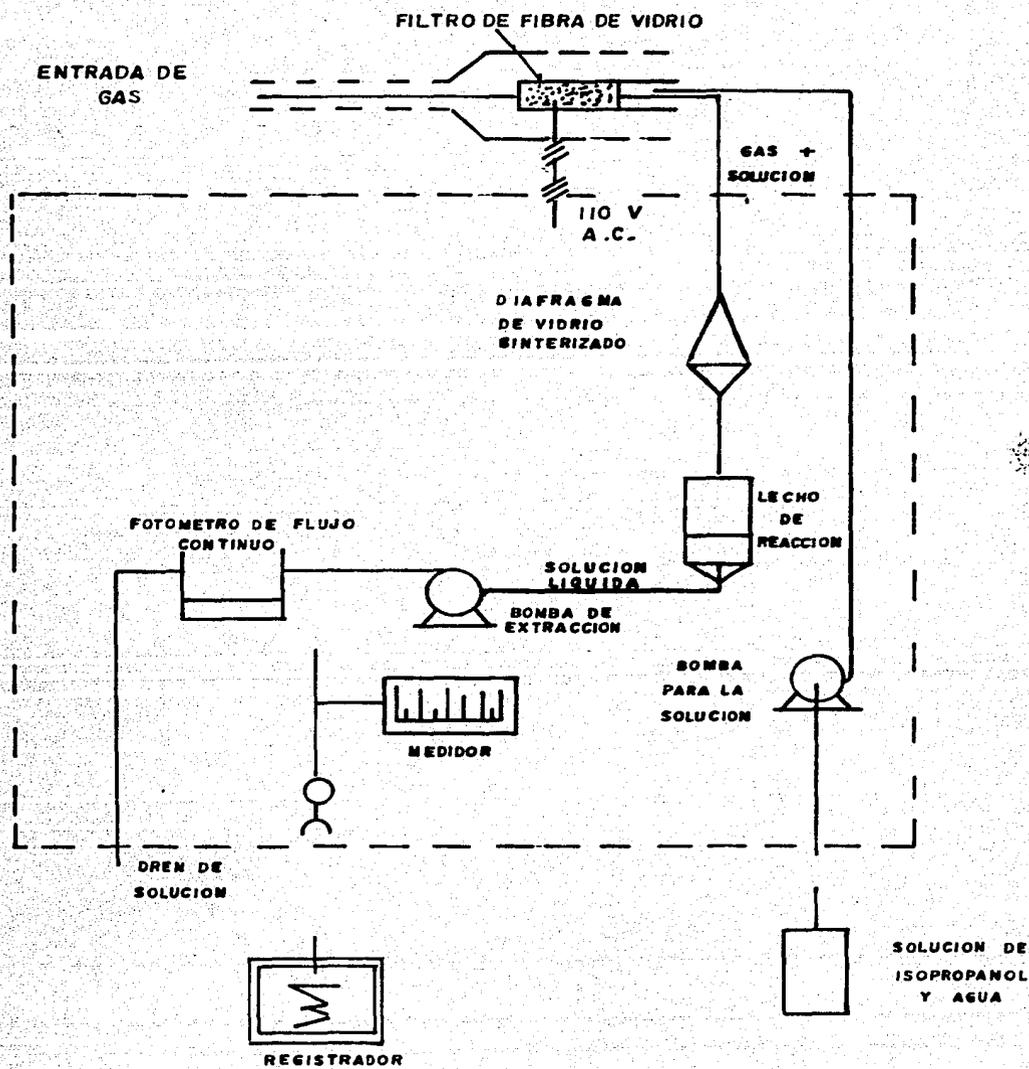


FIGURA 3.5 DIAGRAMA DE OPERACION DEL MEDIDOR POR ESPECTROMETRIA VISIBLE.

MEDIDOR DE PUNTO DE ROCIO ACIDO (14).

PRINCIPIO DE OPERACION..

El medidor de punto de rocío aprovecha la propiedad del ácido sulfúrico de ser conductor de electricidad.

El ácido sulfúrico es condensado a una temperatura que está por debajo de su temperatura de rocío, formando una película fina en la superficie de detección. Dado que esta película es un buen conductor de electricidad provoca un flujo de corriente a través de los electrodos. La corriente es medida continuamente en el galvanómetro del aparato.

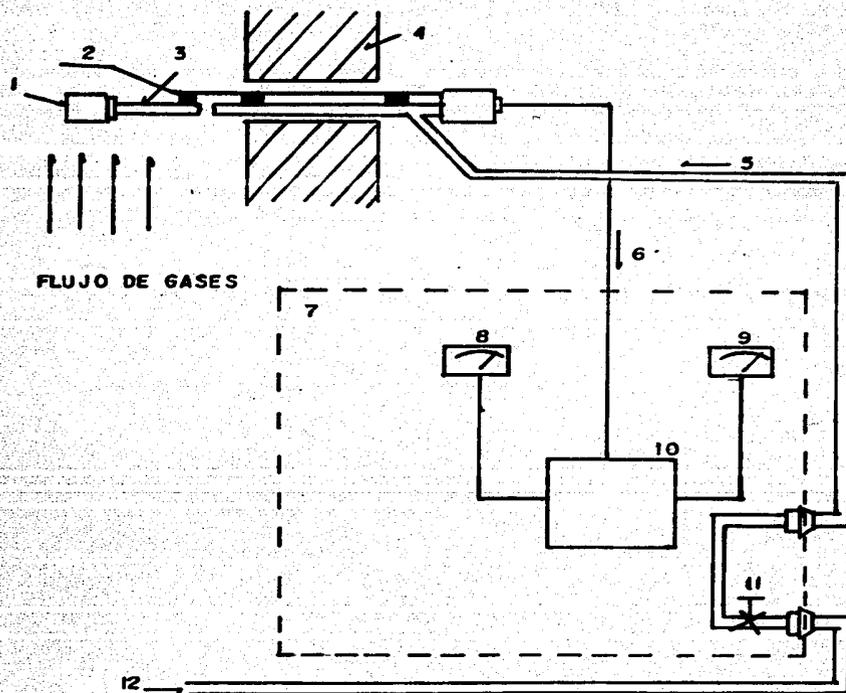
DESCRIPCION DEL EQUIPO.

El equipo de medición esta constituido por la sonda de muestreo y la unidad de control, (figura 3.6).

La sonda de muestreo, que se introduce en el flujo de gases, contiene el detector de punto de rocío, un termopar y un par de electrodos dentro de la superficie de detección; esta superficie de detección es enfriada por la unidad de suministro de aire, la cual está regulada por una válvula desde la parte posterior de la unidad de control.

Cuando el flujo de corriente a través de los electrodos permanece constante (lo que se logra por medio de la válvula de regulación de aire), la razón entre condensación y evaporación del ácido es constante. La temperatura a la cual ocurre este fenómeno es, por definición, la temperatura del punto de rocío.

La temperatura se mide continuamente por medio del termopar y se envia al medidor que esta localizado en la unidad de control.



1. DETECTOR DE PUNTO DE ROCIO
2. TERMOPAR EXTERNO
3. SONDA
4. PARED DE LA CALDERA
5. SUMINISTRO DE AIRE FRIJO
6. SEÑALES DEL ELECTRODO Y TERMOPAR

7. UNIDAD DE CONTROL
8. MEDIDOR DE CORRIENTE
9. DETECTOR/MEDIDOR DE LA TEMPERATURA DE LOS GASES
10. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL
11. VALVULA DE REGULACION DE AIRE
12. SUMINISTRO DE AIRE SECO

FIGURA 3.6 DIAGRAMA DEL MEDIDOR DE PUNTO DE ROCIO ACIDO.

En el método EPA 8, la muestra de gases pasa a través de una sonda y un filtro hasta el interior del equipo. La sonda se calienta para prevenir cualquier condensación prematura dentro del tren de muestreo, (figura 3.7).

La muestra de gases pasa a través de una solución 4:1 de isopropanol y agua, la que absorbe el SO_3 contenido en la muestra. Posteriormente pasa por una solución de peróxido de hidrógeno y agua, donde el SO_2 es oxidado hasta ácido sulfúrico. La cantidad de sulfatos presentes en ambas soluciones se determina por titulación volumétrica usando una solución valorada de bario y torino como indicador. Estas cantidades junto con el volumen de gases muestreado (medido en el medidor volumétrico) permite conocer las concentraciones de SO_2 y SO_3 en los gases de combustión.

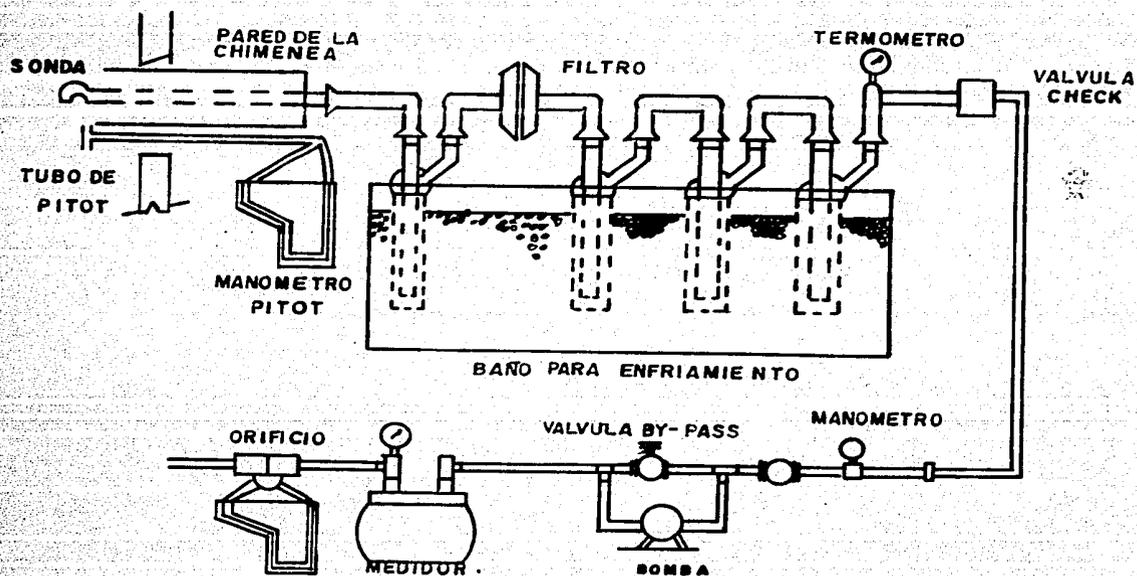
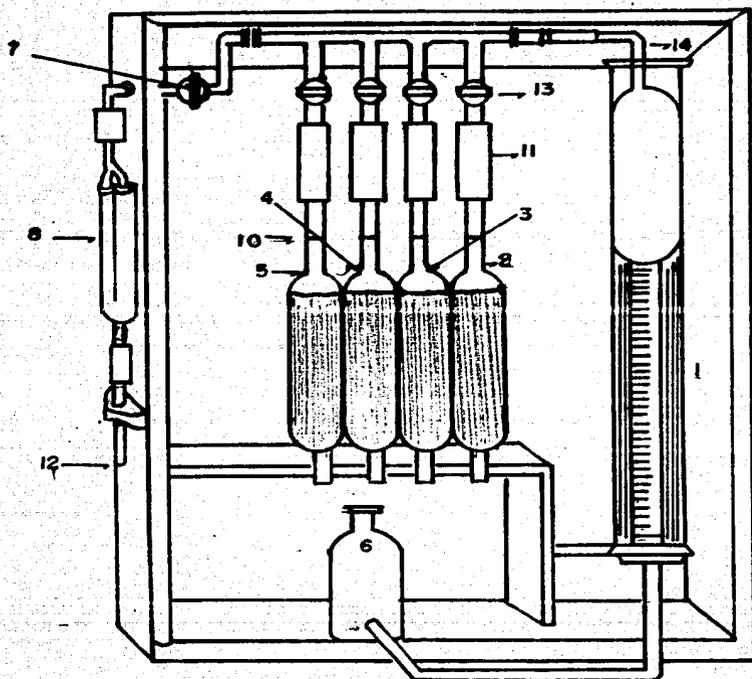


FIGURA 3.7 EQUIPO PARA EL METODO E.P.A. 3.

MEDICION DE OXIGENO, MONOXIDO DE CARBONO Y DIOXIDO
DE CARBONO POR MEDIO DELAPARATO DE ORSAT (15).

PRINCIPIO DE OPERACION

La figura 3.8 muestra un aparato de Orsat típico. El principio de operación se basa en hacer burbujear un volumen conocido de muestra en una solución capaz de absorber selectivamente el componente que se desea cuantificar; por diferencia de volumen (antes y después del burbujeo) se conoce la cantidad absorbida. Para determinar el contenido de O_2 se utiliza una solución alcalina de ácido pirogálico; el contenido dióxido de carbono se determina por medio de una solución de hidróxido de potasio (Potasa cáustica) y el contenido de monóxido de carbono por medio de cloruro cuproso amoniacal.



- | | | | |
|------|-----------------------------|-----|---------------------|
| 1. | BURETA DE MEDIDA | 10. | MARCA DE NIVELACION |
| 2. | PIPETA CON POTASA CAUSTICA | 11. | TUBO DE MULE |
| 3. | PIPETA CON ACIDO PIROGALICO | 12. | ENTRADA DE GASES |
| 4,5. | PIPETA CON COBRE METALICO | 13. | VALVULAS DE PASO |
| 6. | FRASCO NIVELADOR | 14. | TUBO DE CONDUCCION |
| 7. | VALVULA | | |
| 8. | FILTRO | | |
| 9. | LLAVES DE CONEXION | | |

FIGURA 3.8 APARATO DE ORSAT.

MEDICION POR PARAMAGNETISMO (16).

La medición por paramagnetismo se utiliza para la determinación continua de las concentraciones de oxígeno.

PRINCIPIO DE OPERACION.

Debido a que las moléculas de oxígeno contienen un par de electrones libres en su última órbita, tienen la capacidad de ser temporalmente magnetizadas cuando se ubican dentro de un campo magnético.

El principio de operación del analizador paramagnético es el siguiente: un par de esferas de vidrio llenas de nitrógeno son montadas en los extremos de una barra de aluminio-níquel, formando el cuerpo de prueba. El cuerpo de prueba va montado horizontalmente sobre una suspensión vertical de torsión. El cuerpo de prueba se coloca en un campo magnético no uniforme, por el que se hace pasar la muestra de gas. Las esferas se ven entonces sometidas a fuerzas de desplazamiento que provocan un par de torsión proporcional a la susceptibilidad magnética del volumen de gas en los alrededores del campo de prueba (figura 3.9).

FORMA DE MEDICION.

La susceptibilidad magnética del flujo de gas analizado se mide utilizando un detector magnético de la siguiente manera:

En el centro del cuerpo de prueba hay un pequeño espejo de cuarzo, sobre el cual se enfoca un haz de luz que se refleja

sobre una fotocelda . La señal producida por la fotocelda se aplica a la entrada de un circuito amplificador, el cual provee la corriente restauradora a través de un alambre conductor, unido longitudinalmente alrededor de las esferas.

Adicionalmente la señal de salida del amplificador se envía al medidor y al registrador.

La corriente restauradora da origen a una fuerza electromagnética, la cual provoca el par restaurador. Este par es igual pero de sentido contrario al par de desplazamiento en las esferas, provocado por el campo magnético no uniforme.

La corriente requerida para restaurar el cuerpo de prueba a la posición cero (inicial), es directamente proporcional al par de desplazamiento original y este es una función lineal de la susceptibilidad magnética del volumen de gas muestreado, la cual a su vez es proporcional a la concentración de O_2 del gas analizado.

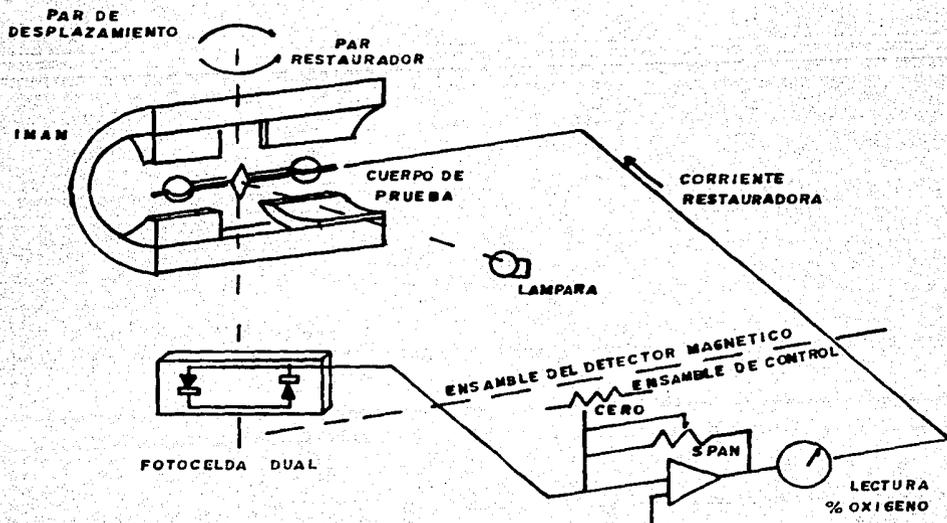
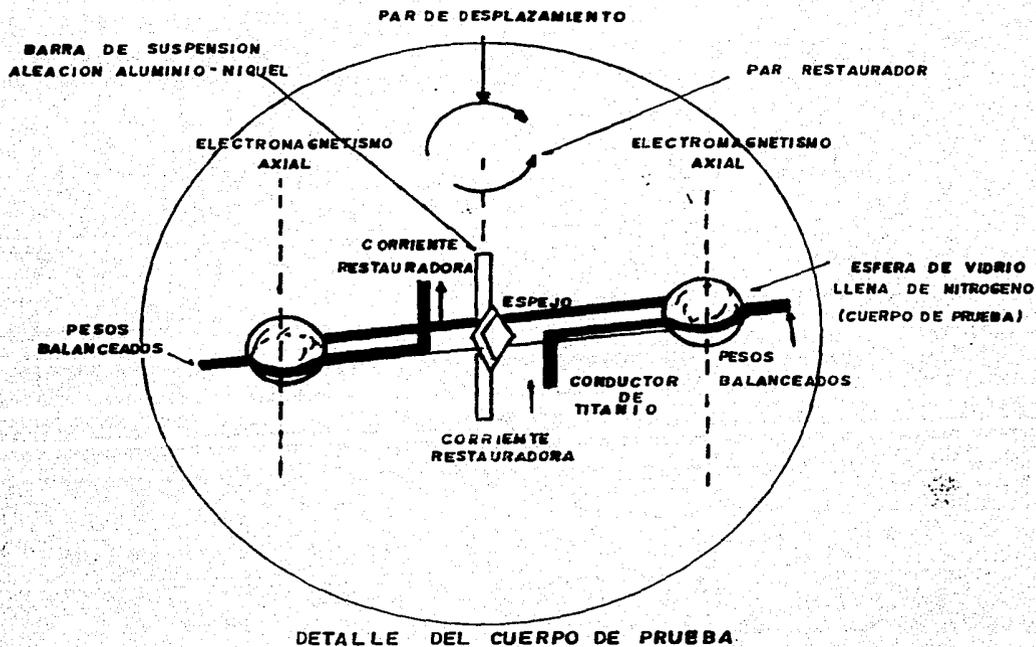


FIGURA 3.9 DIAGRAMA FUNCIONAL DEL SISTEMA PARAMAGNETICO PARA MEDICION DE OXIGENO.

MEDICION DE OXIGENO POR EL METODO ELECTROQUIMICO (17).

PRINCIPIO DE OPERACION.

La medición de oxígeno por éste metodo se realiza usando una celda electrolítica.

Un tipo común de celda es aquella en la cual la difusión del oxígeno a través de una membrana de teflón produce un flujo de corriente eléctrica entre dos electrodos separados por un electrolito líquido o gelatinoso.

Aplicando la ley de Faraday a la celda, resulta la relación:

$$I = 0.363 \ C \ F \ P \ (298/T)$$

Donde: I es la corriente producida en microamperios cuando una muestra gaseosa que contiene C partes por millón de oxígeno en volumen, pasa a través de una celda con un flujo F (cm³/minuto) medidos a P (atmósferas) y T (:K).

Esta expresión asume que pueden aplicarse las leyes de los gases perfectos. Así por ejemplo: un flujo de muestra de 100 cm³/minuto a 1 atmósfera de presión y 298:K da la sensibilidad teorica, que es de 26.3 microamperios/p.p.m.

El analizador electroquímico usa una celda galvánica de alta temperatura. Consiste en un electrolito de óxido de zirconio estabilizado con calcio y con electrodos porosos de platino.

A la temperatura de operación, las moléculas de oxígeno en el lado de la celda de alta presión de oxígeno (ánodo) ganan

electrones y simultaneamente en el otro electrodo (cátodo) se forman moléculas de oxígeno por una acción inversa (figura 3.10).

La medición de la corriente I que circula por la celda permite conocer la concentración de oxígeno en el gas que se analiza.

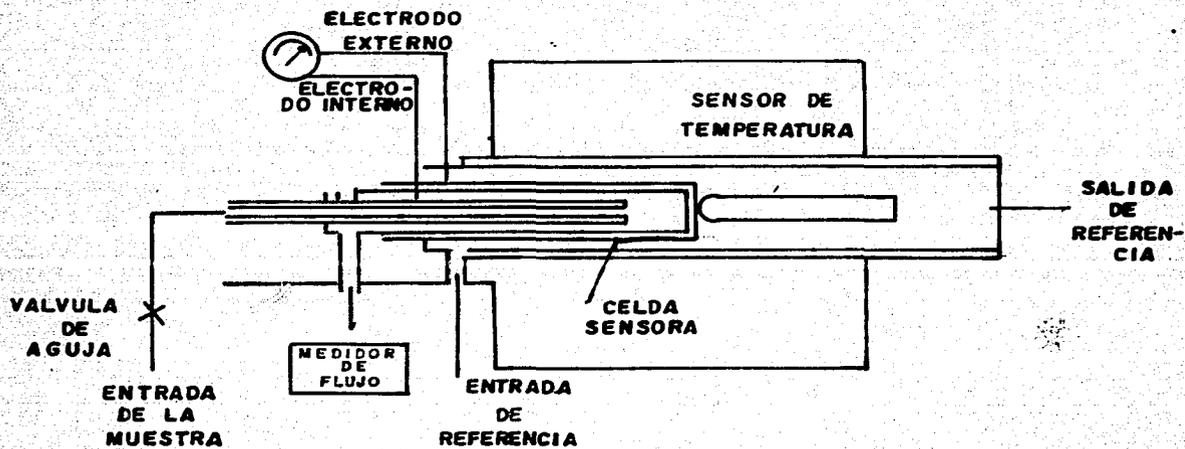


DIAGRAMA DE LA SONDA DE TIPO ELECTROQUIMICO

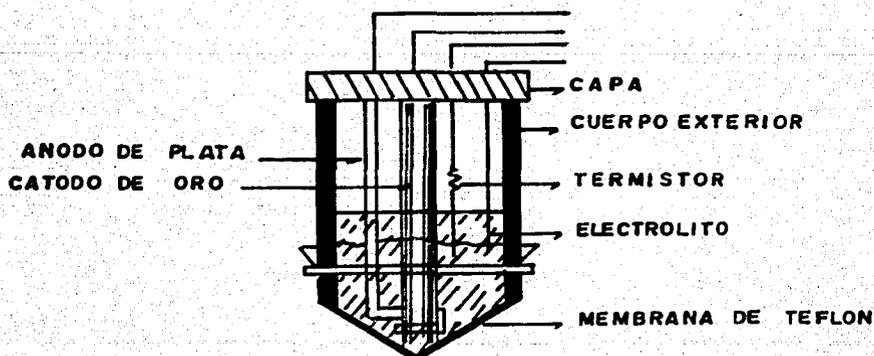


FIGURA 3.10 DIAGRAMA DE LA CELDA ELECTROQUIMICA ACUOSA.

MEDICION DE PARTICULAS CON EL NEFELOMETRO.

PRINCIPIO DE OPERACION.

El nefelómetro es un instrumento de monitoreo continuo, que mide el coeficiente de dispersión de la luz causado por la suspensión de partículas en un gas, relacionando la medida de visibilidad con el nivel de concentración de partículas. Sus principales componentes son: un ensamble óptico, una unidad de ventilación con filtro y la unidad de control electrónico (figura 3.11).

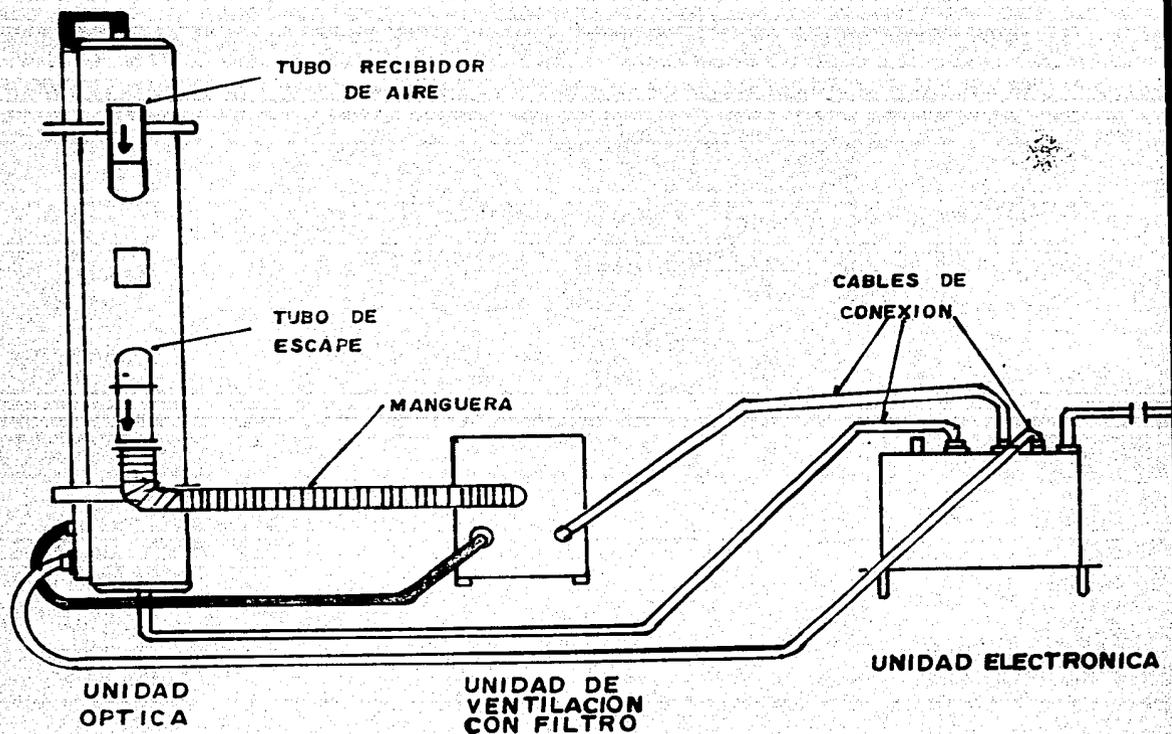


FIGURA 3.II ENSAMBLE DEL NEFELOMETRO PARA OPERACION.

EQUIPO PARA MUESTREO ISOCINETICO DE PARTICULAS (18).

Para la correcta determinación de la cantidad (y calidad) de las partículas suspendidas en los gases de combustión, el muestreo de las mismas debe realizarse en forma isocinética, esto es, succionando gases con la misma velocidad con que éstos se mueven en el ducto que los contiene. O sea:

$$V_{\text{gases en ducto}} = V_{\text{gases sonda}}$$

Si la velocidad de succión es mayor que la del ducto, se tendrá una absorción preferencial de partículas pequeñas; si por el contrario, la velocidad de succión es menor que la velocidad en el ducto, se tendrá una mayor concentración de partículas grandes; en ambos casos no se obtiene la muestra representativa que se desea.

El equipo de medición (figura 3.12), está constituido por: sonda de muestreo, manguera metálica de conexión, equipo colector y unidad de control.

SONDA DE MUESTREO.

La sonda de muestreo que se introduce en el ducto de gases, contiene en su interior un venturi para proporcionar una presión diferencial que determina la velocidad de la muestra y en su exterior un tubo Pitot para determinar la velocidad de los gases en el ducto. El isocinetismo se logra ajustando la velocidad de los gases en la sonda hasta que sea igual a la que éstos poseen en el ducto mediante un extractor de velocidad variable.

MANGUERA METALICA DE CONEXION.

Es una manguera flexible construida en acero inoxidable con una resistencia eléctrica en toda su longitud para su calentamiento, y se encuentra aislada con tela de asbesto para evitar condensación en su interior; esta manguera lleva la corriente de gases de combustión de la sonda al equipo colector.

EQUIPO COLECTOR.

El equipo está compuesto por un soplador extractor de gases y un filtro gravimétrico que retiene partículas desde 5 micras. El extractor hace pasar la corriente gaseosa a través de la sonda, la manguera y el filtro, hasta ser expulsada al ambiente o retornada al ducto. El filtro gravimétrico está compuesto por un cartucho de filtrado de aluminio, un medio filtrante de fibra de vidrio y un contenedor de cartucho de aluminio con resistencia.

UNIDAD DE CONTROL.

El control esta integrado por dos micromanómetros para medir la presión diferencial del venturi y del Pitot y un control de velocidad del motor extractor para mantener las condiciones isocinéticas durante el muestreo.

Una vez realizada la extracción, la concentración de partículas se calcula por medio de las siguientes expresiones:

Partículas= $P_{\text{muestra}} - P_{\text{limpio}} / V_0$ (mg/m³)

V_0 se calcula con:

$V_0 = (V_m)(P_1 \times T_0 / P_0 \times T_1) \times f$ (m³N)

Donde:

P_{muestra} = Peso del filtro de la muestra tomada (mg)

P_{limpio} = Peso del filtro limpio (mg)

V_0 = Volumen de gases (m³N)

V_m = Volumen medido en el equipo isocinético (m³)

P_1 = Presión atmosférica del lugar (mm Hg)

P_0 = Presión atmosférica a nivel del mar (mm Hg)

T_0 = Temperatura de referencia cero (273:K)

T_1 = Temperatura de los gases (:k)

f = factor de corrección del medidor de volumen de gases
del equipo isocinético.

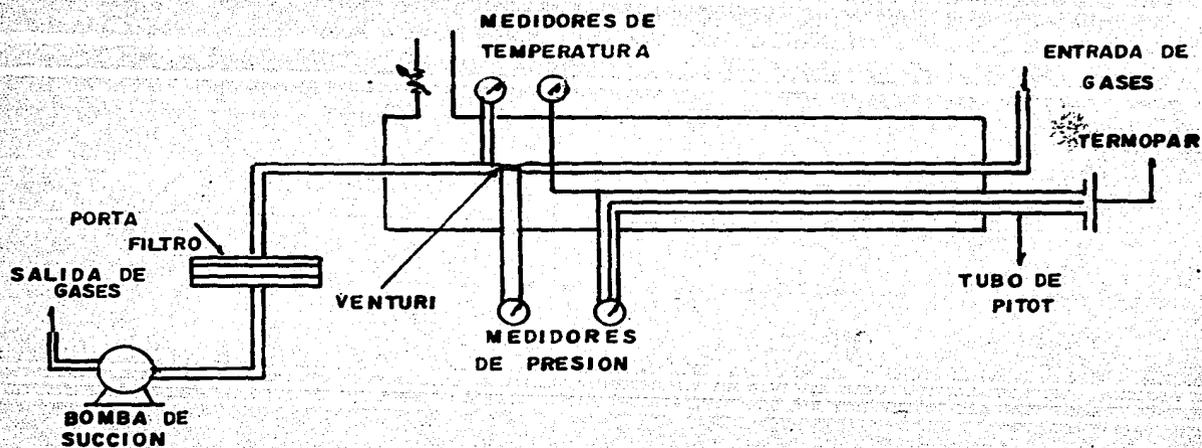


FIGURA 3.12 ANALIZADOR DE PARTICULAS

3.1.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TECNICAS DE MEDICION.

A continuación se presentan algunas de las ventajas y desventajas de las técnicas de medición de productos de combustión descritas.

TECNICA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Medición por Fluorescencia. Analizador de SO ₂	Respuesta rápida y continua. No presenta interferencias de otros compuestos.	Solo maneja rangos pequeños, menores a 500 p.p.m.
Medición por Infrarrojo no Dispersivo. Analizadores de CO, CO ₂ y SO ₂ .	Determinación continua del componente de interes en una mezcla. No presenta interferencias, opera en el rango de 0-10000 p.p.m.	Requiere de un sistema de filtrado y acondicionamiento de los gases a analizar.
Medición por Condensación y Titulación Volumétrica.	Preciso y simple	Forma indirecta de determinación, se realiza en forma puntual.
Medición por Espectrometría visible de flujo continuo por desplazamiento. Analizador de SO ₃ .	Determinación continua del componente de interes en una muestra, no presenta interferencias, alta presición y alta sensibilidad.	Requiere de operación cuidadosa por personal calificado.
Medidor de punto de rocío ácido	Determinación continua, no presenta interferencias.	El punto de rócío detectado depende de la humedad de los gases de combustión
Metodo E.P.A.8	Muy preciso. Reconocido por la E.P.A.	Método indirecto, la determinación es puntual.
Aparato de Orsat Medición de CO, CO ₂ y O ₂	De fácil manejo	Método indirecto, la determinación es puntual. Muy impreciso para CO.
Medición por Paramagnétismo. Analizador de O ₂ .	Medición continua de O ₂ contenido en la muestra, no presenta interferencias.	Requiere de acondicionamiento de muestra.

EQUIPO**VENTAJAS****DESVENTAJAS**

Medición de O_2 por el método Electroquímico.

Medición continua de respuesta rápida, no presenta interferencias.

Presenta problemas de ensuciamiento y desgaste cuando la celda se encuentra dentro del flujo de gases o expuesta al medio ambiente.

Medición de Partículas con el Nefelómetro.

Medición continua.

Medición de Partículas pequeñas. Solo para mediciones al medio ambiente.

Equipo Isocinético para muestreo de Partículas.

Se toma una muestra representativa tanto de la cantidad como de la calidad de las partículas.

Medición Puntual.

3.2. EQUIPOS DE MEDICION UTILIZADOS EN LA METODOLOGIA.

En esta metodología los equipos de medición seleccionados para la determinación de la concentración de las diversas especies en los gases de combustión son:

3.2.1. Equipo para muestreo isocinético de partículas.

Marca Omni-Wave modelo 207. La medición se realizó en forma gravimétrica. Utiliza un medidor de gases secos de $f=0.80$.

3.2.2. Analizador de Monóxido de Carbono.

Basado en la medición por infrarrojo no dispersivo. Es un analizador marca Beckman modelo 865 con rangos de operación de 0-1000 o 0-5000 p.p.m. y precisión de 1% de la escala total.

3.2.3. Analizador de trióxido de azufre.

El analizador hace mediciones continuas por medio de espectrometría visible. El instrumento usado es Severn Science. El rango de operación es 0-100 p.p.m. y tiene una precisión $\pm 10\%$ del valor medido.

3.2.4. Analizador de O_2 .

El análisis de O_2 se realiza con un instrumento Beckman modelo 753, el cual se basa en la técnica paramagnética. La precisión es de 0.05% y maneja rangos de operación de 0-1%, 0-2.5%, 0-5% y 0-10% de O_2 (en volumen).

Las mediciones de temperatura se realizan con termopares forrados de acero inoxidable del tipo chromel-alumel.

3.3. SITIOS DE MEDICION.

Los requisitos que debe cumplir un sitio de medición son los que establece el código A.S.M.E. P.T.C. 4.1 (19), esto es:

1. El flujo de gases debe tener una dirección conocida.
2. El área transversal (la cual puede ser circular o rectangular), se divide en un número de áreas iguales.
3. El punto de medición está localizado dentro de cada una de estas áreas.

El sitio de medición estará localizado al menos ocho veces el diámetro de la chimenea aguas abajo y dos veces el diámetro aguas arriba de cualquier elemento modificador de flujo, como puede ser: codo, expansión o contracción de la chimenea etcetera.

Una forma alternativa para localizar el sitio de medición es al menos dos veces el diámetro de la chimenea aguas abajo y la mitad del diámetro aguas arriba para cualquier elemento modificador de flujo.

Para las chimeneas de sección rectangular, el diámetro equivalente (D_e) para determinar las distancias de aguas arriba y aguas abajo será calculado con la siguiente fórmula:

$$D_e = 2 L \times W / (L + W)$$

Donde:

L= Longitud de la chimenea.

W= Ancho de la chimenea.

Cuando el criterio de ocho y dos diámetros no se puede aplicar el mínimo número de puntos es:

1. Doce puntos para chimeneas circulares o rectangulares con diámetro o diámetro equivalente mayor a 0.61 m.
2. Ocho puntos para chimenea circular con diámetro entre 0.3 y 0.61 m (12-24 pulgadas).
3. Nueve puntos para chimenea con diámetro equivalente entre 0.30 y 0.61 m.

LOCALIZACION DE PUNTOS TRANSVERSALES EN CHIMENEAS CIRCULARES Y RECTANGULARES.

CHIMENEAS CIRCULARES.

Los puntos transversales se localizan en dos diámetros perpendiculares de acuerdo con la tabla 3.2, y como se ejemplifica en la figura 3.13.

CHIMENEAS RECTANGULARES.

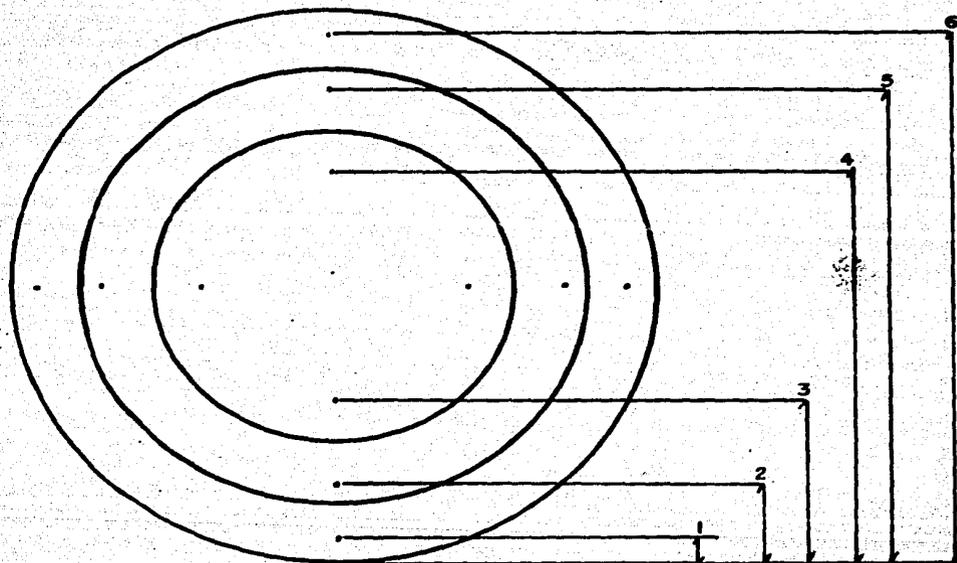
Determinado el número de puntos transversales se forma una configuración de rejilla de acuerdo con la tabla 3.3.

Se divide la sección transversal en áreas rectangulares como puntos transversales se tengan y se localiza en cada punto

transversal el centroide de cada área, como se muestra en la figura 3.14.

NUMERO DE PUNTOS TRANSVERSALES EN EL DIAMETRO	NUMERO DE PUNTOS TRANSVERSALES SOBRE EL DIAMETRO											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	14.6	6.7	4.4	3.2	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.3	1.1	1.1
2	85.4	25.0	14.6	10.5	8.2	6.7	5.7	4.9	4.4	3.9	3.5	3.2
3		75.0	29.6	19.4	14.6	11.8	9.9	8.5	7.5	6.7	6.0	5.5
4		93.3	70.4	32.3	22.6	17.7	14.6	12.5	10.9	9.7	8.7	7.9
5			85.4	67.7	34.2	25.0	20.1	16.9	14.6	12.9	11.6	10.5
6			95.6	80.6	65.8	35.6	26.9	22.0	18.8	16.5	14.6	13.2
7				89.5	77.4	64.4	36.6	28.3	23.6	20.4	18.0	16.1
8				96.8	85.4	75.0	63.4	37.5	29.6	25.0	21.8	19.4
9					91.8	82.3	73.1	62.5	38.2	30.6	26.2	23.0
10					97.4	88.2	79.9	71.7	61.8	38.8	31.5	27.2
11						93.3	85.4	78.0	70.4	61.2	39.3	32.3
12						97.9	90.1	83.4	76.4	69.4	60.7	39.8
13							94.3	87.5	81.2	75.0	68.5	60.2
14							98.2	91.5	85.4	79.6	73.8	67.7
15								95.1	89.1	83.5	78.2	72.8
16								98.4	92.5	87.1	82.0	77.0
17									95.6	90.3	85.4	80.6
18									98.6	93.3	88.4	83.9
19										96.1	91.3	86.8
20										98.7	94.0	89.5
21											96.5	92.1
22											98.9	94.5
23												96.8
24												98.9

TABLA 3.2 LOCALIZACION DE PUNTOS TRANSVERSALES EN CHIMENEAS CIRCULARES.
(PORCENTAJE DEL DIAMETRO DE LA CHIMENEA DESDE EL INTERIOR DE LA PARED HASTA
EL PUNTO TRANSVERSAL).



<u>PUNTO</u> <u>TRANSVERSAL</u>
1
2
3
4
5
6

<u>DISTANCIA EN</u> <u>% DIAMETRO</u>
4.4
14.7
29.5
70.5
85.3
95.6

FIGURA 3.13 EJEMPLO QUE ILUSTRAS UNA SECCION TRANSVERSAL DE UNA CHIMENEA CIRCULAR DIVIDIDA EN 12 AREAS IGUALES, CON LA LOCALIZACION E INDICACION DE SUS PUNTOS TRANSVERSALES.

NUMERO DE PUNTOS TRANVERSALES	MATRIZ FORMADA
9	3 x 3
12	4 x 3
16	4 x 4
20	5 x 4
25	5 x 5
30	6 x 5
36	6 x 6
42	7 x 6
49	7 x 7

TABLA 3.3 MATRIZ FORMADA EN LA SECCION TRANSVERSAL DE CHIMENEAS RECTANGULARES.

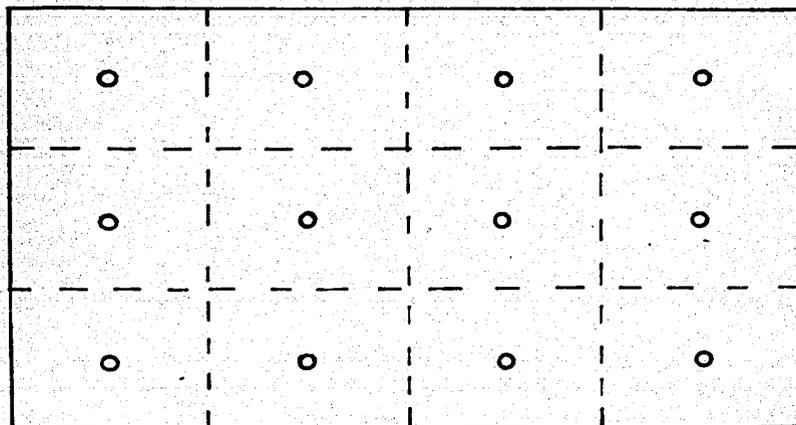


FIGURA 3.14 EJEMPLO QUE ILUSTR A UNA SECCION TRANSVERSAL DE CHIMENEA RECTANGULAR DIVIDIDA EN 12 AREAS IGUALES CON LOS PUNTOS TRANVERSALES LOCALIZADOS EN EL CENTRO DE CADA AREA.

LOCALIZACION DE LOS SITIOS DE MEDICION DONDE
SE APLICA LA METODOLOGIA.

Los sitios de medición donde se realiza el muestreo son:

1. Entrada de gases al precalentador de aire.
2. Salida de los gases del precalentador de aire.
3. Chimenea.

La figura 3.15 y la tabla 3.4 muestra los sitios de medición y los parámetros que se miden en cada sitio respectivamente.

Por diversas razones muchos generadores de vapor no poseen todos los puertos de toma de muestra requeridos para la aplicación estricta de las especificaciones dictadas por la norma A.S.M.E. para todas las especies que se analizan. En estos casos se ha encontrado que se obtienen resultados bastante representativos si se posicionan las sondas en puntos que representen aproximadamente la composición media de los gases de combustión.

Estos puntos se determinan realizando un mapeo tipo A.S.M.E. de dos componentes: O_2 y CO.

Se considera entonces que aquellos puntos que poseen concentraciones de O_2 y CO cercanas al promedio, también serán representativos de las concentraciones medias del resto de los componentes de los gases de combustión, siempre y cuando la carga de la unidad permanezca constante.

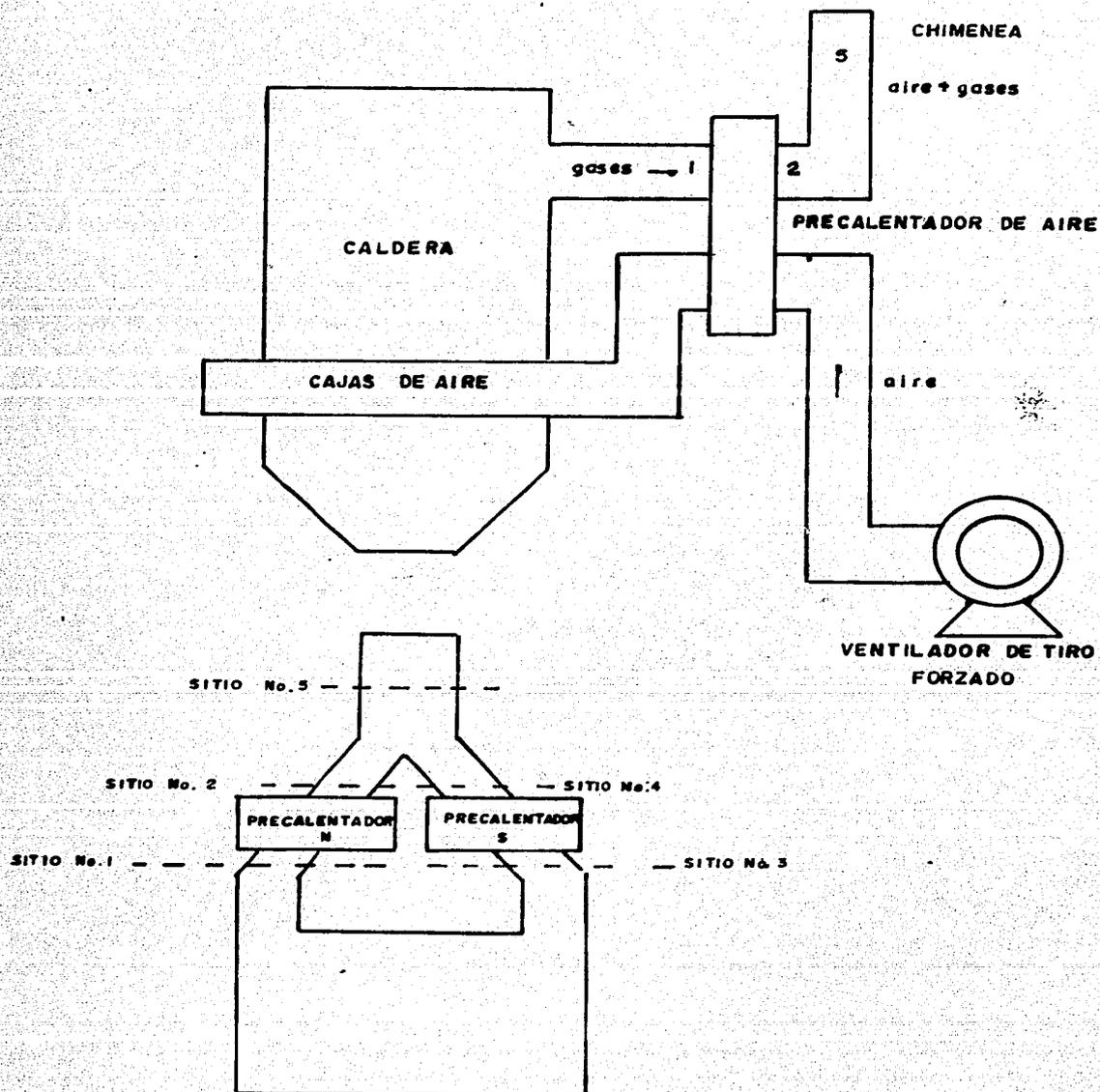


FIGURA 3.15

LOCALIZACION DE LOS SITIOS DE MEDICION.

ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (M)	SALIDA DE LOS GASES DEL PRECALENTADOR (A)	ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (S)	SALIDA DE LOS GASES DEL PRECALENTADOR (S)	CHIMENE A
CO	CO	CO	CO	CO
SO ₃	SO ₃	SO ₃	SO ₃	SO ₃
O ₂	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂
PARTICULAS		PARTICULAS		
TEMPERATURA	TEMPERATURA	TEMPERATURA	TEMPERATURA	TEMPERATURA
PRESION	PRESION	PRESION	PRESION	PRESION

TABLA 3.4 PARAMETROS MEDIDOS EN CADA SITIO DE MEDICION.

3.4. INSTALACION DEL EQUIPO DE MEDICION PARA LA REALIZACION DE LAS PRUEBAS.

El equipo de medición consta de los analizadores ya mencionados para la medición de productos de combustión, una bomba de succión, un condensador, un filtro, las sondas de muestreo, y un sistema de medición de flujo (figura 3.16)..

Bomba de succión. Es la encargada de suministrar el flujo continuo de gases de combustión a través del sistema de medición de flujo.

Filtro. Relleno con fibra de vidrio y un medio deshidratante (cloruro de calcio), se utiliza para retener las impurezas y la humedad que contengan los gases de combustión, evitar incrustaciones en los equipos y prevenir la interferencia (ruido) en los medidores.

Sondas de muestreo. Son las que se introducen en los ductos de gases, fabricadas con tubería de acero inoxidable SA 304 de 1/2 pulgada de diámetro.

Sistema de medición de flujo. El sistema consta de las siguientes conexiones; entradas para el gas cero y los estándares de calibración, salidas hacia los analizadores de O_2 , SO_2 , CO , entrada para la muestra de gases, tres rotámetros para la medición del flujo de O_2 , SO_2 , CO , conexión de salida hacia el acondicionador de gases (bomba de succión, filtro y condensador) y la entrada de los gases a los rotámetros.

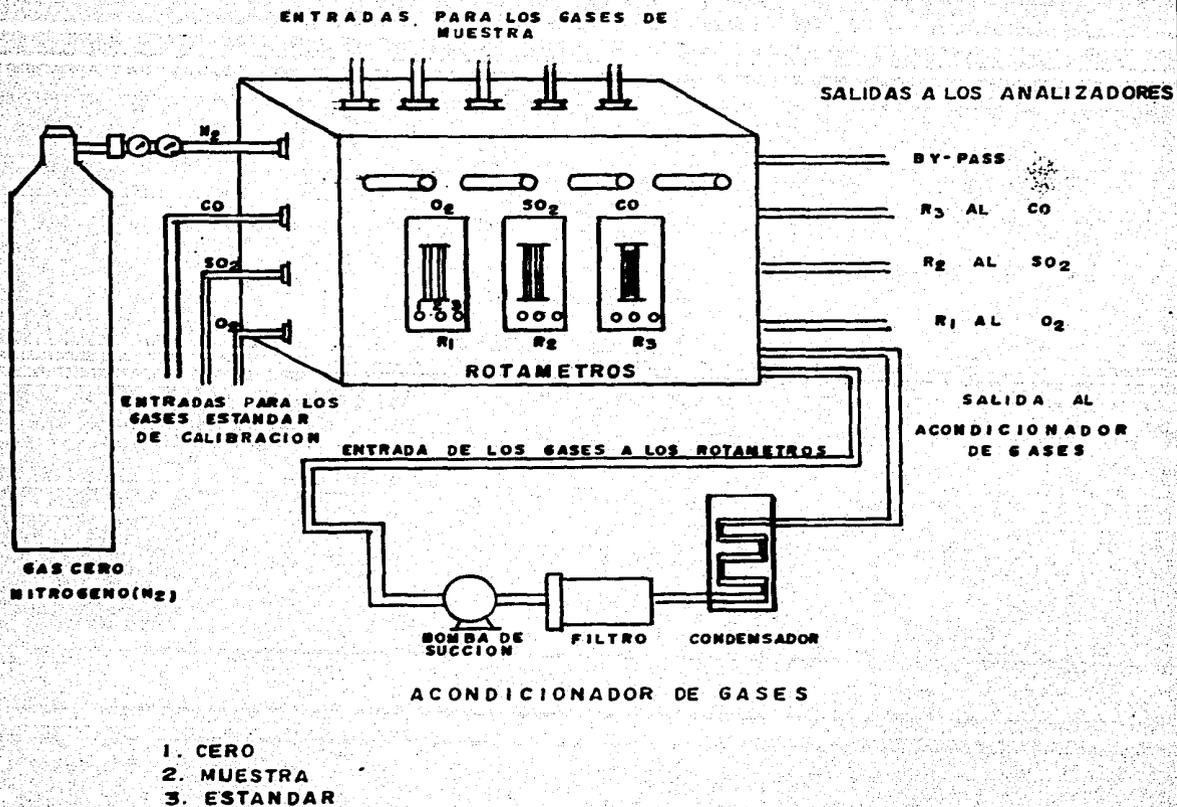


FIGURA 3.16 INSTALACION DEL EQUIPO DE MEDICION.

CAPITULO 4

APLICACION DE LA METODOLOGIA A UNA UNIDAD DE 300 MW CON QUEMADORES TANGENCIALES Y OTRA DE 150 MW CON QUEMADORES FRONTALES.

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS EN UNA UNIDAD DE 300 MW CON QUEMADORES TANGENCIALES.

Esta parte del trabajo se llevó a cabo en la unidad No. 3 de la Central termoeléctrica de Salamanca, Gto., durante el periodo comprendido entre el 19 y el 29 de agosto de 1986.

Las pruebas se realizaron con la unidad generando entre 295 y 300 MW, de acuerdo con la secuencia de pruebas que se propuso en el Capítulo 3, variando los parámetros de operación que tienen influencia preponderante en el sistema de combustión, esto es: la diferencia de presiones entre el vapor de atomización y el combustible, la temperatura del combustible y la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar.

En cada prueba se modificó el exceso de aire llevando un registro continuo de la composición de los gases de combustión (oxígeno, monóxido de carbono, trióxido de azufre y partículas inquemadas), en los ductos de entrada a los precalentadores de aire regenerativos.

Las características del generador de vapor en el que se realizaron las pruebas son las siguientes:

Marca: Combustion Engineering Canada.

Capacidad: 977 T/h (300 MW).

Condiciones del vapor:

Salida del Sobrecalentado: 540°C ; 175 kg/cm².

Salida del Recalentado: 540°C ; 38 kg/cm².

Sistema de Combustión: 16 quemadores de tipo tangencial con estabilizador de aspas, colocados en 4 niveles con 4 quemadores por nivel.

Sistema de control del

vapor Recalentado: inclinación de quemadores

Atomización: con vapor, atomizador tipo CE de mezclado interno.

Hogar: Presurizado

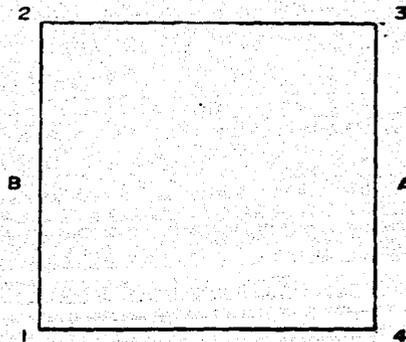
Combustible: Combustóleo

Aditivo del Combustible: Rolmex NMA-3

dosificación 1:2500

En la figura 4.1 se muestra un esquema del hogar en el que se indica la posición de los niveles de quemadores.

**POSICION DE QUEMADORES
(ESQUINAS)**



NIVELES DE QUEMADORES

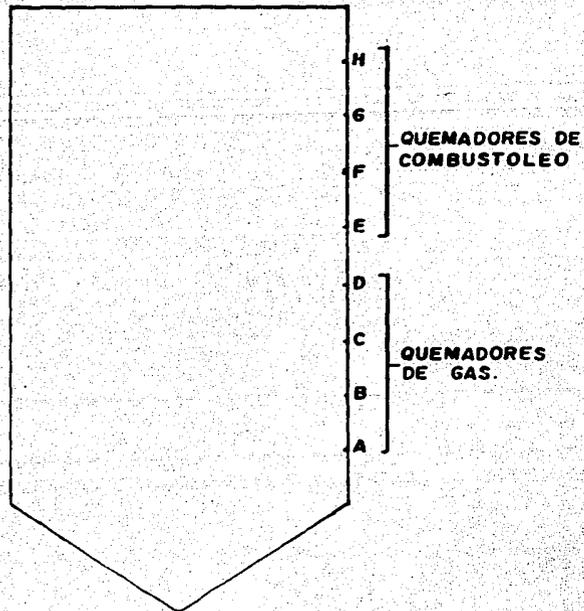


FIGURA 4.1 ESQUEMA DEL HOGAR DEL GENERADOR DE VAPOR DE LA UNIDAD 3 DE LA CENTRAL T. SALAMANCA

4.1.1. MEDICIONES PRELIMINARES.

Esta prueba se realizó el día 21 de agosto de 1986, con la unidad generando 295 MW.

Se establecieron los rangos de operación de los equipos, los cuales fueron: 0-2.5% para el medidor de oxígeno, 0-5000 p.p.m. para el monóxido de carbono y 0-30 p.p.m. para el trióxido de azufre.

Los valores de las principales condiciones operativas con que se encontraba la unidad para esta prueba se presentan en la tabla 4.1.

Con el objeto de determinar la posición de las sondas de muestreo se realizó un mapeo de las concentraciones de O_2 y CO en los dos ductos de entrada de gases a los precalentadores de aire regenerativos (tabla 4.2). De acuerdo con los resultados obtenidos (tabla 4.3) se decidió situar las sondas en la posición 2.2. para ambos ductos (A y B).

Como se observa en la tabla 4.3, existía un desbalance en los ductos ya que mientras en el punto 1.1. del lado A había 1.2% O_2 y 720 p.p.m. de CO, en el mismo punto pero del lado B se encontraron concentraciones de 3.9% de O_2 y 1050 p.p.m. de CO.

Para verificar el ajuste adecuado de los componentes del sistema de combustión, se realizó una inspección de las compuertas de aire principales y auxiliares de los

quemadores. Como se aprecia en la tabla 4.4, la posición de las compuertas es relativamente pareja.

El sistema de control automático de combustión se encontraba fuera de servicio por lo que la unidad se operó en manual.

En estas condiciones se procedió a variar el exceso de aire de combustión con el objeto de determinar el comportamiento del sistema de combustión tal y como se encontraba, esto es, con 15 quemadores en servicio y el quemador 3F fuera de servicio.

La tabla 4.5. muestra los valores de las concentraciones de los productos de combustión obtenidos durante la prueba.

La figura 4.2 muestra la correlación entre el contenido de CO y partículas de los gases de combustión en función del contenido de O_2 para ambos ductos. Como puede apreciarse se obtienen curvas diferentes para cada ducto. Posteriormente pudo comprobarse que este comportamiento se debió a que el quemador 3F estaba fuera de servicio.

Tabla 4.1. PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
MEDICIONES PRELIMINARES.

CARGA: 295 MW

CONCENTRACION DE OXIGENO: 1.2-4.5% medido en campo.

SELECTORA DE EXCESO DE AIRE: F/S

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: 78 T/h.

PRESION: 15.9 kg/cm²

TEMPERATURA: 125°C

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 378°C

PRESION: 18.0 kg/cm²

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 78-80 T/h

TEMPERATURA: LADO A-225.0°C

LADO B-247.5°C

TEMPERATURA DE VAPOR A
LA TURBINA:

SOBRECALENTADO: 540°C

RECALENTADO: 540°C

PRESION EN EL DOMO: 176 kg/cm²

QUEMADORES:

E/S 15

F/S 1 (3F)

V.T.F.:

LADO A: 210 A y/o 73%

LADO B: 210 A y/o 80%

FLUJO DE AGUA DE ATEMPERACION: 72%

DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE

LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR : 90 mm H₂O

TABLA 4.2. POSICION DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

LADO A

	1	2	3	4
1	o	o	o	o
2	o	o	o	o
3	o	o	o	o

LADO B

	1	2	3	4
1	o	o	o	o
2	o	o	o	o
3	o	o	o	o

TABLA 4.3. VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE O₂ Y
 CO ENCONTRADOS AL REALIZAR EL MAPEO.

PUNTO	LADO A		LADO B	
	No.	O ₂	CO	O ₂
1.1	1.2	720	3.9	1050
1.2	1.3	550	4.1	950
1.3	1.55	400	4.0	1000
1.4	-	-	-	-
2.1	1.55	375	4.25	900
2.2	1.45	400	4.2	850
2.3	1.55	300	4.3	750
2.4	-	-	-	-
3.1	1.80	150	4.4	710
3.2	1.65	220	4.4	720
3.3	1.70	200	4.5	700
3.4	-	-	-	-

TABLA 4.4. POSICION DE LAS COMPUERTAS DE AIRE (PRINC-AUX)
 OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE MEDICIONES PRELIMINARES.

ESQUINA	1	2	3	4	PROMEDIO	ANGULOS PROMEDIO
ELEVACION. NOx	-	-	-	-	-	-
ELEVACION. E	100-20	100-25	100-20	100-15	100-20	90-22
ELEVACION. F	100-20	100-20	100-25	100-20	100-21	90-23
ELEVACION. G	100-20	100-20	100-15	100-20	100-19	90-21
ELEVACION. H	100-20	100-21	100-20	100-19	100-20	90-22
PROMEDIO	100-20	100-21	100-20	100-19	100-20	90-22
ANGULOS PROMEDIO	90-22	90-23	90-22	90-21	90-22	90-22

CARGA : 295 MW

DIFERENCIA DE PRESIONES
 ENTRE LAS CAJAS DE AIRE
 Y EL HOGAR : 90 mm H₂.

DIFERENCIA DE PRESIONES
 ENTRE EL VAPOR Y EL
 COMBUSTIBLE: 2.5 kg/cm².

TABLA 1.5 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE MEDICIONES PRELIMINARES.

O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₂		%SELECTORA DE EXCESO DE AIRE	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	Tc °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V. T. F.		AGUA DE ATENPERACION T/h	AP CAJAS DE AIRE-HOGAR mm H ₂ O
% VOL.		p.p.m.		mg/Nm ³		p.p.m.					A	B		A	B		
A	B	A	B	A	B	A	B	DE AIRE	Kg/cm ²	°C			E/S			F/S	T/h
1	0.6	-	3200	-	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	76	205	205	-	110
2	1.5	0.7	2600	2400	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	76	205	205	-	110
3	0.6	0.9	2050	1800	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	77	210	210	-	110
4	0.8	1.0	1400	1550	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	77	210	210	-	110
5	1.1	1.2	750	1000	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	78	215	215	-	110
6	1.4	1.6	400	600	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	79	220	220	-	110
7	1.7	1.8	200	400	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	80	225	225	-	110
8	2.1	2.0	200	300	-	-	-	-	2.5	125	15	3F	80	226	226	-	110

116

UNIDAD 3 CENTRAL TERMOELECTRICA SALAMANCA.

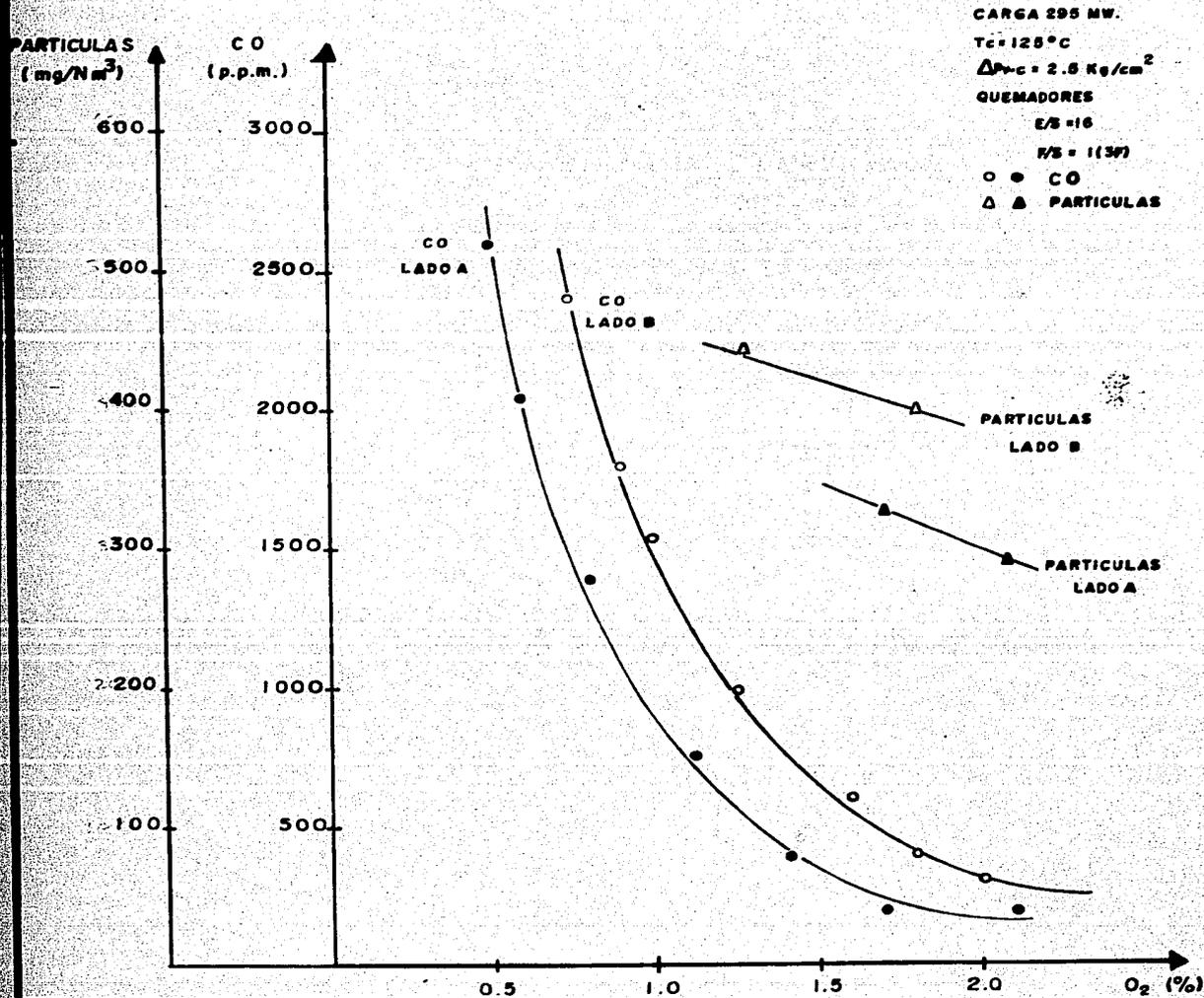


FIGURA 4.2 MEDICIONES PRELIMINARES

4.1.2. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 300 MW EN CONDICIONES INICIALES.

Esta prueba se realizó el día 22 de agosto de 1986 con la unidad generando 300 MW, variando el exceso de aire y analizando el comportamiento del sistema de combustión mediante la medición de la composición de los productos de combustión.

Las sondas se posicionaron en los puntos establecidos en la prueba preliminar.

Las condiciones operativas con que se encontraba operando la unidad para esta prueba se muestran en la tabla 4.6, la tabla 4.7 muestra los valores de las concentraciones de los productos de combustión medidos durante la prueba y la tabla 4.8 las mediciones de temperatura del circuito aire gases.

En la figura 4.3 se grafican las concentraciones de CO y Partículas en función del oxígeno presente en los gases de combustión. Como se observa en dicha figura, al operar el generador de vapor con sus 16 quemadores, las concentraciones de CO como de Partículas se ubican sobre una misma curva para ambos ductos de salida de gases en sus correlaciones con el O_2 . Ambas concentraciones decrecen con el exceso de aire en la forma típica para estos sistemas.

El límite máximo admisible de CO (200 p.p.m.) se alcanza a valores de aire equivalentes a aproximadamente 2.0% de

O_2 en gases de combustión. Para este exceso la concentración de partículas resulta de aproximadamente 330 mg/Nm³.

TABLA 4.6 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA
COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A
300 MW (CONDICIONES INICIALES).

CARGA: 300 MW

CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.6 a 1.7% medido en campo

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: 80 T/h.

PRESION: 16 kg/cm²

TEMPERATURA: 125:C

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 378:C

PRESION: 19 kg/cm²

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 76 T/h.

TEMPERATURA: LADO A 270:C
LADO B 260:C

TEMPERATURA DE VAPOR A LA
TURBINA :

SOBRECALENTADO: 530:C
RECALENTADO: 530:C

PRESION EN EL DOMO: 180 kg/cm²

QUEMADORES:

E/S 16
E/S -

INCLINACION: 40

V.T.F.:

LADO A: 210 A y/o 72%
LADO B: 210 A y/o 82%

DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE
LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR : 90 mm H₂O

TABLA 4.7 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 300 MW (CONDICIONES INICIALES).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₂		% SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (D.T.6)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	T _c °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V.T.F.		AGUA DE ATEMPERACION T/h	OP. CAJAS DE AIRE-NOGAR mm H ₂ O
	% vol		P.P.M		mg/Nm ³		P.P.M					E/S	F/S		A	B		
	A	B	A	B	A	B	A	B										
1	0.6	0.5	2200	3100	480	510	8	8	-	2.5	125	16	-	81	210	212	-	90
2	0.7	0.6	1900	2100	473	-	-	-	-	2.5	125	16	-	81	210	212	-	90
3	0.8	0.7	1500	1500	396	-	-	10.5	-	2.5	125	16	-	82	220	220	-	90
4	1.1	1.0	800	1000	374	406	-	11.5	-	2.5	125	16	-	82	220	220	-	90
5	1.5	1.4	380	400	354	-	17	-	-	2.5	125	16	-	85	225	225	-	90
6	1.8	1.7	200	200	333	340	-	21	-	2.5	125	16	-	86	226	226	-	90

TABLA 4.8 MEDICION DE TEMPERATURAS DEL CIRCUITO AIRE-GASES PARA LA PRUEBA:
 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 300 MW.

PUNTO DE MEDICION				
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (A)	40.0	44.0	44.0	
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (B)	45.0	55.0	51.0	
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (A)	260.0	255.0	262.0	
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (B)	270.0	264.0	273.0	
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (A)	365.0	362.0	371.0	
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (B)	363.0	358.0	366.0	
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (A)	154.0	152.0	153.0	
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (B)	168.0	167.0	170.0	

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA

CARGA 500 MW.

$T_c = 125^\circ C$

$\Delta P_{v-c} = 2.5 \text{ Kg/cm}^2$

QUEMADORES

E/S = 16

F/S = 0

$\Delta P = 90 \text{ mm H}_2\text{O}$

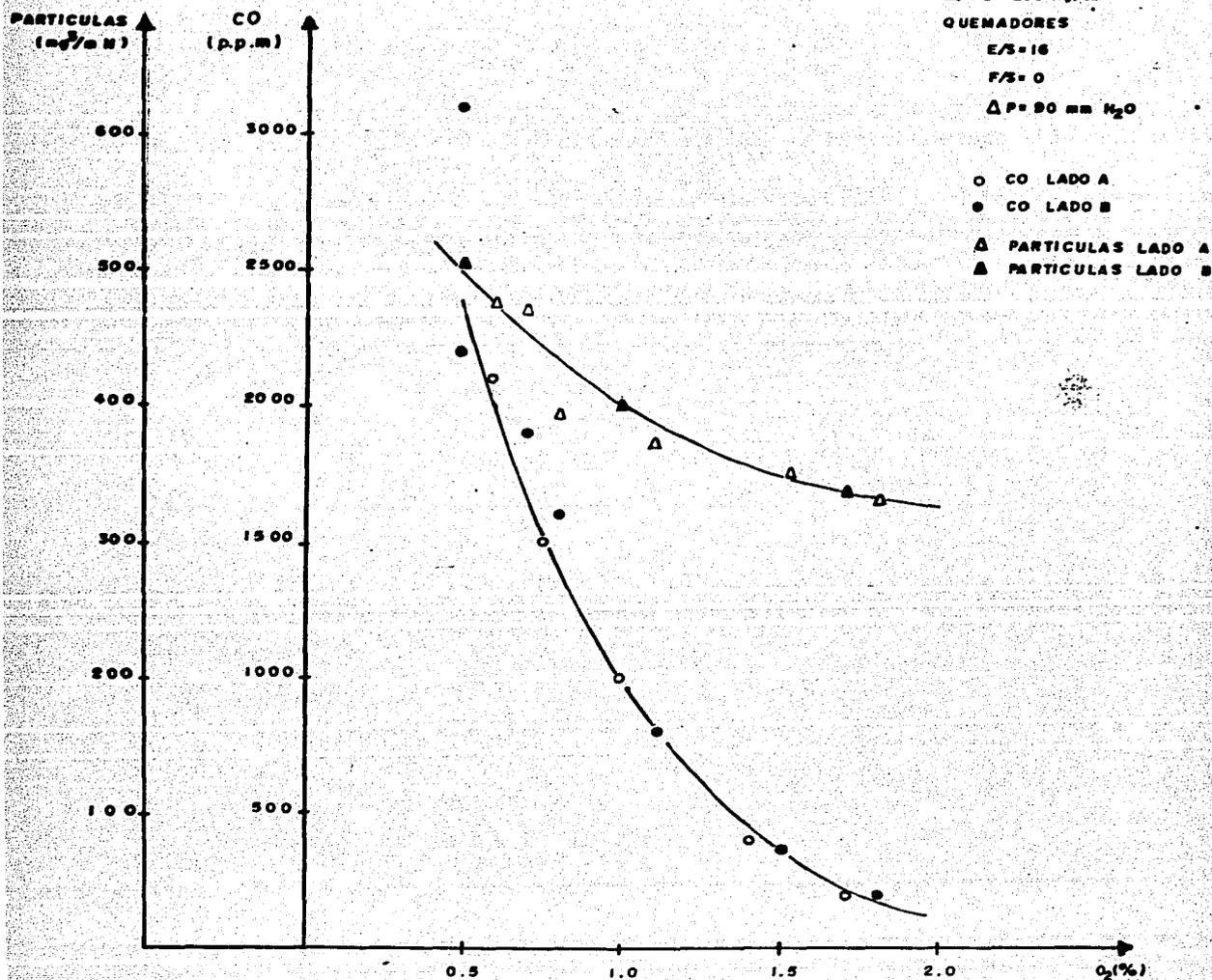


FIGURA 4.3 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 500 MW.
(CONDICIONES INICIALES)

4.1.3. INFLUENCIA DE LA PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

Esta prueba se realizó con la unidad generando 300 MW el día 26 de agosto de 1986.

La unidad en estudio posee atomizadores asistidos con vapor del tipo de mezclado interno. En estos atomizadores la relación vapor/combustible depende más de la diferencia de presiones entre el vapor y el combustible que de la presión propiamente dicha.

Por ello la prueba consistió en modificar esta diferencia de presiones dejando que la presión de vapor de atomización adoptara el valor que el sistema requiriera.

La diferencia de presiones entre el vapor de atomización y el combustible con la que se realizó la prueba fue 3.5 kg/cm² (máxima permitida por el sistema) y la correspondiente presión de vapor de atomización (medida en el cabezal) fue de 17.6 kg/cm².

Las condiciones operativas de la unidad se presentan en la tabla 4.9, la tabla 4.10 contiene los valores medidos de composición de gases y la tabla 4.11 los valores de temperaturas del circuito aire-gases.

La figura 4.4 representa el comportamiento del sistema de combustión en las condiciones de esta prueba.

En la figura 4.5 se realiza la comparación de los resultados

de esta prueba con los de la prueba comportamiento del sistema de combustión a 300 MW. (figura 4.3).

Como se puede apreciar, el cambio en la diferencia de presiones entre el vapor y el combustible no afecta substancialmente la producción de monóxido de carbono (todos los puntos caen sobre una misma curva), pero sí lo hace con la producción de partículas inquemadas.

La figura 4.6 (tomada de un corte a $O_2 = cte = 1.0\%$ en la figura 4.5) pone de manifiesto cómo se reduce la concentración de partículas al incrementarse la diferencia de presiones entre el vapor y el combustible.

TABLA 4.9 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE PRESION
DE VAPOR DE ATOMIZACION.

CARGA: 300 MW
CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.6-1.7% medido en campo
COMBUSTIBLE A QUEMADORES:
FLUJO: 82 T/h.
TEMPERATURA: 125:C
VAPOR DE ATOMIZACION:
TEMPERATURA: 378:C
PRESION: 17.6 kg/cm²
AIRE DE COMBUSTION:
FLUJO: 78 T/h.
TEMPERATURA: LADO A 260:C
LADO B 260:C
TEMPERATURA DEL VAPOR A LA
TURBINA:
SOBRECALENTADO: 525:C
RECALENTADO: 525:C
PRESION EN EL DOMO: 182 kg/cm²
QUEMADORES:
E/S: 16
F/S: -
INCLINACION: 50
V.T.F.:
LADO A: 220 A y/o 86%
LADO B: 220 A y/o 85%
DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE
LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR: 90 mm H₂O

TABLA 4.10 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION.

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₂		%SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B. T. G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	T _c °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V. T. F		AGUA DE ATEMPERACION T/h	AP CAJAS DE AIRE-HOGAR mm H ₂ O
	%vol		p. p. m		mg/Nm ³		p. p. m					E/S	F/S		A	B		
	A	B	A	B	A	B	A	B										
1	0.65	0.55	2080	2700	437	427	8	8	-	3.5	125	16	-	81	210	212	-	90
2	0.80	0.75	1550	1650	-	392	-	-	-	3.5	125	16	-	82	215	215	-	90
3	1.05	1.0	800	850	350	352	-	-	-	3.5	125	16	-	82	220	220	-	90
4	1.7	1.6	310	350	308	-	15	-	-	3.5	125	16	-	86	225	225	-	90
5	2.0	1.9	300	300	-	295	-	19	-	3.5	125	16	-	86	227	227	-	90

127

TABLA 4.11 MEDICIONES DE TEMPERATURAS DEL CIRCUITO AIRE-GASES PARA LA PRUEBA DE PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION.

PUNTO DE MEDICION				
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (A)	45.0	40.0	35.0	
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (B)	55.0	53.0	58.0	
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (A)	270.0	280.0	270.0	
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (B)	280.0	280.0	270.0	
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (A)	360.0	370.0	370.0	
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (B)	365.0	370.0	375.0	
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (A)	150.0	150.0	160.0	
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (B)	170.0	170.0	170.0	

UNIDAD 3 CENTRAL TERMOELECTRICA SALAMANCA

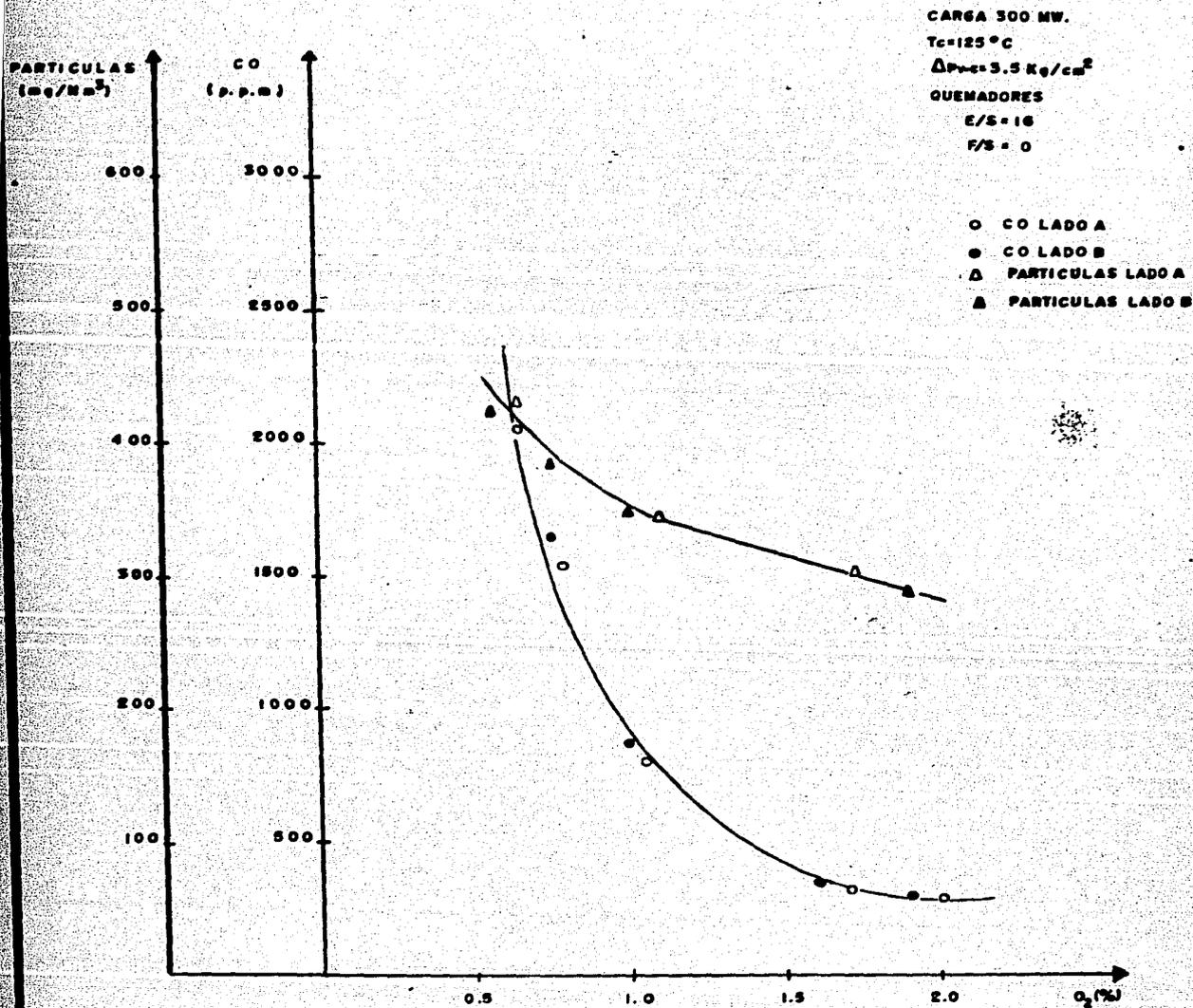


FIGURA 4.4 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA $\Delta P_{v-c} = 3.5 \text{ Kg/cm}^2$.

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA

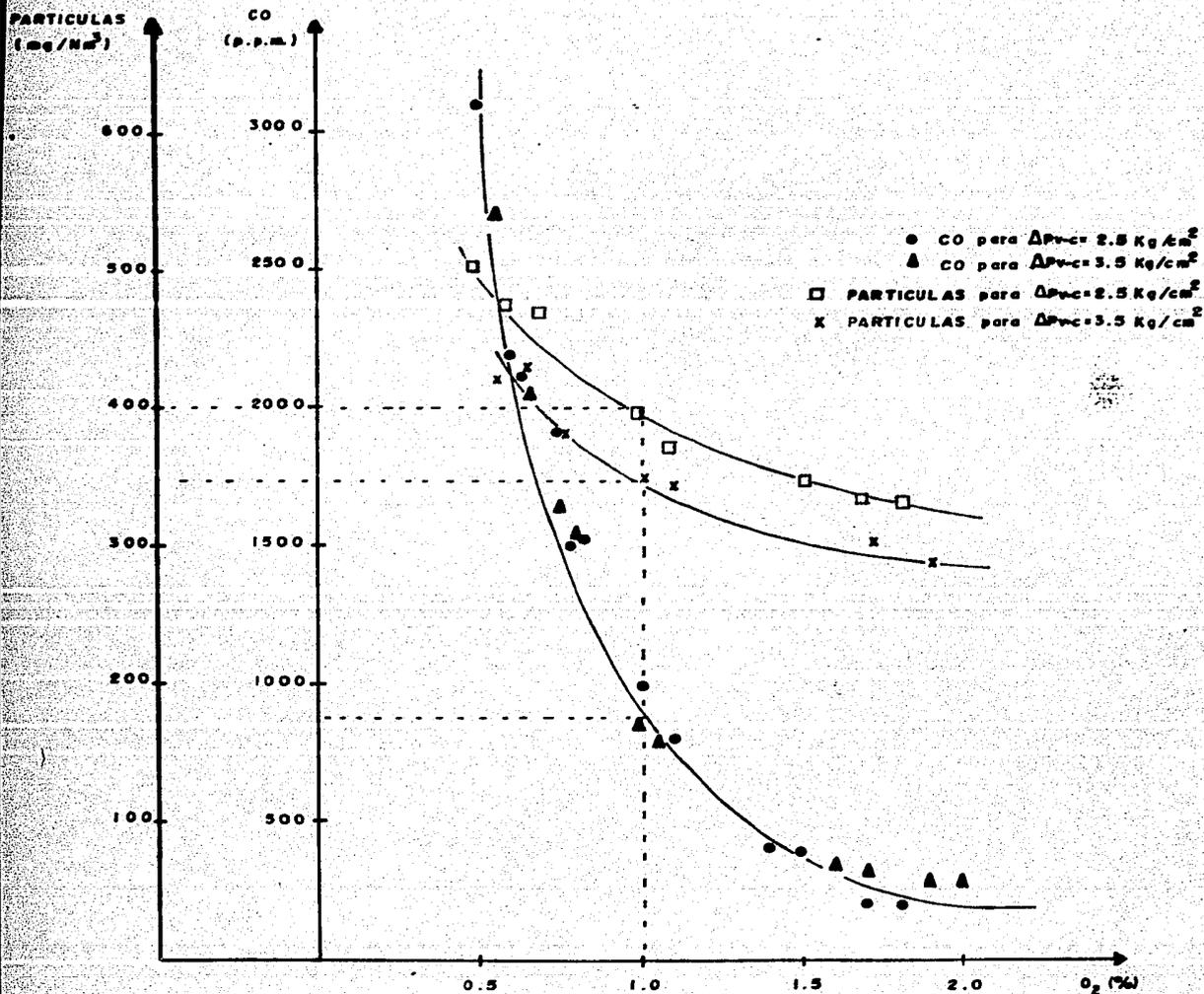


FIGURA 4.5 COMPARACION ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON $\Delta P = 3.5 \text{ Kg/cm}^2$ Y LA PRUEBA DE CONDICIONES INICIALES ($\Delta P_{vc} = 2.5 \text{ Kg/cm}^2$ FIGURA 4.3)

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA.

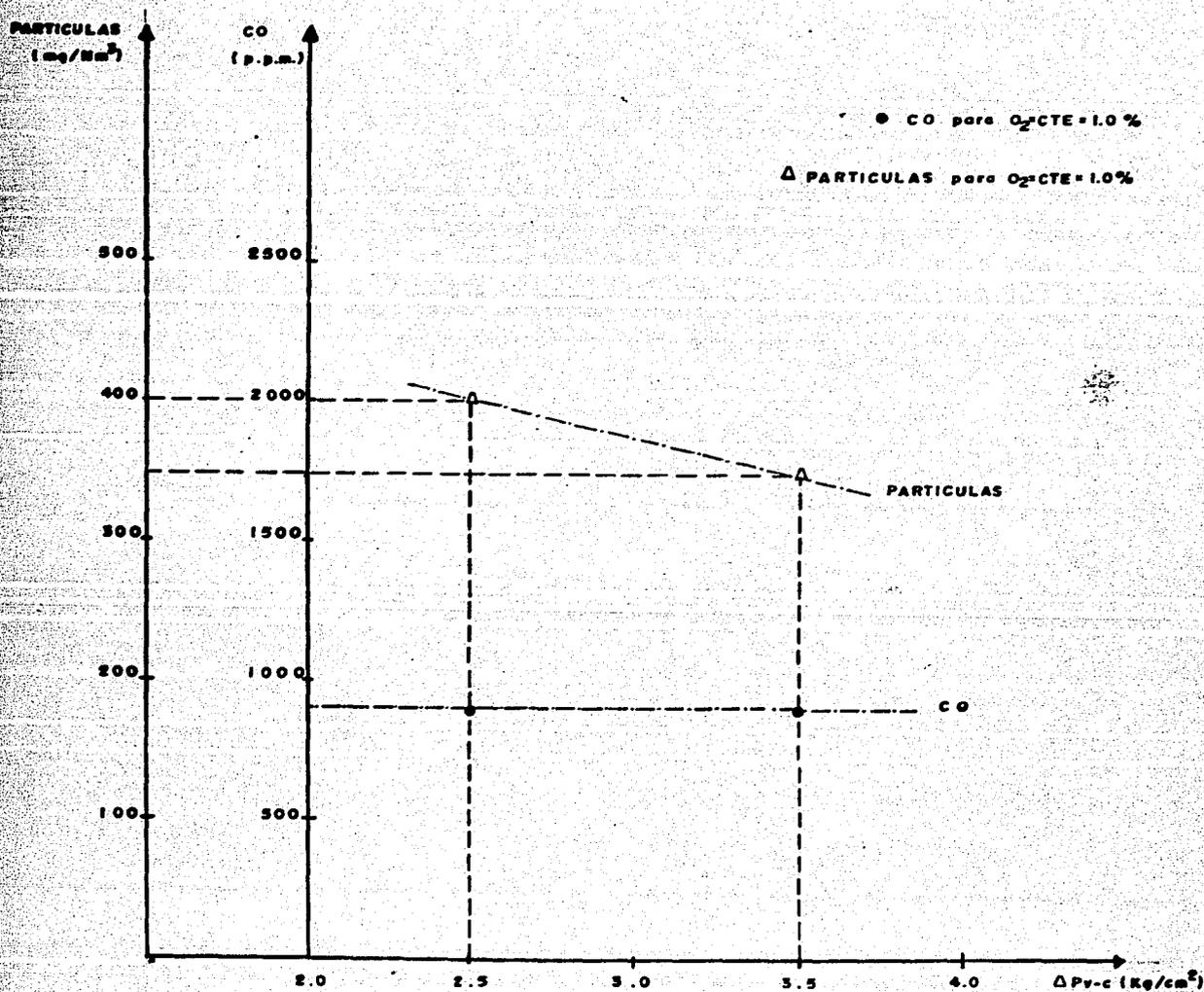


FIGURA 4.6 INFLUENCIA DE LA DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE EL VAPOR Y EL COMBUSTIBLE EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

4.1.4. INFLUENCIA DE LA DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

Esta prueba se realizó con la unidad generando 300 MW el día 27 de agosto de 1986.

La prueba consistió en modificar la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar, para determinar el efecto de los cambios aerodinámicos en el comportamiento del sistema de combustión. El nuevo valor de esta diferencia de presiones fue 110 mm H_2O (máximo permitido por el sistema).

Las condiciones operativas de la unidad se presentan en la tabla 4.12 y los valores medidos de la composición de los gases de combustión en la tabla 4.13.

En la figura 4.7 se graficaron las concentraciones de CO y Partículas en función del oxígeno presente en los gases de combustión. Esta figura representa el comportamiento del sistema de combustión en las condiciones de esta prueba.

En la figura 4.8 se realiza la comparación de los resultados de esta prueba con los de la prueba comportamiento del sistema de combustión a 300 MW (figura 4.3). Como se puede apreciar al aumentar la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar (de 90 a 110 mm H_2O), se produce una disminución en la producción de monóxido de carbono pero no se afecta la producción de partículas (todos

los puntos caen sobre una misma curva).

La figura 4.9 (tomada de un corte a $O_2=cte=1.0\%$ en la figura 4.8), muestra cómo se reduce la concentración de CO al incrementarse la diferencia de presiones entre las cajas de aire y el hogar.

TABLA 4.12 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE LA DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR.

CARGA: 300 MW

CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.5-2.0% medido en campo.

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: 78 T/h.

PRESION: 17 kg/cm².

TEMPERATURA: 125:C.

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 378:C.

PRESION: 19.5 kg/cm².

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 78 T/h.

TEMPERATURA: LADO A 270:C.
LADO B 260:C.

TEMPERATURA DE VAPOR A
LA TURBINA:

SOBRECALENTADO: 530:C.
RECALENTADO: 530:C.

PRESION EN EL DOMO: 182 kg/cm².

QUEMADORES:

E/S 16
F/S -

V.T.F.: LADO A 210 A y/o 84%
LADO B 220 A y/o 84%

DIFERENCIA DE PRESIONES
ENTRE LAS CAJAS DE AIRE
Y EL HOGAR : 110 mm H₂O.

CARGA 300 MW.

$T_c = 125^\circ\text{C}$

$\Delta P_{\text{m.c.}} = 2.5 \text{ Kg/cm}^2$

QUEMADORES

E/S=16

F/S=0

$\Delta P = 110 \text{ mm H}_2\text{O}$

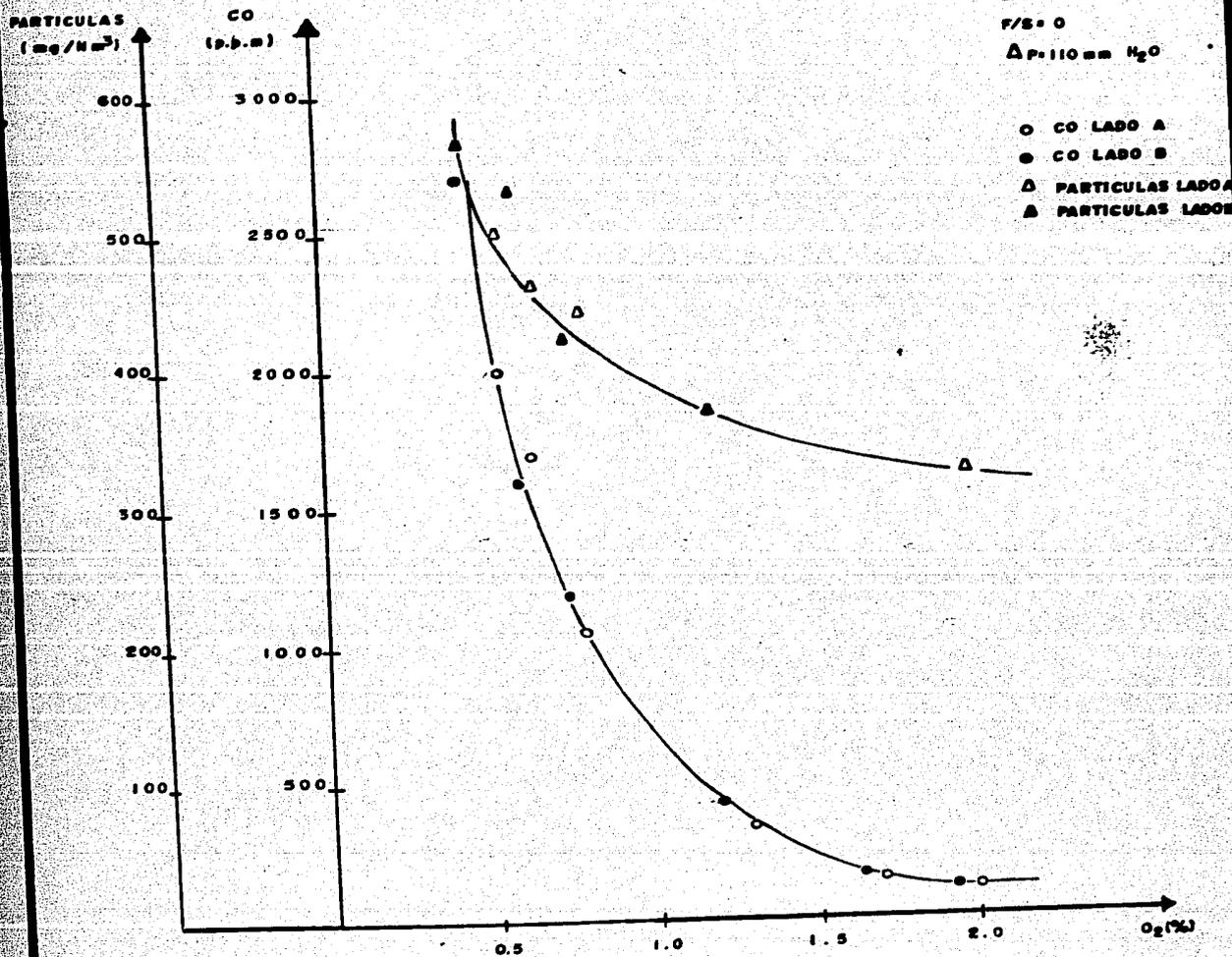


FIGURA 4.7 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR IGUAL A 110 mm H₂O.

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA

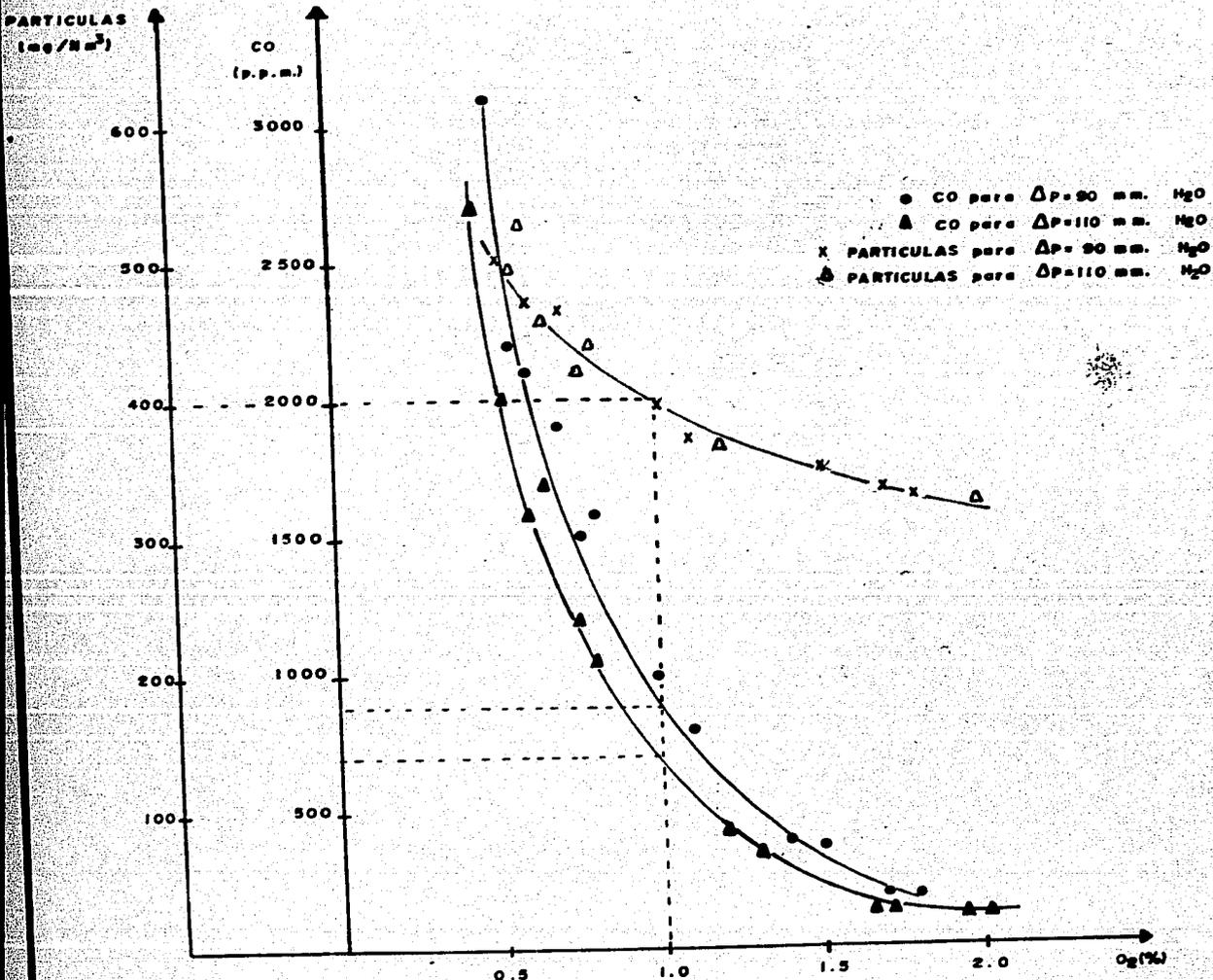


FIGURA 4.8 COMPARACION ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR IGUAL A 110 mm H₂O Y LA PRUEBA DE CONDICIONES INICIALES ($\Delta P = 90$ mm H₂O)

UNIDAD 3 CENTRAL TERMOELECTRICA SALAMANCA

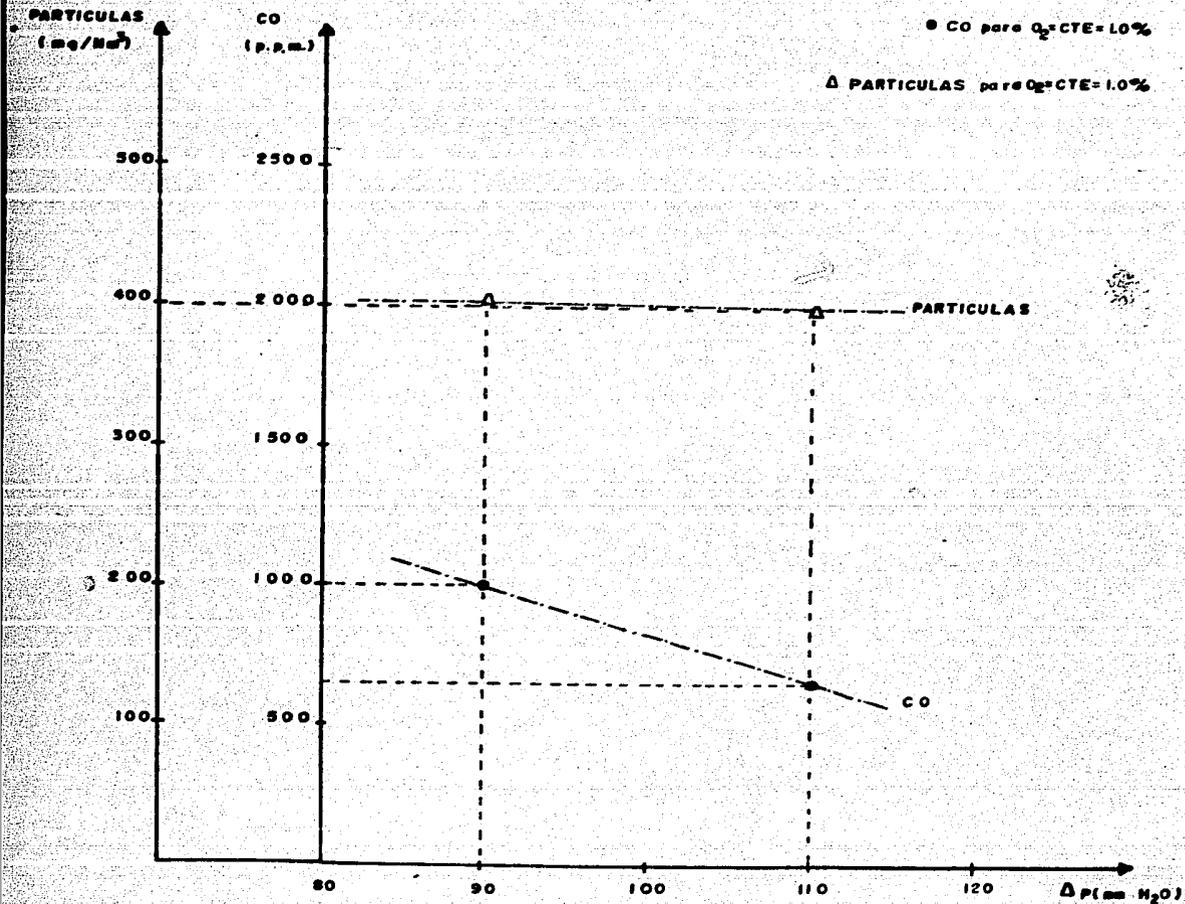


FIGURA 4.9 INFLUENCIA DE LA DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

4.1.5. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

Esta prueba se realizó el día 28 de agosto con la unidad generando 300 MW.

Las temperaturas del combustible con las que se trabajó fueron 118 y 140°C a una diferencia de presiones entre el vapor y el combustible de 2.5 kg/cm².

Las condiciones operativas de la unidad y los valores de las concentraciones de los productos de combustión obtenidos a una temperatura de 118°C se muestran en las tablas 4.14 y 4.15. Las tablas 4.16 y 4.17 y 4.18 muestran los parámetros operativos de la unidad, los valores de las concentraciones de los productos de combustión y los valores de temperaturas del circuito aire-gases obtenidos a una temperatura de 140°C.

En las figuras 4.10 y 4.11 se grafican las concentraciones de CO y partículas en función del oxígeno presente en los gases de combustión, y representan el comportamiento que tuvo el sistema de combustión al operar con las temperaturas de combustible de 118 y 140°C respectivamente.

En la figura 4.12 se realiza la comparación de los resultados de esta prueba con los de la prueba Comportamiento del sistema de Combustión a 300 MW. (T_c=125°C) figura 4.3

Como se puede observar al disminuir la temperatura del combustible se produce un aumento substancial en la producción de CO y Partículas, mientras que al operar el sistema de combustión a una temperatura de combustible igual a 140:C se obtiene una mejoría notable en la combustión.

La figura 4.13 (tomada de un corte a $O_2=cte=1.0\%$ en la figura 4.12), muestra las reducciones en las concentraciones de monóxido de carbono y partículas de 1580 p.p.m. y 480 mg/Nm³ para Tc=118:C hasta 800 p.p.m. y 310 mg/Nm³ para Tc=140:C.

TABLA 4.14. PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE (Tc=118°C).

CARGA: 300 MW
CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.6-2.2% medido en campo
COMBUSTIBLE A QUEMADORES:
FLUJO: 82 T/h.
PRESION: 15 kg/cm²
TEMPERATURA: 118°C
VAPOR DE ATOMIZACION:
TEMPERATURA: 375°C
PRESION: 17.5 kg/cm²
AIRE DE COMBUSTION:
FLUJO: 75 T/h.
TEMPERATURA: LADO A 280°C
LADO B 270°C
TEMPERATURA DE VAPOR
A LA TURBINA:
SOBRECALENTADO: 540°C
RECALENTADO: 540°C
PRESION EN EL DOMO: 182 kg/cm².
QUEMADORES:
E/S : 16
E/S : 0
INCLINACION:00
V.T.F.:
LADO A 232 A y/o 85%
LADO B 232 A y/o 86%
DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE
LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR: 90 mm H₂O

TABLA 4.15 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE (Tc=118 C).

O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₃		% SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B.T.G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	T _c °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V. T. F		AGUA DE ATEMPERACION T/h	ΔP CAJAS DE AIRE-HOGAR mm H ₂ O
%vol		p. p.m		mg/Nm ³		p. p.m					E/S	F/S		A	A		
A	B	A	B	A	B	A	B										
1	0.9	0.75	2000	2900	491	532	-	-	2.5	118	16	-	82	215	215	-	90
2	1.2	1.1	1200	1300	440	445	11.5	10.5	2.5	118	16	-	82	215	215	-	90
5	1.5	1.35	750	900	396	-	15.0	13	2.5	118	16	-	85	220	220	-	90
4	1.8	1.70	500	500	-	384	-	-	2.5	118	16	-	85	225	225	-	90
5	2.1	2.0	350	300	-	362	-	25	2.5	118	16	-	86	226	226	-	90

TABLA 4.16 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE (Tc=140:C).

CARGA: 300 MW.
CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.5-2.5% medido en campo.
COMBUSTIBLE A QUEMADORES:
FLUJO: 82 T/h.
PRESION: 15 kg/cm².
TEMPERATURA: 140:C
VAPOR DE ATOMIZACION:
TEMPERATURA: 375:C
PRESION: 17.5 kg/cm²
AIRE DE COMBUSTION:
FLUJO: 75 T/h.
TEMPERATURA: LADO A 285:C
LADO B 275:C
TEMPERATURA DE VAPOR
A LA TURBINA:
SOBRECALENTADO: 540:C
RECALENTADO: 540:C
PRESION EN EL DOMO: 182 kg/cm²
QUEMADORES:
E/S: 16
E/S: 0
V.T.F.:
LADO A 220 A y/o 84%
LADO B 220 A y/o 82%
DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE
LAS CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR: 90 mm H₂O.

TABLA 4.17 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE (Tc=140 C).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₃		% SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B.T.G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	Tc °C	QUEMADORES		FLUJODE AIRE T/h	AMPERAJE V. T.F		AGUA DE ATEMPERACION T/h	AP CAJAS DE AIRE-HOGAR mm H ₂ O
	% Vol		P. P.M		mg /Nm ³		P. P.M					E/S	F/S		A	B		
	A	B	A	B	A	B	A	B										
1	0.65	0.55	1800	2100	376	421	-	6	-	2.5	140	16	-	73	215	215	-	90
2	0.9	0.8	1000	1200	316	336	-	8	-	2.5	140	16	-	75	220	220	-	90
3	1.3	1.2	420	500	290	288	13	14	-	2.5	140	16	-	80	225	225	-	90
4	1.7	1.65	210	220	245	260	-	-	-	2.5	140	16	-	80	230	230	-	90
5	2.0	1.95	200	200	220	225	20	21	-	2.5	140	16	-	81	230	230	-	90

144

TABLA 4.18 MEDICIONES DE TEMPERATURAS DEL CIRCUITO AIRE-GASES PARA LA PRUEBA:
DE TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE ($T_c = 140^\circ\text{C}$).

PUNTO DE MEDICION				
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (A)	35.0	30.0	30.0	
ENTRADA DE AIRE AL PRECALENTADOR (B)	55.0	55.0	55.0	
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (A)	275.0	260.0	260.0	
SALIDA DE AIRE DEL PRECALENTADOR (B)	285.0	270.0	255.0	
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (A)	370.0	265.0	375.0	
ENTRADA DE GASES AL PRECALENTADOR (B)	365.0	370.0	370.0	
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (A)	155.0	155.0	155.0	
SALIDA DE GASES DEL PRECALENTADOR (B)	165.0	165.0	165.0	

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA.

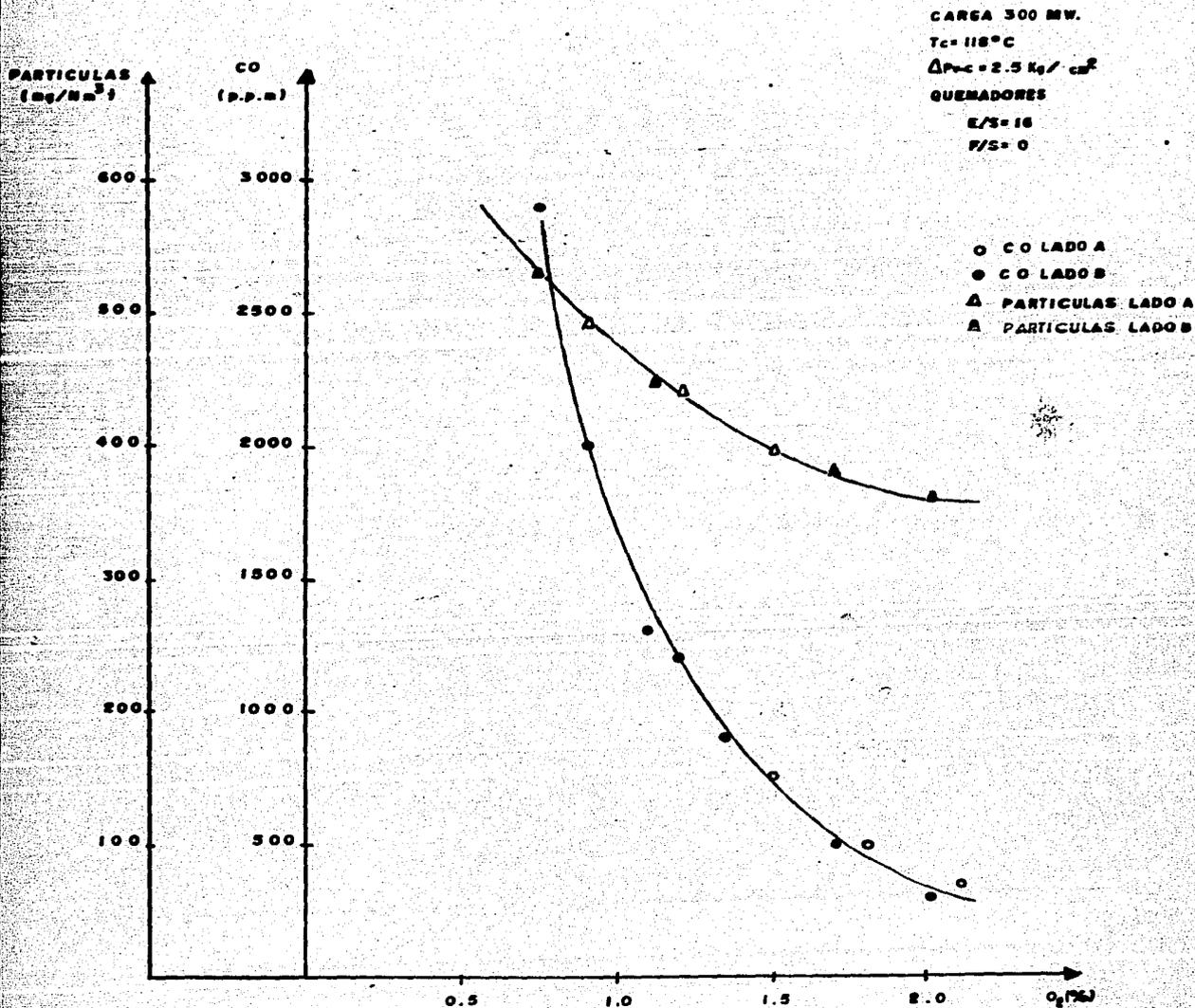


FIGURA 4.10. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE IGUAL A 118°C .

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA.

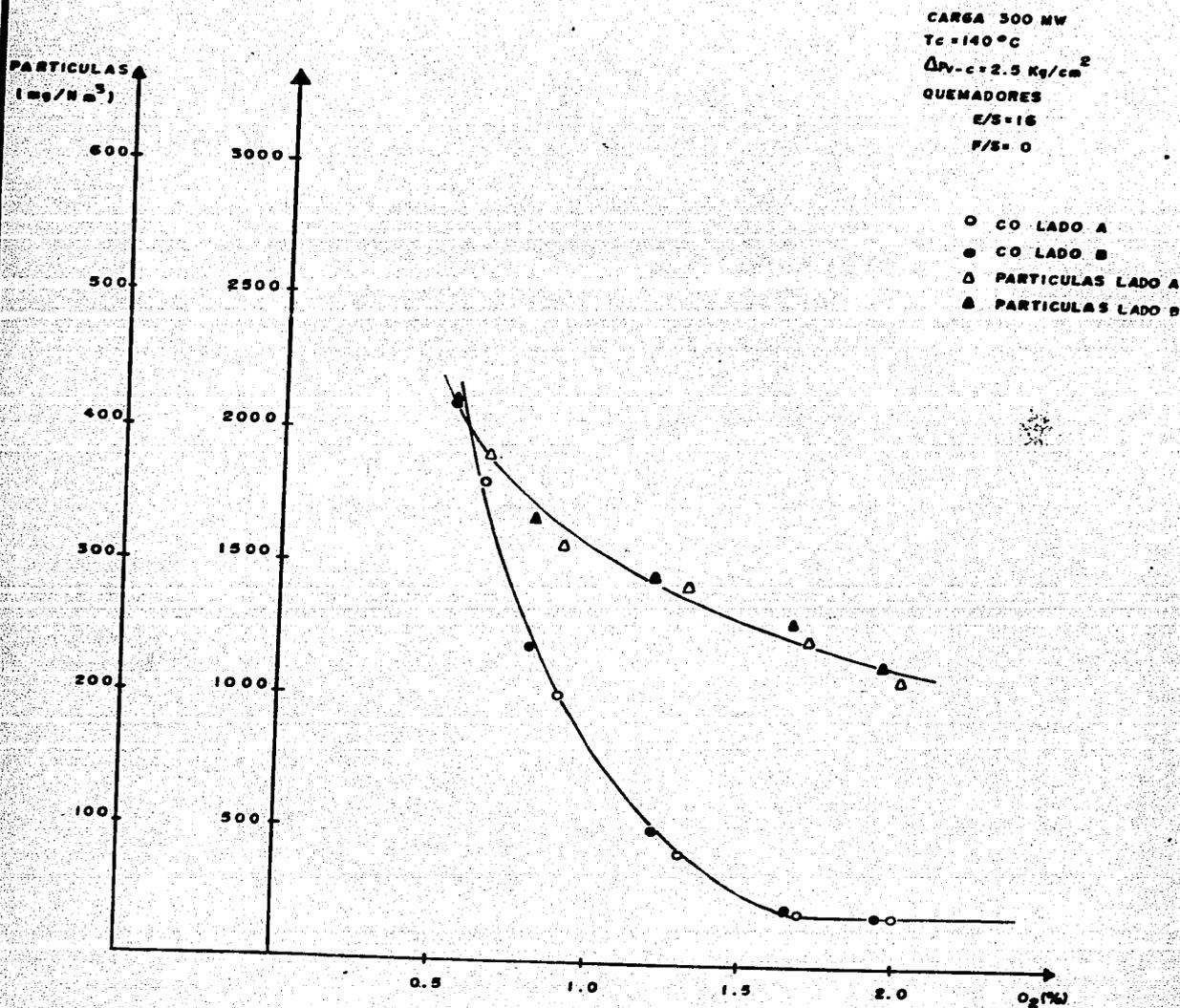


FIGURA 4.11. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE IGUAL A 140 °C.

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA.

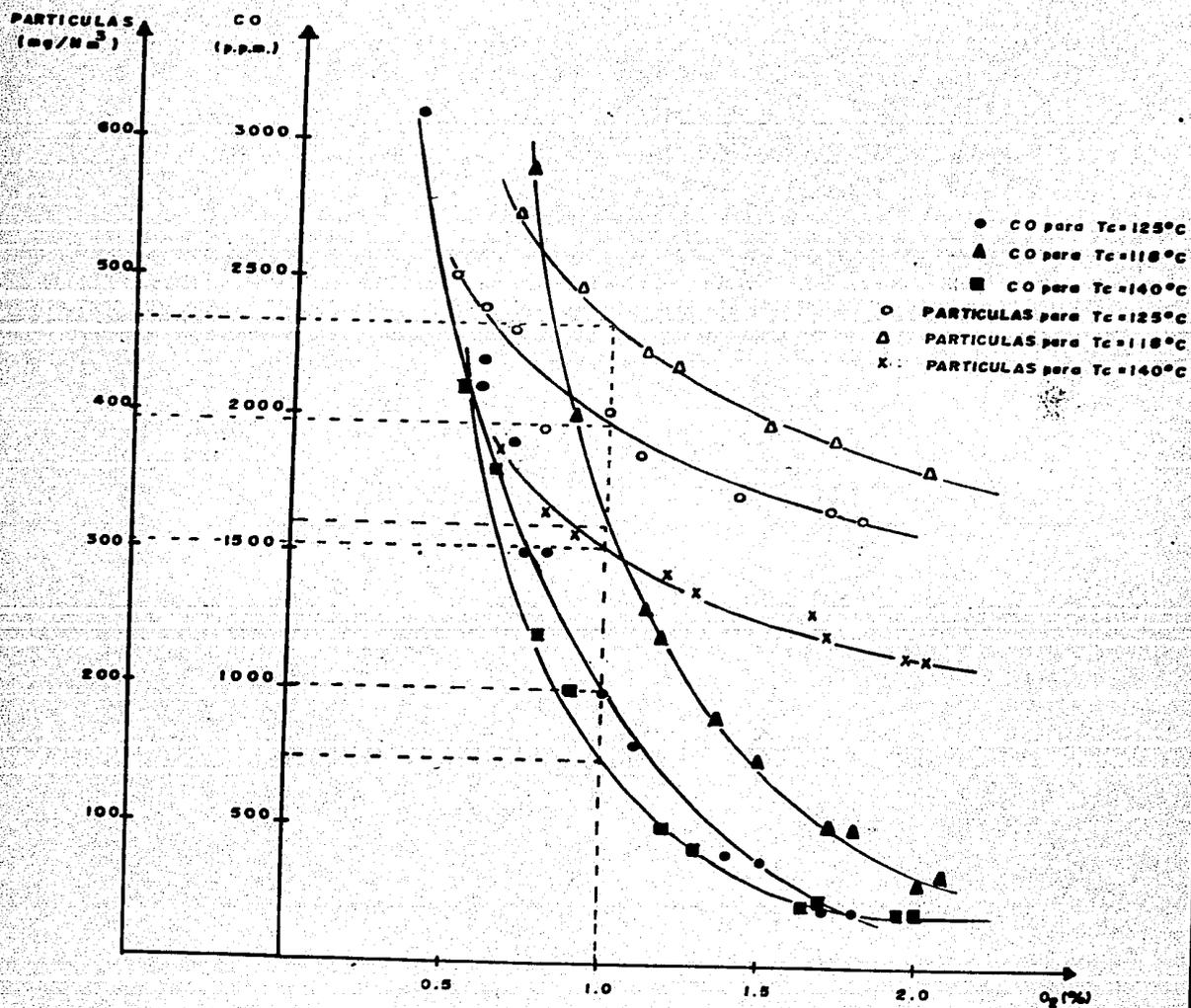


FIGURA 4.12 COMPARACION ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON LAS TEMPERATURAS DE COMBUSTIBLE DE 118 Y 140°C Y LA PRUEBA DE CONDICIONES INICIALES ($T_c = 125^\circ C$ FIGURA 4.3).

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA

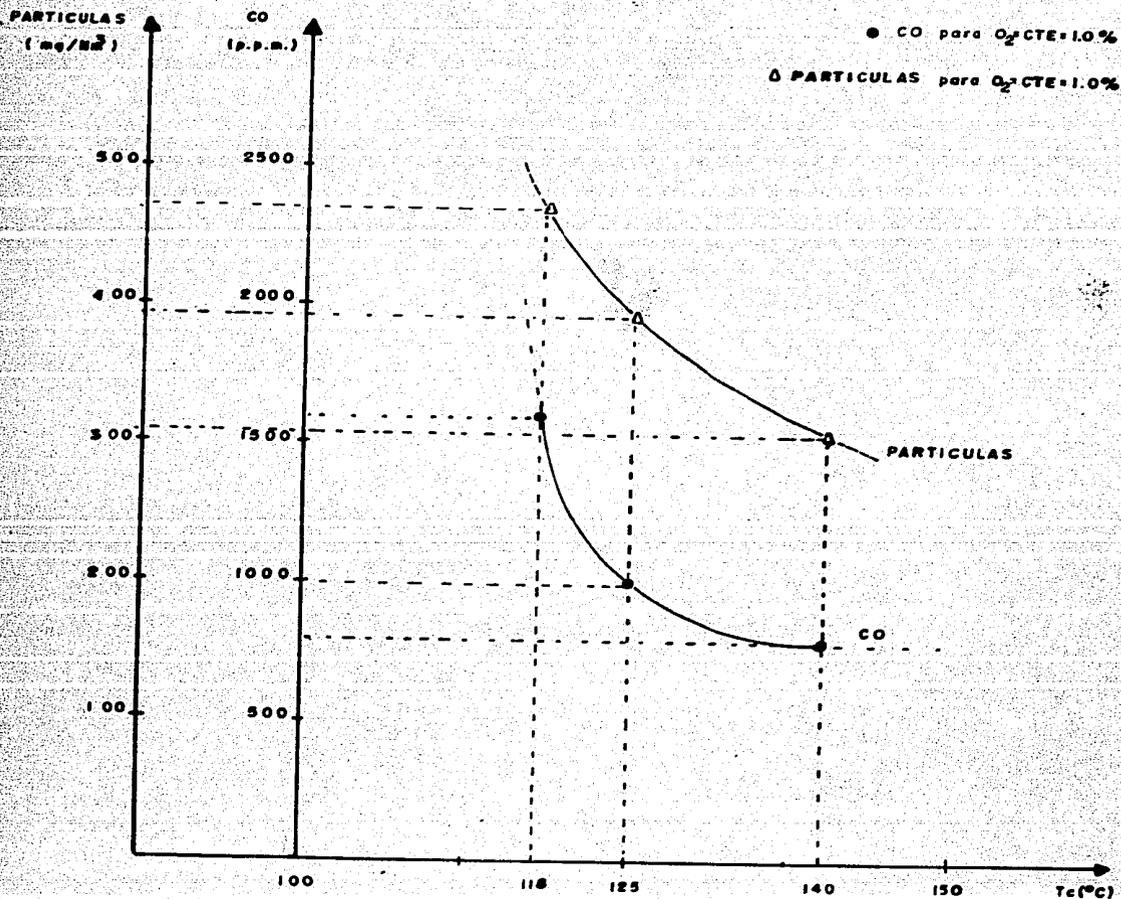


FIGURA 4.13 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION .

4.1.6. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 300 MW EN CONDICIONES FINALES.

Esta prueba se realizó el día 29 de agosto con la unidad generando 300 MW.

Con base en los resultados obtenidos en las pruebas anteriores se seleccionaron para esta prueba los siguientes valores en las condiciones operativas:

Diferencia de presiones entre el vapor y el combustible: 3.5 kg/cm²

temperatura de combustible: 140°C

Diferencia de presiones entre las cajas de aire-hogar: 110 mm H₂O.

En la figura 4.14 se grafican las concentraciones de CO y partículas de los gases de combustión en función del contenido de O₂, la cual representa el comportamiento del sistema de combustión en condiciones finales.

En la figura 4.15 se realiza la comparación entre el comportamiento del sistema de combustión en condiciones iniciales y finales.

El límite máximo admisible de CO (200 p.p.m.) se alcanza a valores de exceso de aire equivalentes a 1.35% O₂ en condiciones finales, mientras que en condiciones iniciales

éste valor (200 p.p.m.) se alcanza a 2.0% O_2 . Por otra parte existe una disminución notable en la producción de partículas inquemadas, al pasar de 360 mg/Nm³ a 1.35% de O_2 a condiciones iniciales hasta 260 mg/Nm³ a 1.35% de O_2 a condiciones finales, sin que se alcancen valores altos de SO_3 (13 p.p.m para 1.35% de O_2), como se muestra en la figura 4.16 (Variación del SO_3 en función del Oxígeno presente en los gases de combustión).

Las tablas 4.19 y 4.20 muestran los parámetros operativos y los valores de las concentraciones de los productos de combustión con que fué realizada la prueba.

Debido a que el sistema de control automático de combustión se encontraba fuera de servicio se realizó la gráfica 4.17 (Amperaje de los V.T.F. contra el oxígeno presente en los gases de combustión) que auxilia en la operación del generador de vapor.

TABLA 4.19 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA
DE MEJORES CONDICIONES.

CARGA: 300 MW
CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.5-2.5%
COMBUSTIBLE A QUEMADORES:
FLUJO: 81 T/h.
TEMPERATURA: 140:C
PRESION: 14.5 kg/cm2
VAPOR DE ATOMIZACION:
TEMPERATURA: 375:C
PRESION: 18 kg/cm2
AIRE DE COMBUSTION:
FLUJO: 74%
TEMPERATURA: LADO A: 260:C
LADO B: 265:C
TEMPERATURA DE VAPOR A
LA TURBINA:
SORRECALENTADO: 540:C
RECALENTADO: 540:C
PRESION EN EL DOMO: 176 kg/cm2
QUEMADORES:
E/S: 16
F/S: 0
V.T.F.:
LADO A 218 A y/o 85%
LADO B 215 A y/o 81%
DIFERENCIA DE PRESIONES ENTRE LAS
CAJAS DE AIRE Y EL HOGAR: 110 mm H₂O

TABLA 4.20 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 300 MW (CONDICIONES FINALES).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₂		% SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B.T.G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION kg/cm ²	T _c °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V.T.F.		AGUA DE ATEMPERACION T/h	P CAJAS DE AIRE-HOGAR m ³ H ₂ O
	% vol		p.p.m		mg/Nm ³		p.p.m					E/S	F/S		A	B		
	A	B	A	B	A	B	A	B										
1	0.6	0.5	1700	2400	360	395	-	-	-	3.5	140	16	-	71	204	209	-	110
2	0.7	0.65	1500	1500	344	340	-	8	-	3.5	140	16	-	71	204	209	-	110
3	1.0	0.95	600	700	-	320	-	10	-	3.5	140	16	-	74	208	211	-	110
4	1.2	1.05	320	400	278	307	12	-	-	3.5	140	16	-	74	210	212	-	110
5	1.7	1.65	100	100	254	-	-	-	-	3.5	140	16	-	76	215	217	-	110
6	2.0	1.95	100	100	-	211	-	-	-	3.5	140	16	-	76	215	217	-	110

153

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA

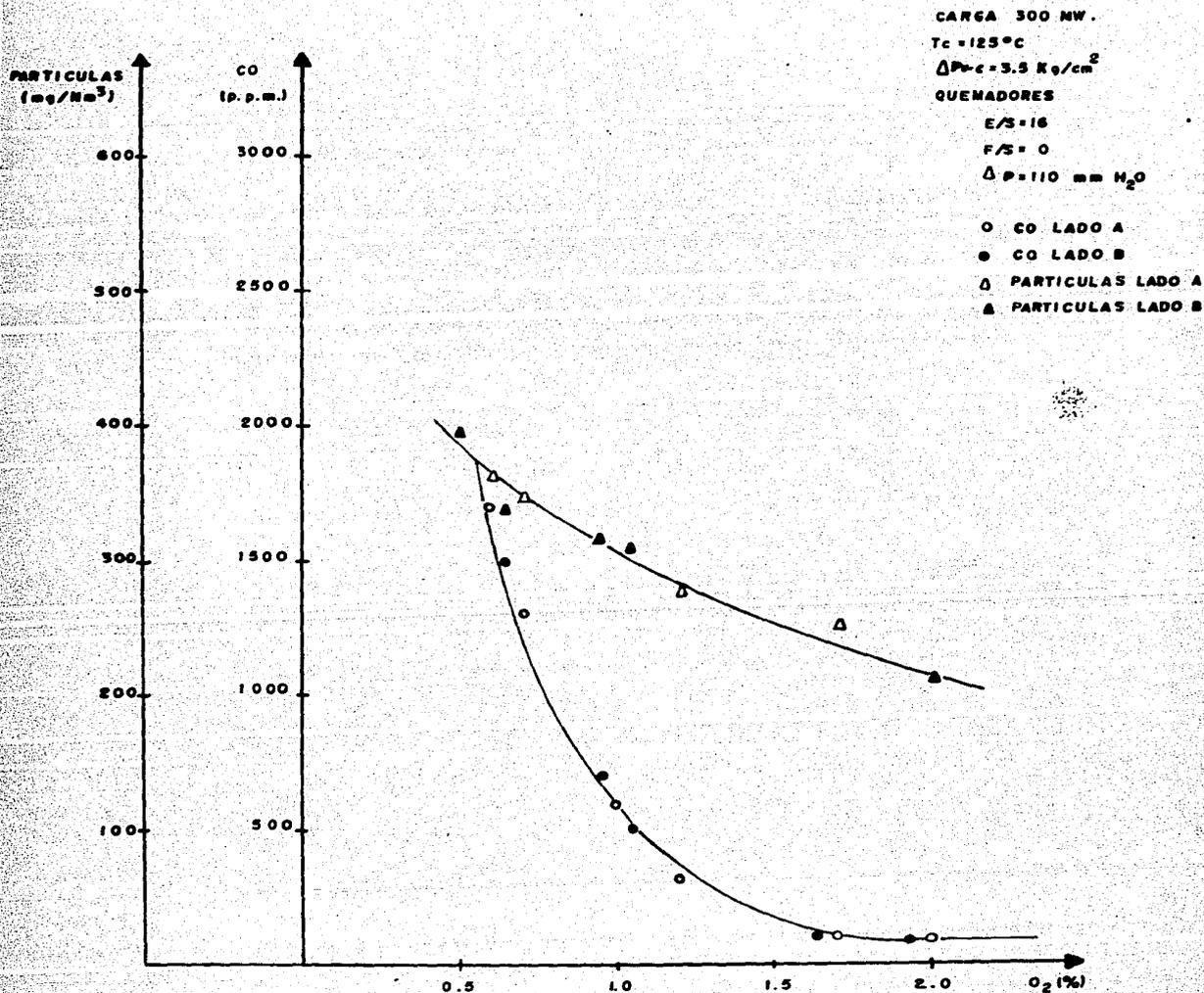


FIGURA 4.14 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 300 MW.
EN CONDICIONES FINALES.

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA

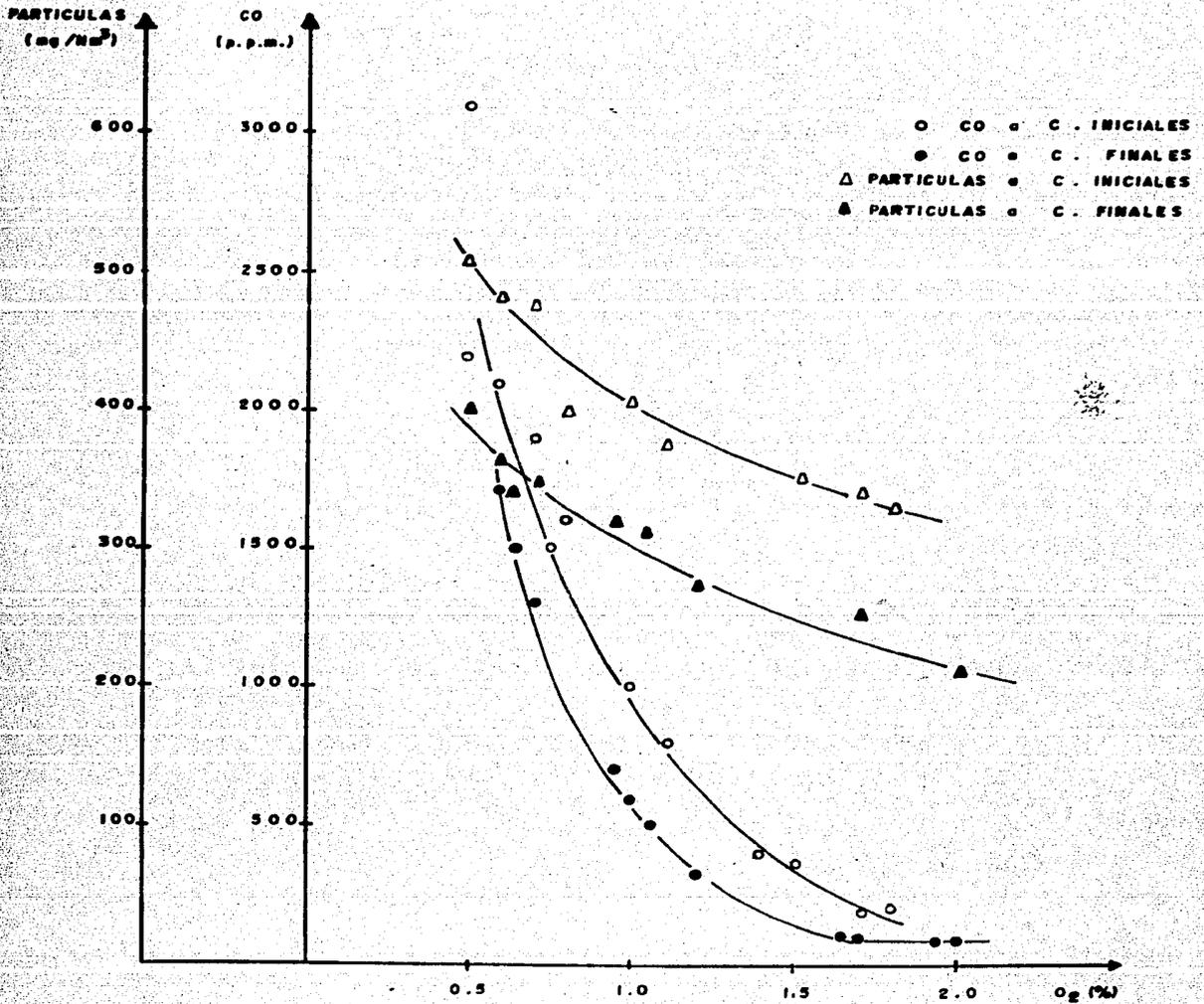


FIGURA 4.15 COMPARACION ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION EN CONDICIONES FINALES Y LA PRUEBA DE CONDICIONES INICIALES.

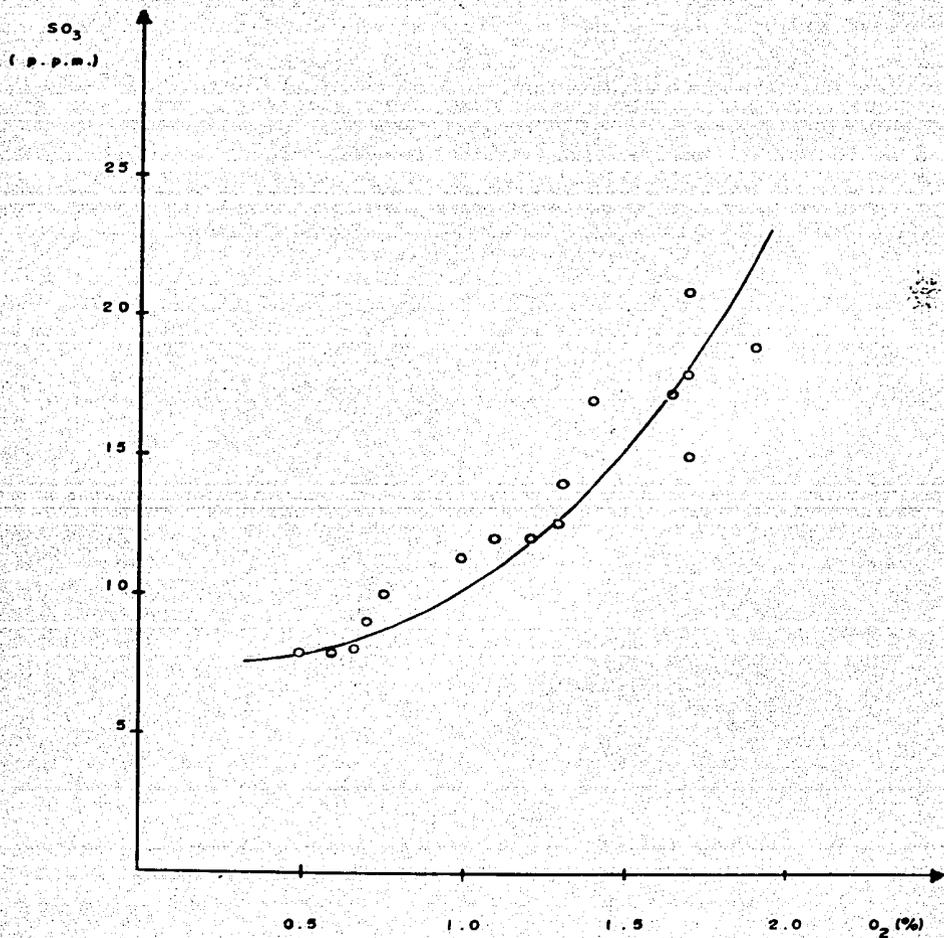


FIGURA 4.16 VARIACION DEL SO_3 EN FUNCION DEL OXIGENO PRESENTE EN LOS GASES DE COMBUSTION.

UNIDAD 3 CENTRAL TERMoeLECTRICA SALAMANCA.

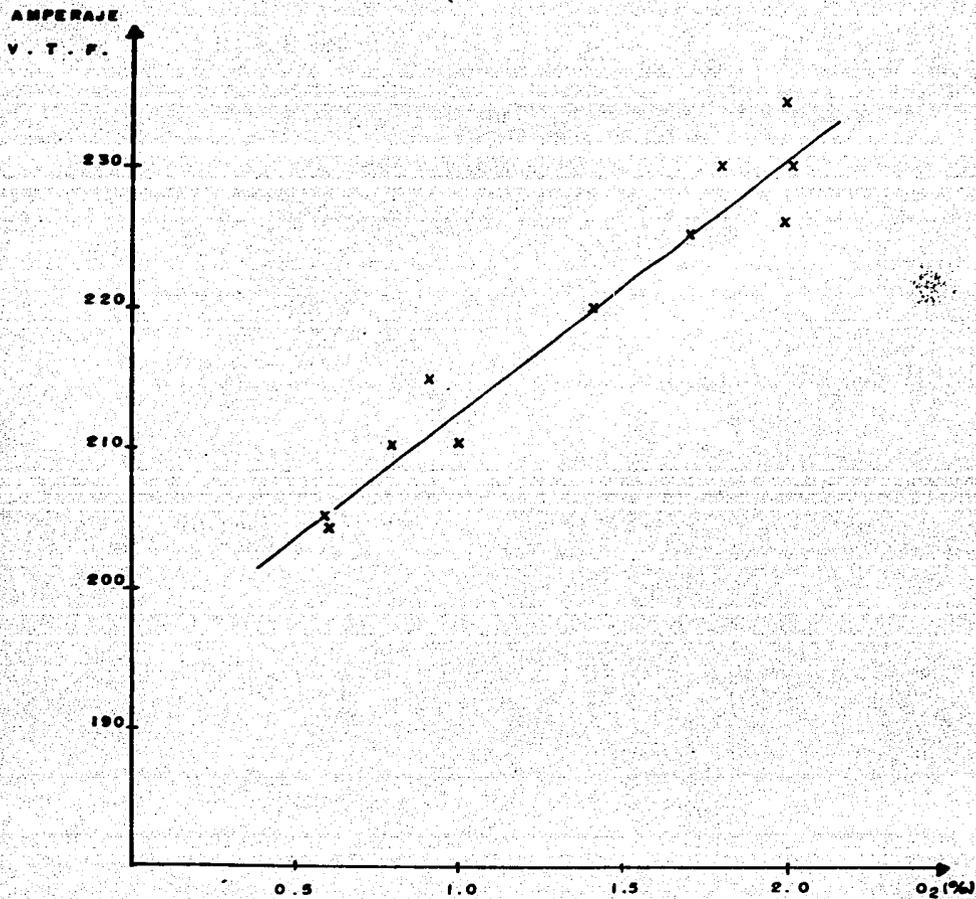


FIGURA 4.17 AMPERAJE EN V.T.F. CONTRA EL OXIGENO PRESENTE EN LOS GASES DE COMBUSTION.

4.1.7. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR DEL CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE Y DEL REGIMEN TERMICO BRUTO DE LA UNIDAD.

Tanto en las condiciones iniciales como en las finales, se determinaron la eficiencia del generador de vapor, el consumo especifico de combustible y el régimen térmico bruto de la unidad.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.21 y los cálculos realizados en el apéndice 2.

La eficiencia del generador obtenida con las mediciones del 21 de agosto (condiciones iniciales), fué 86.93%, esto es 1.19% menor que la eficiencia de diseño (88.12%). A su vez la eficiencia determinada con las mejores condiciones (87.72%) es solo 0.45% menor que la de diseño. El incremento de la eficiencia del generador de vapor fue de 0.79%.

El régimen térmico bruto y el consumo especifico de combustible son mayores en ambos casos a los valores de diseño. El régimen disminuyó de 2361.3604 kcal/KW-h en condiciones iniciales a 2282.64 kcal/KW-h en condiciones finales, siendo este valor 0.87% mayor que el de diseño (2263.0 kcal/KW-h).

El consumo especifico de combustible también disminuyó de 0.2365 kgcom/KW-h en condiciones iniciales a 0.2286 kgcom/KW-h. en condiciones finales, siendo este valor 1.3%

mayor que el de diseño (0.2208 kgcom/KW-h).

Tabla 4.21 VALORES OBTENIDOS EN EL CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR DEL CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE Y DEL REGIMEN TERMICO BRUTO DE LA UNIDAD.

	CONDICIONES INICIALES	CONDICIONES FINALES	DISEÑO
EFICIENCIA (%)	86.93	87.63	88.12
CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE (kgcom/KW-h)	0.2365	0.2286	0.2208
REGIMEN TERMICO BRUTO (kcal/KW-h)	2361.4	2282.64	2263.0

4.1.8. DETERMINACIONES COMPLEMENTARIAS

ANALISIS DE COMBUSTIBLE..

Se tomó una muestra de combustóleo correspondiente al segundo día de pruebas y se determinaron mediante análisis químico las propiedades reportadas en la tabla 4.22.

Del análisis anterior se observa que el contenido de asfaltenos es 14.30% y el de azufre 3.40%. Estos altos valores indican que se usó un combustible que presenta dificultades en su manejo, así como en su quemado.

La grafica 4.18 muestra la variación de la viscosidad del combustóleo en función de la temperatura.

COMPOSICION DE PARTICULAS CONTENIDAS EN LOS GASES DE COMBUSTION.

Las partículas se colectaron isocinéticamente durante cada prueba.

Se determinó la cantidad de carbono (%) y azufre (%), el primero proveniente del combustible inquemado y el segundo del SO_3 absorbido, así como del SO_2 y algunos sulfatos. Los resultados se muestran en la tabla 4.23.

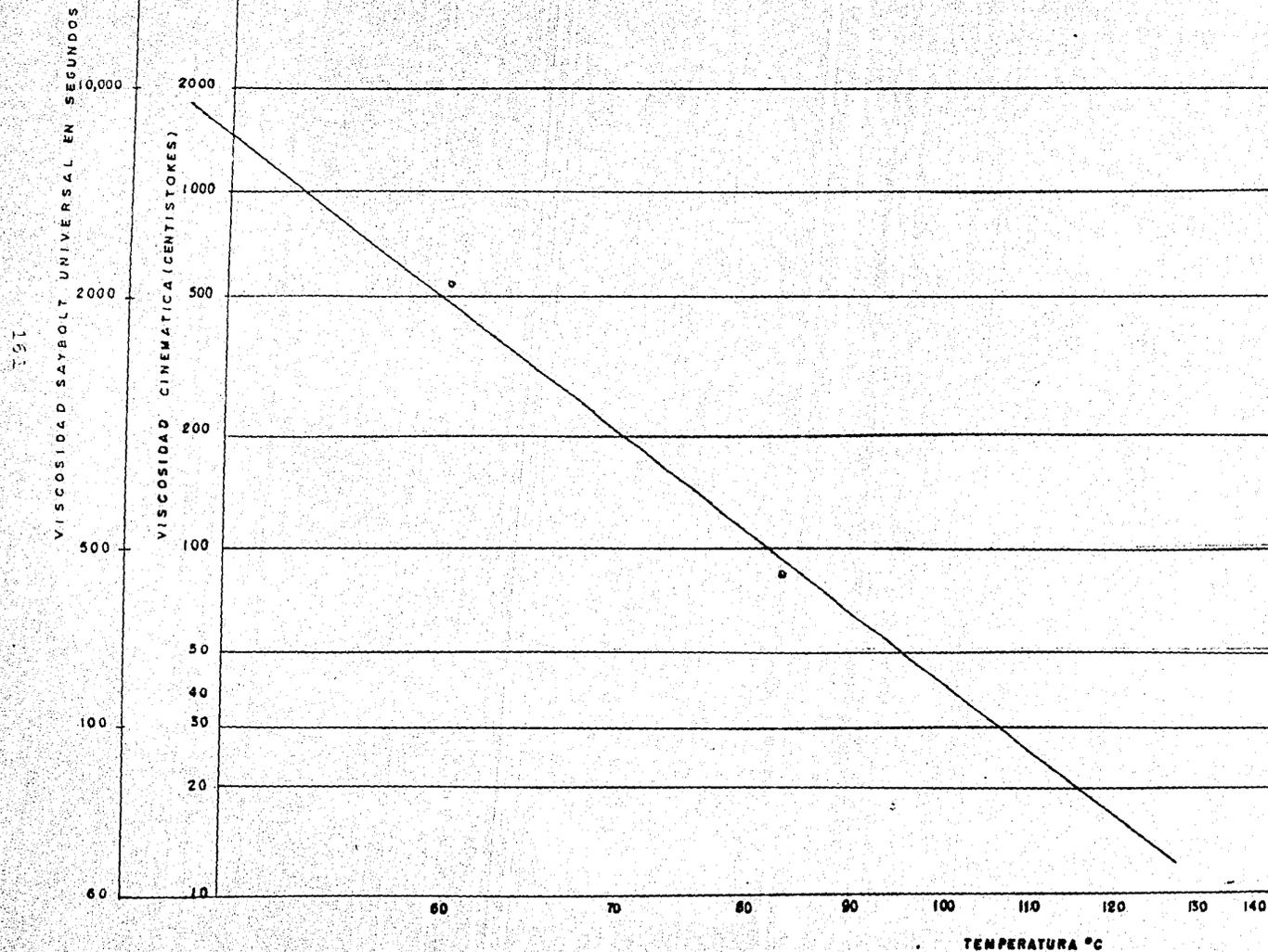


FIGURA 4.10 VARIACION DE LA VISCOSIDAD VS. TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE

DEPARTAMENTO DE COMBUSTIBLES FOSILES
LABORATORIO QUIMICO
ANALISIS QUIMICO

Tabla 4.22 ANALISIS DE COMBUSTOLEO.

Procedencia de la muestra	Salamanca
Número de muestra	1
fecha de muestreo	22 Agosto 1986
Tipo de análisis	-
Agua y sedimento % volumen	-
Agua por destilación % en volumen	-
Asfaltenos en nC ₅ % peso	14.30
Azufre % peso	3.40
Temperatura de inflamación: C	90.00
Viscosidad s.s.f. a 50: C	550.00
Viscosidad s.s.f. a 60: C	260.00
Viscosidad s.s.f. a 82.2:	38.50
Peso específico a 20/4: C	0.9902
OA.P.I	-
Estabilidad Térmica	-
Carbon Conradson % peso	13.88
Tension superficial Dinás/cm	-
Cenizas totales % en peso	0.042
Análisis Elemental (% peso)	
C	84.659
H	10.986
N	0.874
O	-

TABLA 4.23 COMPOSICION DE PARTICULAS. CONTENIDOS DE AZUFRE Y CARBONO

MUESTRA No.	COMPOSICION		CONDICIONES DE OPERACION.	
	% AZUFRE	% CARBONO	% OXIGENO	CANTIDAD mg/Nm ³
13	6.55	80.11	1.1	472.78
14	6.45	82.36	0.95	339.0
15	6.94	75.83	0.90	405.54
8	6.51	78.99	1.25	440.04
9	6.56	76.14	1.20	400.51
10	6.94	79.54	1.65	322.37

4.2. RESULTADOS OBTENIDOS EN UNA UNIDAD DE 150 MW

CON QUEMADORES FRONTALES.

Esta parte del trabajo se llevó a cabo en la unidad 5 de la Central Termoeléctrica Francisco Villa de Cd. Delicias Chihuahua, durante el período comprendido entre el 19 y el 29 de noviembre de 1986.

Las pruebas se realizaron con la unidad operando a plena carga, esto es generando 150 MW, de acuerdo con la secuencia de pruebas propuesta en el capítulo 3.

En cada prueba se modificó el exceso de aire llevando un registro continuo de la composición de los gases de combustión (O_2 , CO , SO_3 y partículas) en los dos ductos de entrada de gases a los precalentadores de aire regenerativos.

Las características del Generador de Vapor son las siguientes:

Marca: Babcock Hitachi.

Capacidad: 158 MW.

Condiciones del vapor:

Salida del Sobrecalentado: 540.6°C ; 130 kg/cm².

Salida del Recalentado: 540.6°C ; 31.2 kg/cm².

Sistema de Combustión: 12 quemadores de tipo frontal contrapuestos, colocados en dos niveles con 6 quemadores por nivel, con atomizador tipo Y de 6 orificios.

Sistema de control de temperatura del vapor

Recalentado: Recirculador de gases.

Atomización: con vapor.

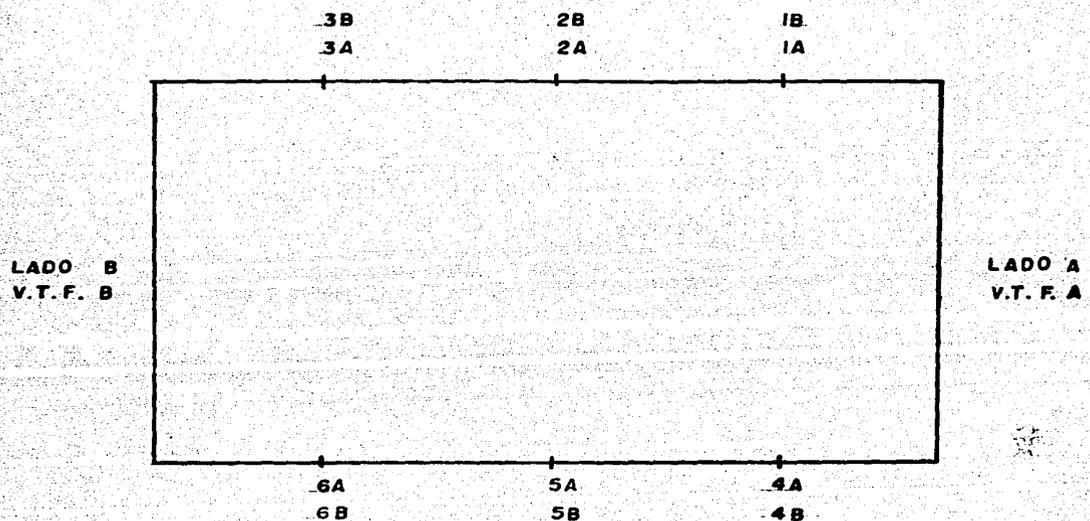
Hogar: presurizado.

Combustible: combustóleo.

Aditivo para combustible: Rolmex NMA-3. 1:3000

La figura 4.19 muestra un esquema de la posición y los niveles de quemadores con que cuenta la unidad.

POSICION DE QUEMADORES



NIVELES DE QUEMADORES

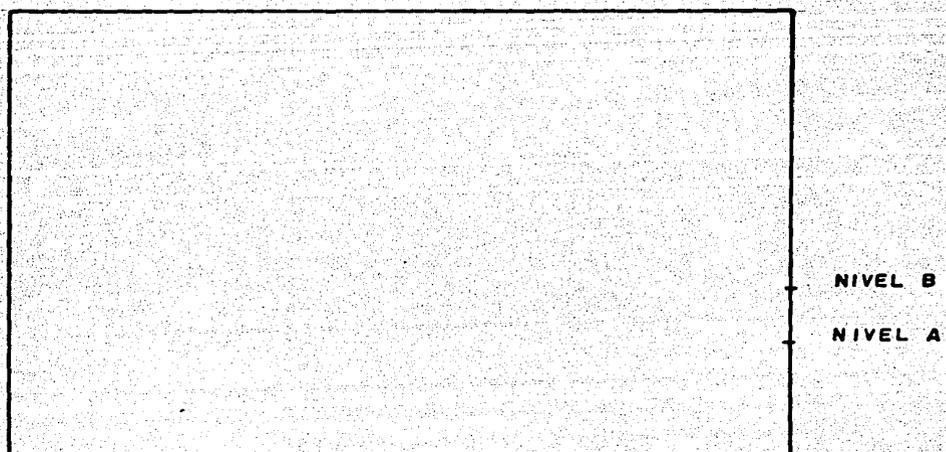


FIGURA 4.19 ESQUEMA DE LA POSICION Y LOS NIVELES DE QUEMADORES
CON QUE CUENTA LA UNIDAD 5 DE LA C.T. FCO. VILLA

4.2.1. MEDICIONES PRELIMINARES.

La prueba se realizó el día 20 de noviembre de 1986 con la unidad generando 150 MW. Las principales condiciones operativas con que se encontraba la unidad para esta prueba se presentan en la tabla 4.24.

La tabla 4.25 muestra los valores de las concentraciones de los productos de combustión encontrados al realizar el mapeo en los ductos de salida del economizador, con el objeto de determinar la posición de las sondas de muestreo.

De la tabla se observa que el punto 2.1 A y el 2.3 B son los representativos de las concentraciones medias de los productos de combustión, razón por la cual fueron elegidos para realizar los muestreos en las pruebas subsecuentes.

También puede verse que existía un desbalance en los ductos; así por ejemplo: en el punto 2.1 A se midieron concentraciones de 0.95 a 1.15% O_2 y 50 p.p.m. de CO, mientras que en el mismo punto pero del lado B se encontraron concentraciones de 1.1 a 1.35% de O_2 y 30 p.p.m. de CO.

Se establecieron los rangos de operación de los equipos los cuales fueron: 0 a 2.5% para el medidor de oxígeno, 0 a 1000 p.p.m. para el analizador de CO y 0 a 20 p.p.m. para el analizador de SO_3 .

La tabla 4.26 muestra los valores de las presiones de vapor y combustible con que fué realizada la prueba.

Cabe hacer mención que en esta prueba se hizo la observación de flamas a través de las mirillas para detectar síntomas de mala combustión (falta de brillantez, flama poco definida, presencia de zonas oscuras en la base de la flama y fluctuaciones de la misma) en los quemadores, debidas al desgaste de las fichas de atomización y al tiempo de operación de las mismas. La observación se realizaba antes y despues de la limpieza de quemadores por medio de vapor con el fin de tener información acerca del funcionamiento de quemadores.

TABLA 4.24 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
MEDICIONES PRELIMINARES.

CARGA: 150 MW

CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.5-2.2% medido en campo

SELECTORA DE EXCESO DE AIRE: 79% B.T.G.

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: -

PRESION: 20.4 kg/cm²

TEMPERATURA: 125:C

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 310:C

PRESION: 11kg/cm²

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 86%

TEMPERATURA: LADO A 348:C
LADO B 348:C

TEMPERATURA DE VAPOR A LA TURBINA:

SOBRECALENTADO: 538:C

RECALENTADO: 537:C

PRESION EN EL DOMO: 139 kg/cm²

QUEMADORES:

E/S: 12

F/S: -

U.T.F.(ventilador de tiro forzado): LADO A 140 A o 100%

LADO B 139 A o 95%

POSICION DE LAS COMPUERTAS DE

AIRE A QUEMADORES: 100% de apertura.

TABLA 4.25 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS DURANTE LA PRUEBA DE MEDICIONES PRELIMINARES.

LADO A

	1	2	3
1.	.	.	.
2.	.	.	.
3.	.	.	.

LADO B

	1	2	3
1.	.	.	.
2.	.	.	.
3.	.	.	.

PUNTO	LADO A		LADO B	
	No.	O ₂	CO	O ₂ . CO
1.1	1.1	1.3-1.50	25-30	0.9-1.1 . 30
1.2	1.2	-	-	-
1.3	1.3	1.1-1.30	40	1.2-1.4 . 25
2.1	2.1	0.9-1.10	50	1.1-1.3 . 30
2.2	2.2	-	-	-
2.3	2.3	0.9-1.30	40	1.5-1.7 . 20
3.1	3.1	0.8-1.05	45	0.8-1.1 . 50
3.2	3.2	-	-	-
3.3	3.3	-	-	-

TABLA 4.26 VALORES DE LAS PRESIONES DE VAPOR
Y COMBUSTIBLE PARA LA PRUEBA DE
MEDICIONES PRELIMINARES.

QUEMADORES.	PRESION COMBUSTIBLE. kg/cm ²	PRESION VAPOR kg/cm ²
1.A	19.5	11.0
2.A	19.2	11.1
3.A	19.2	11.2
4.A	20.0	11.0
5.A	19.0	11.5
6.A	19.5	11.0
1.B	19.3	11.0
2.B	20.0	11.0
3.B	18.5	11.1
4.B	19.9	11.1
5.B	19.8	11.0
6.B	20.5	11.2

4.2.2. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION

A 150 MW EN CONDICIONES INICIALES.

La prueba se realizó el día 21 de noviembre de 1986, con la unidad generando 150 MW, variando el exceso de aire y analizando el comportamiento del sistema de combustión mediante la medición de la composición de los productos de combustión.

Se procedió a la observación de flamas en las cuales se notó que el quemador 3.A y 1.B presentaban problemas de mala combustión, se comprobó que las fichas de atomización presentaban deterioro, por lo que fueron substituidas por fichas nuevas.

Las condiciones con que se encontraba operando la unidad para esta prueba se muestran en la tabla 4.27, la tabla 4.28 muestra los valores promedio de las concentraciones de los productos de combustión medidos durante la prueba.

Debido a que en esta unidad, la forma y disposición de los puestos de toma de muestra no permitieron un registro simultáneo de las concentraciones de CO, O₂ y Partículas en los dos ductos de salida del economizador, los valores de concentración que se reportan corresponden al promedio entre ambos.

En la figura 4.20 se grafican las concentraciones de CO y Partículas en función del oxígeno presente en los gases de combustión, la cual representa el comportamiento del sistema

de combustión en las condiciones de esta prueba.

Como puede observarse en dicha figura, al sustituir las fichas de atomización deterioradas de los quemadores 3A y 1B por otras nuevas, los valores de CO y Partículas se ubican sobre una misma curva para ambos ductos de salida de gases en sus correlaciones con O_2 .

TABLA 4.27 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION
A 150 MW. (CONDICIONES INICIALES).

CARGA: 150 MW

CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.3-1.1% medido en campo.

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: 37 T/Hr.

PRESION: 20.5 kg/cm²

TEMPERATURA: 125:C

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 310:C

PRESION: 10.5 kg/cm²

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 84%

TEMPERATURA: LADO A 303:C
LADO B 302:C

TEMPERATURA DE VAPOR A LA TURBINA:

SOBRECALENTADO: 535:C
RECALENTADO: 535:C

PRESION EN EL DOMO: 138 kg/cm²

QUEMADORES:

E/S: 12
F/S: -

V.T.F (ventilador de tiro forzado): LADO A 94% 132 A
LADO B 88% 130 A

POSICION DE LAS COMPUERTAS DE AIRE
A QUEMADORES: 100%

TABLA 4.28 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 150 MW (CONDICIONES INICIALES).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₃		% SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B. T. G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	T _c °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V. T. F		AGUA DE ATEMPERACION T/h
	% vol		P. P. M		mg/Nm ³		P. P. M					E/S	F/S		A	B	
	A	B	A	B	A	B	A	B									
1	0.35	0.35	800	800	1075	1075	-	-	7.0	10.5	125	12	-	-	128	128	-
2	0.40	0.40	600	600	-	-	5	5	7.2	10.5	125	12	-	85	128	128	-
3	0.50	0.50	350	350	-	-	-	-	7.4	10.5	125	12	-	85	132	132	-
4	0.6	0.6	220	220	-	-	8	8	7.5	10.5	125	12	-	86	132	132	-
5	0.7	0.7	140	140	800	800	-	-	7.6	10.5	125	12	-	86	140	140	-
6	0.8	0.8	80	80	700	700	13	13	8.0	10.5	125	12	-	87	140	140	-
7	1.0	1.0	50	50	650	650	15	15	8.1	10.5	125	12	-	87	140	140	-

UNIDAD 3 CENTRAL TERMOELECTRICA FCO. VILLA

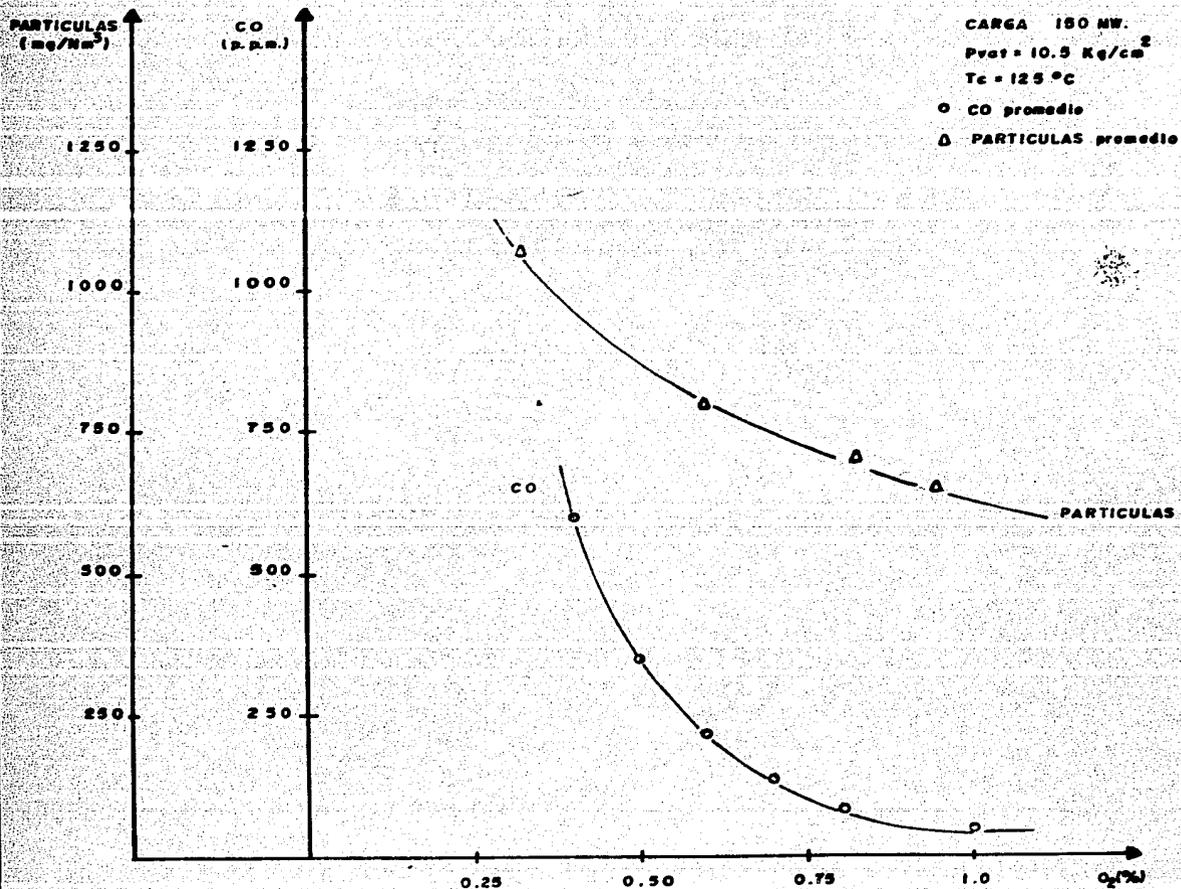


FIGURA 4.20 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 300 MW EN CONDICIONES INICIALES.

4.2.3 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

Esta prueba se realizó en dos días diferentes (22 y 24 de noviembre de 1986) con la unidad generando 150 MW.

Las temperaturas de combustible con que fue realizada la prueba fuerón: 135 y 115°C a una presión de vapor de atomización de 10.5 kg/cm². Antes de llevar a cabo la primera prueba (Tc=135°C) se realizó limpieza de quemadores por medio de vapor.

En las figuras 4.21 y 4.22 se muestran las correlaciones entre el contenido de CO y partículas de los gases de combustión en función del oxígeno presente, las cuales representan el comportamiento que presentó el sistema de combustión al operar con las temperaturas de combustible de 135 y 115°C respectivamente.

La figura 4.23 muestra la comparación entre los resultados obtenidos en la prueba comportamiento del sistema de combustión a 150 MW (Tc=125°C, condiciones iniciales figura 4.20), con los resultados obtenidos en esta prueba.

Como se puede observar al aumentar la temperatura de combustible de 125 a 135°C se tiene un pequeño aumento en la producción de CO, existiendo una disminución en la producción de partículas inquemadas, mientras que al operar el sistema de combustión a una temperatura de combustible de 115°C se obtiene una disminución en la formación de CO,

pero la producción de partículas inquemadas aumenta.

La figura 4.24 (tomada a un corte de $O_2 = cte = 0.5\%$ en la figura 4.23), muestra el aumento en la producción de CO (de 240 p.p.m. a $T_c = 115^\circ C$ hasta 360 p.p.m. a $T_c = 135^\circ C$), mientras que se nota la disminución en la producción de partículas inquemadas (de 1000 a 850 mg/Nm^3) al aumentar la temperatura.

Las condiciones operativas de la unidad y los valores de las concentraciones de los productos de combustión obtenidos a una temperatura de combustible igual a $135^\circ C$ se presentan en las tablas 4.29 y 4.30 respectivamente; las tablas 4.31 y 4.32 muestran los parámetros operativos y los valores de las concentraciones de los productos de combustión medidos al operar el sistema de combustión a una temperatura de combustible de $115^\circ C$.

TABLA 4.29 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE(135:C)

CARGA:150 MW.

CONCENTRACION DE OXIGENO:0.1-1.2%

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: 37 T/hr.

PRESION: 20 kg/cm2.

TEMPERATURA: 135:C.

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 310:C.

PRESION: 10.5 kg/cm2.

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 83%

TEMPERATURA: LADO A 305:C.

LADO B 303:C.

TEMPERATURA DE VAPOR A LA TURBINA:

SOBRECALENTADO: 535:C.

RECALENTADO: 535:C.

PRESION EN EL DOMO: 138 kg/cm2.

QUEMADORES:

E/S: 12.

F/S: -.

V.T.F.(ventilador de tiro forzado): LADO A 91% 129 A.

LADO B 87% 129 A.

POSICION DE LAS COMPUERTAS DE AIRE A

QUEMADORES: 100% de apertura.

TABLA 4.30 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE (T_c=135).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₃		%SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B.T.G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	T _c °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE	AMPERAJE V.T.F		AGUA DE ATEMPERACION
	%vol.		P.P.M.		mg/Nm ³		P.P.M.					E/S	P/S	T/h	A	B	T/h
	A	B	A	B	A	B	A	B									
1	0.35	0.35	980	980	-	-	-	-	7.3	10.5	135	12	-	81	121	121	-
2	0.40	0.40	740	740	966	966	6.0	6.0	7.3	10.5	135	12	-	81	121	121	-
3	0.50	0.50	460	460	-	-	-	-	7.4	10.5	135	12	-	82	122	122	-
4	0.6	0.6	280	280	-	-	-	-	7.5	10.5	135	12	-	82	122	122	-
5	0.7	0.7	180	180	-	-	-	-	7.5	10.5	135	12	-	83	126	126	-
6	0.8	0.8	110	110	700	700	12	12	7.6	10.5	135	12	-	83	126	126	-
7	0.9	0.9	60	60	-	-	-	-	7.7	10.5	135	12	-	84	127	127	-

TABLA 4.31 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE(Tc=115:C).

CARGA: 150 MW.

CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.3-1.1%

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: 36 T/hr.

PRESION: 21 kg/cm2.

TEMPERATURA: 115:C.

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 315:C.

PRESION: 10.5 kg/cm2.

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 82%

TEMPERATURA: LADO A 306:C.

LADO B 306:C.

TEMPERATURA DE VAPOR A LA TURBINA:

SOBRECALENTADO: 535:C.

RECALENTADO: 535:C.

PRESION EN EL DOMO: 135 kg/cm2.

QUEMADORES:

E/S : 12

F/S : -

V.T.F.(ventilador de tiro forzado): LADO A 83% 121 A.
LADO B 78% 121 A.

POSICION DE LAS COMPUERTAS DE AIRE A

QUEMADORES: 100% DE APERTURA..

TABLA 4.32 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE (Tc=115 C).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₂		%SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B.T.G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm	Tc °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V.T.F		AGUA DE ATENPERACION T/h
	% vol.		p.p.m		mg/Nm ³		p.p.m					E/S	F/S		A	B	
	A	B	A	B	A	B	A	B									
1	0.40	0.40	420	420	1075	1075	6.0	6.0	7.3	10.5	115	12	-	81	121	121	-
2	0.50	0.50	220	220	-	-	-	-	7.4	10.5	115	12	-	82	122	122	-
3	0.6	0.60	110	110	950	950	9.0	9.0	7.5	10.5	115	12	-	82	124	124	-
4	0.70	0.70	70	70	-	-	-	-	7.5	10.5	115	12	-	83	126	126	-
5	0.80	0.80	50	50	-	-	-	-	7.6	10.5	115	12	-	83	129	129	-
6	0.90	0.90	40	40	-	-	-	-	7.7	10.5	115	12	-	84	129	129	-
7	1.12	1.12	20	20	475	475	-	-	7.8	10.5	115	12	-	85	131	131	-

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA .

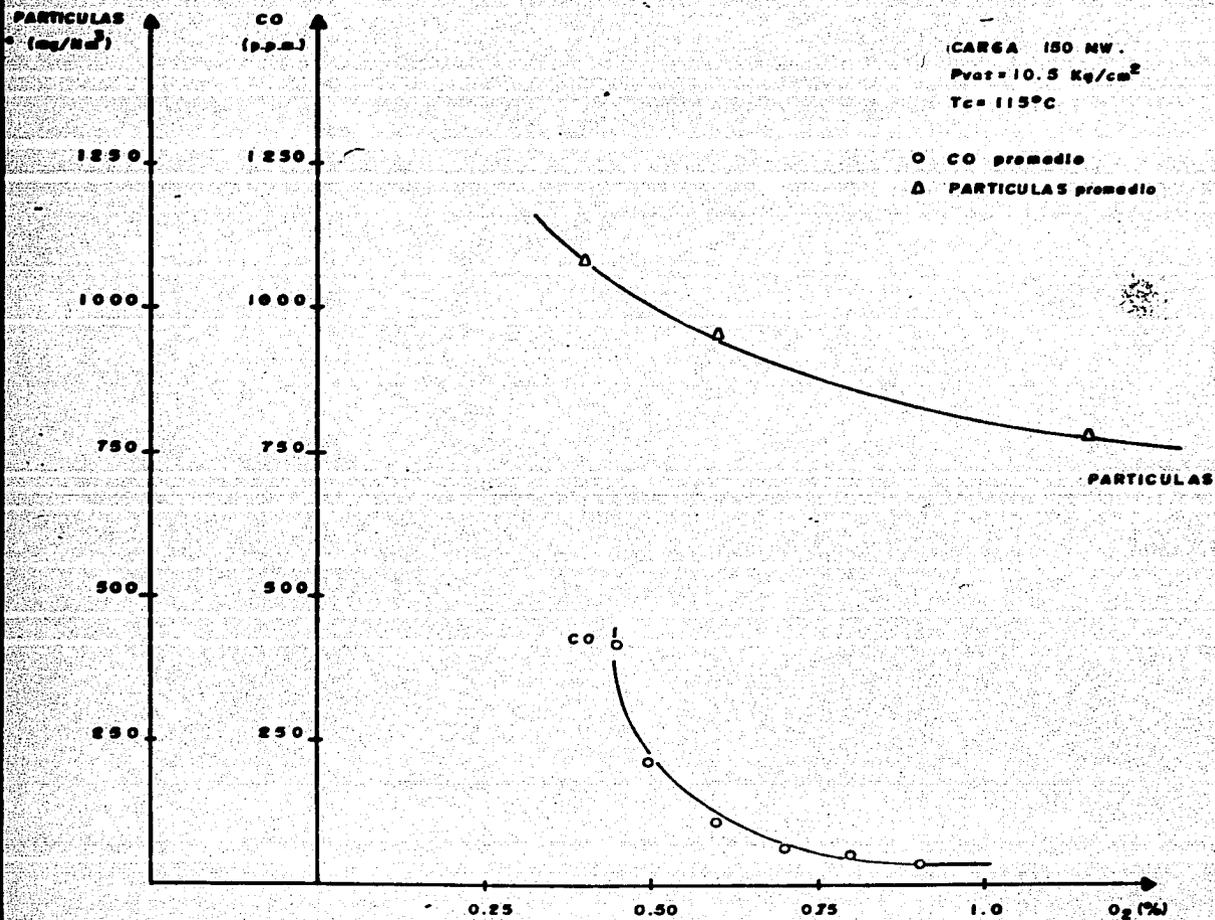


FIGURA 4.21 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE IGUAL A 115°C .

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA.

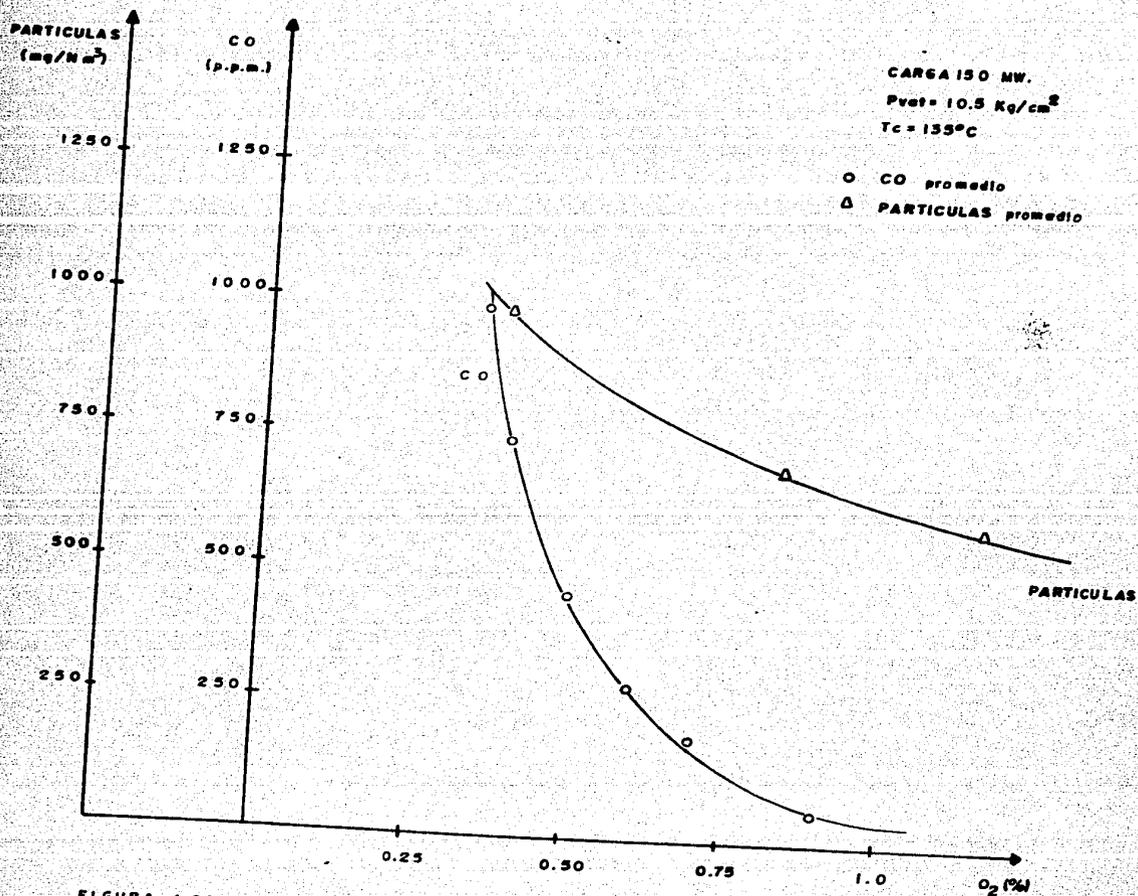


FIGURA 4.22 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE IGUAL A 135°C.

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA

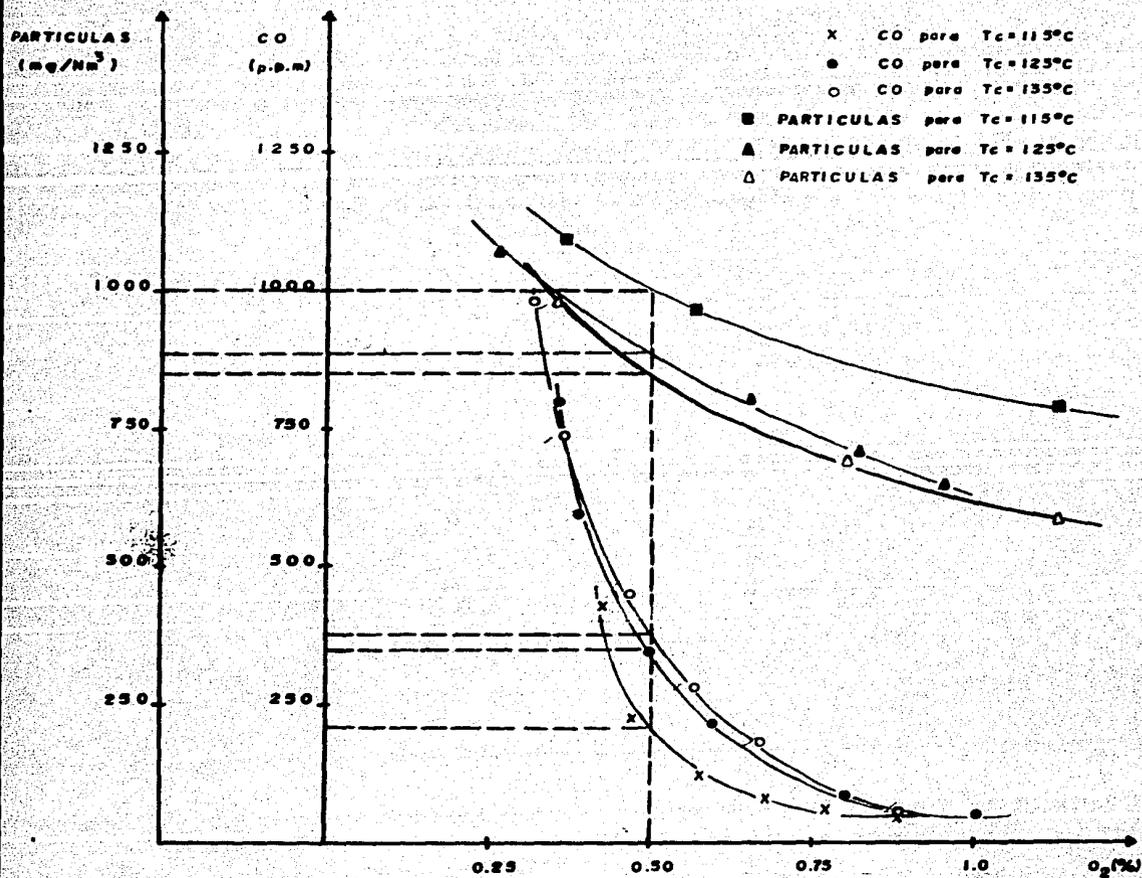


FIGURA 4.25 COMPARACION ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON LAS TEMPERATURAS DE COMBUSTIBLE DE 115 Y 135°C, CON LA PRUEBA DE CONDICIONES INICIALES ($T_c = 125^\circ\text{C}$ FIGURA 4.20).

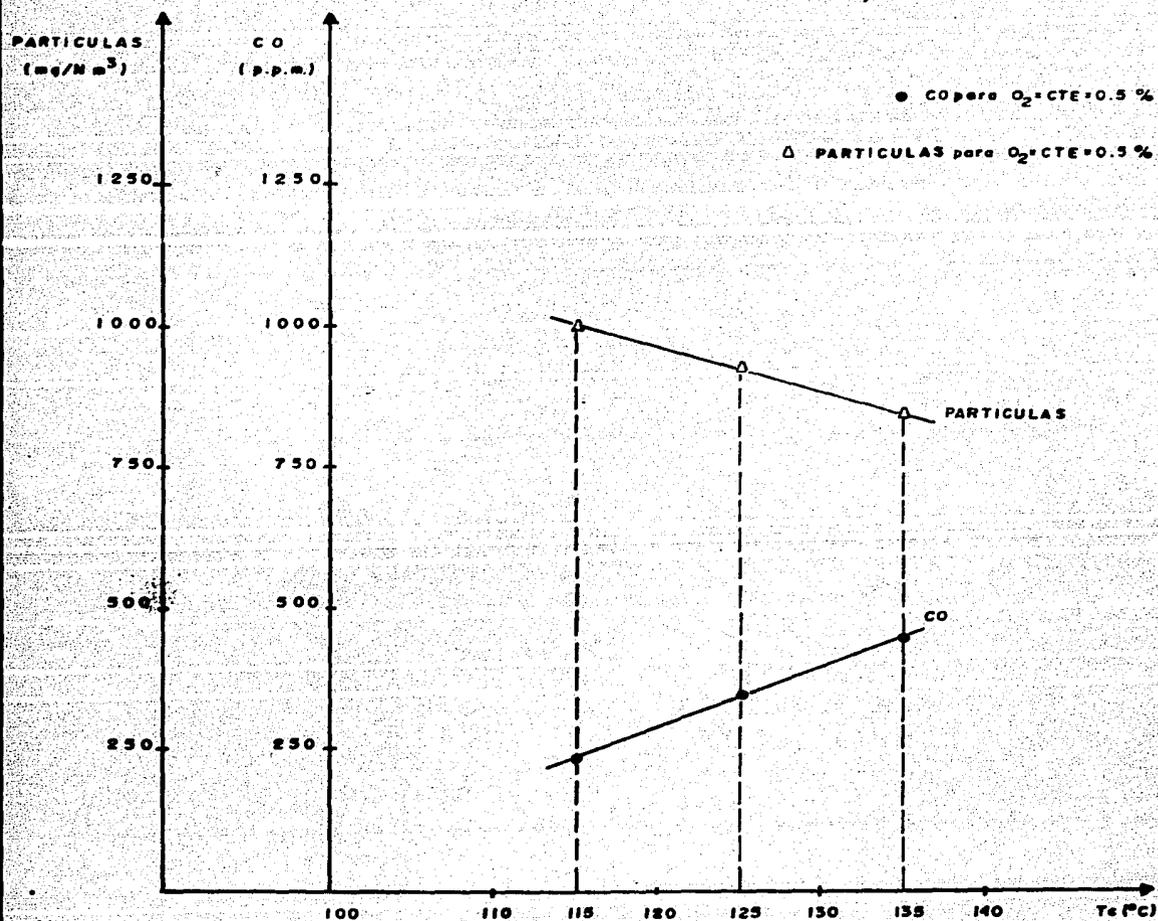


FIGURA 4.24 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE COMBUSTIBLE EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

4.2.4 INFLUENCIA DE LA PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

La prueba se realizó el día 25 de noviembre de 1986 con la unidad generando 150 MW.

Las presiones de vapor con las que se realizaron las pruebas fueron: 8.5 y 12.5 kg/cm²; estas presiones fueron medidas en el cabezal de vapor.

Los parámetros operativos de la unidad y los valores de las concentraciones de los productos de combustión obtenidos al operar el sistema de combustión a una presión de vapor de atomización igual a 8.5 kg/cm² se muestran en las tablas 4.33 y 4.34 respectivamente; las tablas 4.35 y 4.36 presentan las condiciones operativas de la unidad y los valores de las concentraciones de los productos de combustión obtenidos al operar el sistema de combustión a una presión de vapor de atomización de 12.5 kg/cm².

Las figuras 4.25 y 4.26 representan el comportamiento del sistema de combustión al operar con las presiones de vapor de 8.5 y 12.5 kg/cm² respectivamente, en estas se grafican las concentraciones de CO y partículas en función del oxígeno presente en los gases de combustión.

En la figura 4.27 se realiza la comparación de los resultados obtenidos en esta prueba, con los de la prueba comportamiento del sistema de combustión a 150 MW ($P_{vat}=10.5$ kg/cm², condiciones iniciales figura 4.20).

Como se puede apreciar al disminuir la presión de vapor de atomización se tiene un empeoramiento en la combustión, ya que se presenta un aumento substancial en la producción de monóxido de carbono y partículas inquemadas, ocurriendo lo contrario cuando el sistema de combustión opera con una presión de vapor de atomización de 12.5 kg/cm².

La figura 4.28 (tomada a un corte de $O_2 = cte = 0.5\%$ de la figura 4.27), muestra las reducciones en las concentraciones de CO y partículas (de 320 p.p.m. y 875 mg/Nm³ a 100 p.p.m. de CO y 670 mg/Nm³ de partículas) al aumentar la presión de vapor de 10.5 a 12.5 kg/cm².

TABLA 4.33 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION.
($P_{vat}=8.5 \text{ kg/cm}^2$).

CARGA: 150 MW.

CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.3-1.2%

COMBUSTIBLE A QUEMADORES:

FLUJO: 37.5 T/hr.

PRESION: 17.5 kg/cm²

TEMPERATURA: 125:C

VAPOR DE ATOMIZACION:

TEMPERATURA: 320:C

PRESION: 8.5 kg/cm²

AIRE DE COMBUSTION:

FLUJO: 84%

TEMPERATURA: LADO A 310:C
LADO B 309:C

TEMPERATURA DE VAPOR A LA TURBINA:

SOBRECALENTADO: 538:C
RECALENTADO: 531:C

PRESION EN EL DOMO: 136 kg/cm²

QUEMADORES:

E/S : 12
E/S :-

V.T.F.(ventilador de tiro forzado): LADO A 89% 129 A
LADO B 82% 129 A

POSICION DE LAS COMPUERTAS DE AIRE

A QUEMADORES: 100% DE APERTURA.

TABLA 4.34 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION (8.5 Kg/cm²).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₂		% SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B. T. G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm	T _c °C	QUEMADORES		FLUJODE AIRE T/h	AMPERAJE V. T. F		AGUA DE ATEMPERACION T/h
	% vol.		p. p. m		mg/Nm ³		p. p. m					E/S	E/S		A	B	
	A	B	A	B	A	B	A	B									
1	0.40	0.40	-	-	1425	1425	6.0	6.0	7.4	8.5	125	12	-	83	118	118	-
2	0.46	0.46	550	550	-	-	-	-	7.4	8.5	125	12	-	83	118	118	-
3	0.50	0.50	420	420	-	-	-	-	7.5	8.5	125	12	-	84	120	120	-
4	0.60	0.60	250	250	-	-	-	-	7.5	8.5	125	12	-	85	122	122	-
5	0.70	0.70	130	130	1151	1151	9.5	9.5	7.6	8.5	125	12	-	85	122	122	-
6	0.80	0.80	65	65	-	-	-	-	7.6	8.5	125	12	-	86	124	124	-
7	0.90	0.90	30	30	-	-	-	-	7.7	8.5	125	12	-	86	125	125	-
8	1.0	1.0	20	20	969	969	25	25	8.0	8.5	125	12	-	87	129	129	-

TABLA 4.35 PARAMETROS OPERATIVOS PARA LA PRUEBA DE
PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION.
($P_{vat}=12.5 \text{ kg/cm}^2$).

CARGA: 150 MW
CONCENTRACION DE OXIGENO: 0.3-1.2%
COMBUSTIBLE A QUEMADORES:
FLUJO: 37.5 T/hr.
PRESION: 21.5 kg/cm²
TEMPERATURA: 125:C
VAPOR DE ATOMIZACION:
TEMPERATURA: 315:C
PRESION: 12.5 kg/cm²
AIRE DE COMBUSTION:
FLUJO: 83%
TEMPERATURA: LADO A 309:C
LADO B 309:C
TEMPERATURA DE VAPOR A LA TURBINA:
SOBRECALENTADO: 530:C
RECALENTADO: 528:C
PRESION EN EL DOMO: 137 kg/cm²
QUEMADORES:
E/S: 12
F/S:-
U.T.F.(ventilador de tiro forzado): LADO A 88% 125 A
LADO B 84% 126 A
POSICION DE LAS COMPUERTAS DE AIRE
A QUEMADORES: 100% DE APERTURA

TABLA 4.36 VALORES DE LAS CONCENTRACIONES DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION (12.5 Kg/cm²).

	O ₂		CO		PARTICULAS		SO ₃		%SELECTORA DE EXCESO DE AIRE (B.T.G)	PRESION VAPOR DE ATOMIZACION Kg/cm ²	Tc °C	QUEMADORES		FLUJO DE AIRE T/h	AMPERAJE V.T.F.		AGUA DE ATEMPERACION T/h
	% vol		p.p.m		mg/Nm ³		p.p.m.					E/S	F/S		A	B	
	A	B	A	B	A	B	A	B									
1	0.20	0.20	850	850	-	-	-	-	7.2	12.5	125	12	-	80	116	116	-
2	0.30	0.30	420	420	-	-	-	-	7.3	12.5	125	12	-	81	116	116	-
3	0.40	0.40	210	210	787	787	-	-	7.4	12.5	125	12	-	83	118	118	-
4	0.50	0.50	120	120	-	-	-	-	7.5	12.5	125	12	-	84	120	120	-
5	0.60	0.60	60	60	-	-	-	-	7.5	12.5	125	12	-	85	122	122	-
6	0.65	0.65	50	50	575	575	8.5	8.5	7.6	12.5	125	12	-	86	124	124	-
7	0.70	0.70	40	40	-	-	12	12	7.6	12.5	125	12	-	86	124	124	-
8	0.80	0.80	40	40	-	-	-	-	7.8	12.5	125	12	-	87	125	125	-
9	1.12	1.12	-	-	475	475	25	25	8.3	12.5	125	12	-	88	129	129	-

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA .

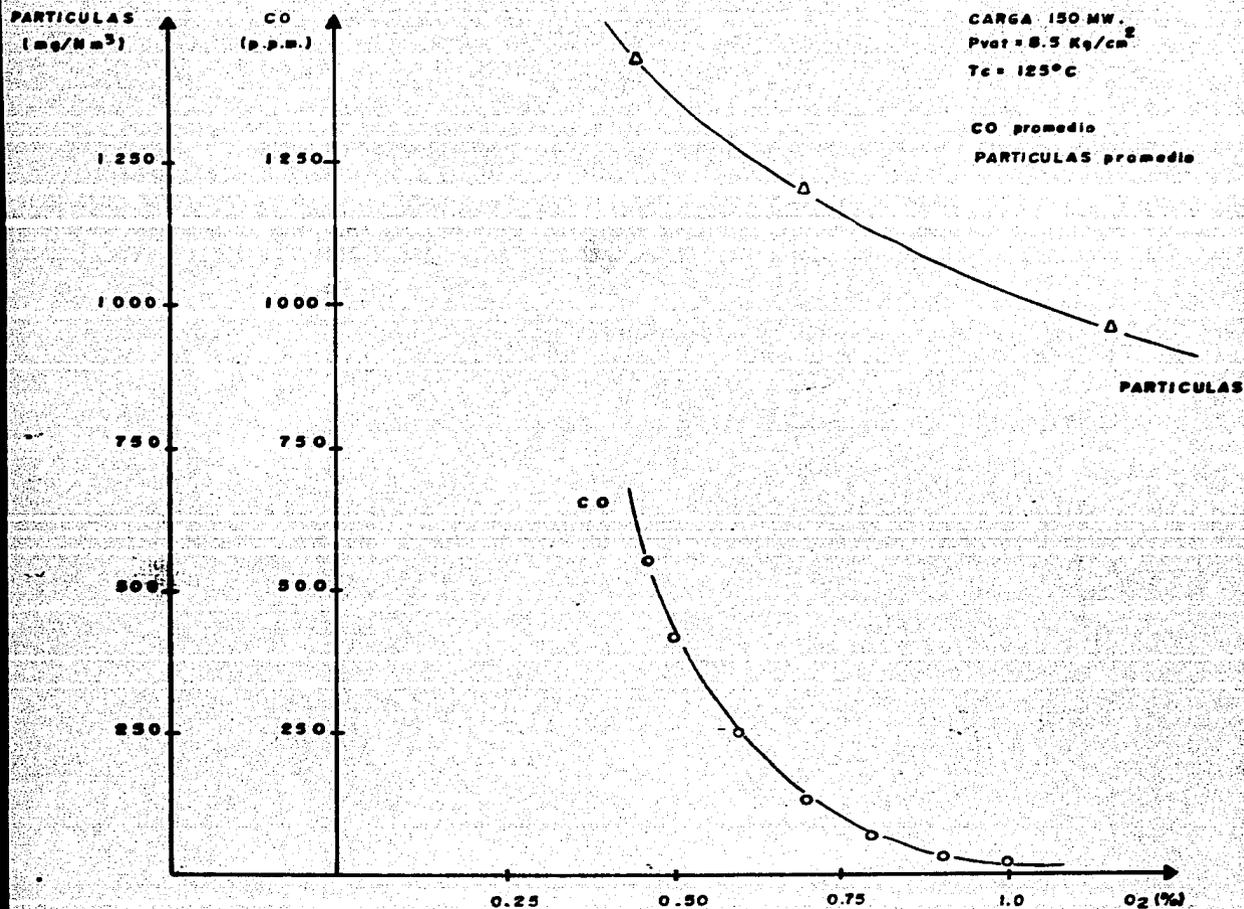


FIGURA 4.25 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION IGUAL A 8.5 Kg/cm²

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA.

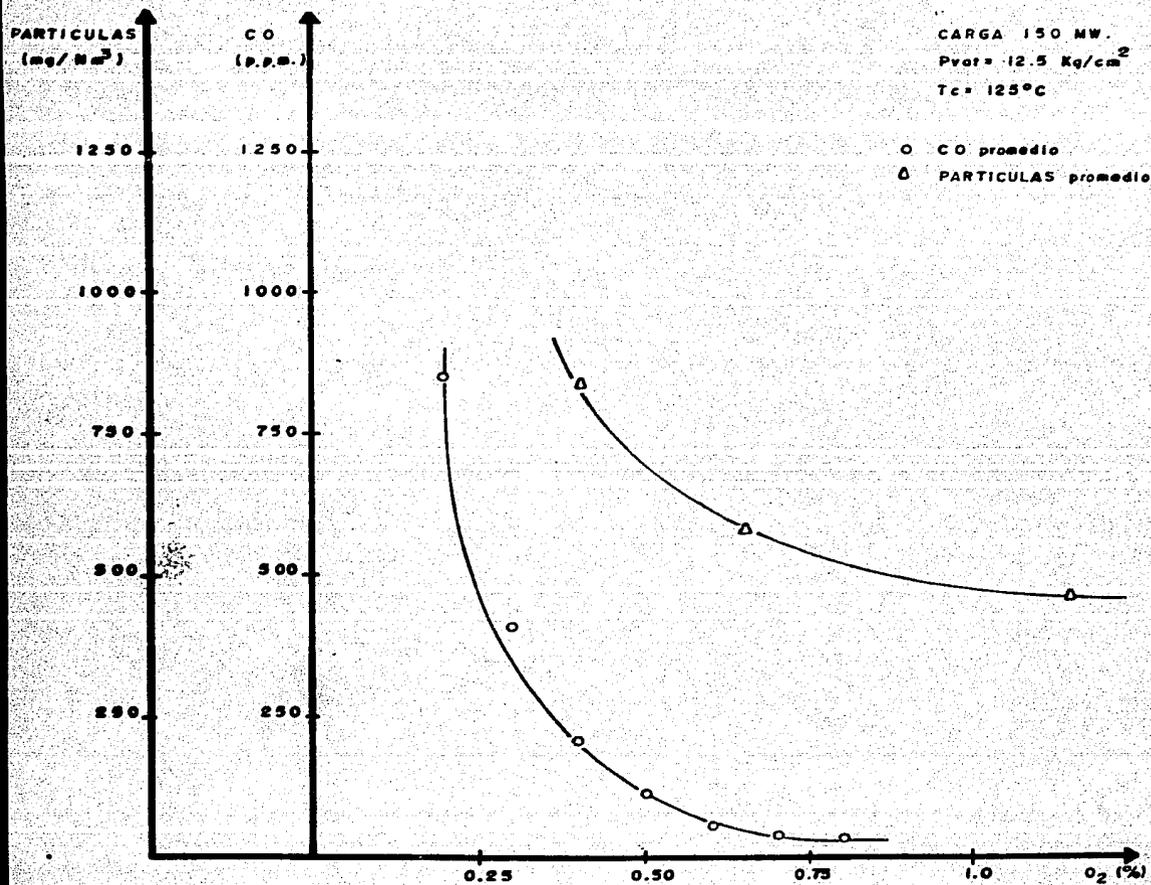


FIGURA 4.26 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON UNA PRESION DE VAPOR DE ATOMIZACION IGUAL A 12.5 Kg/cm^2 .

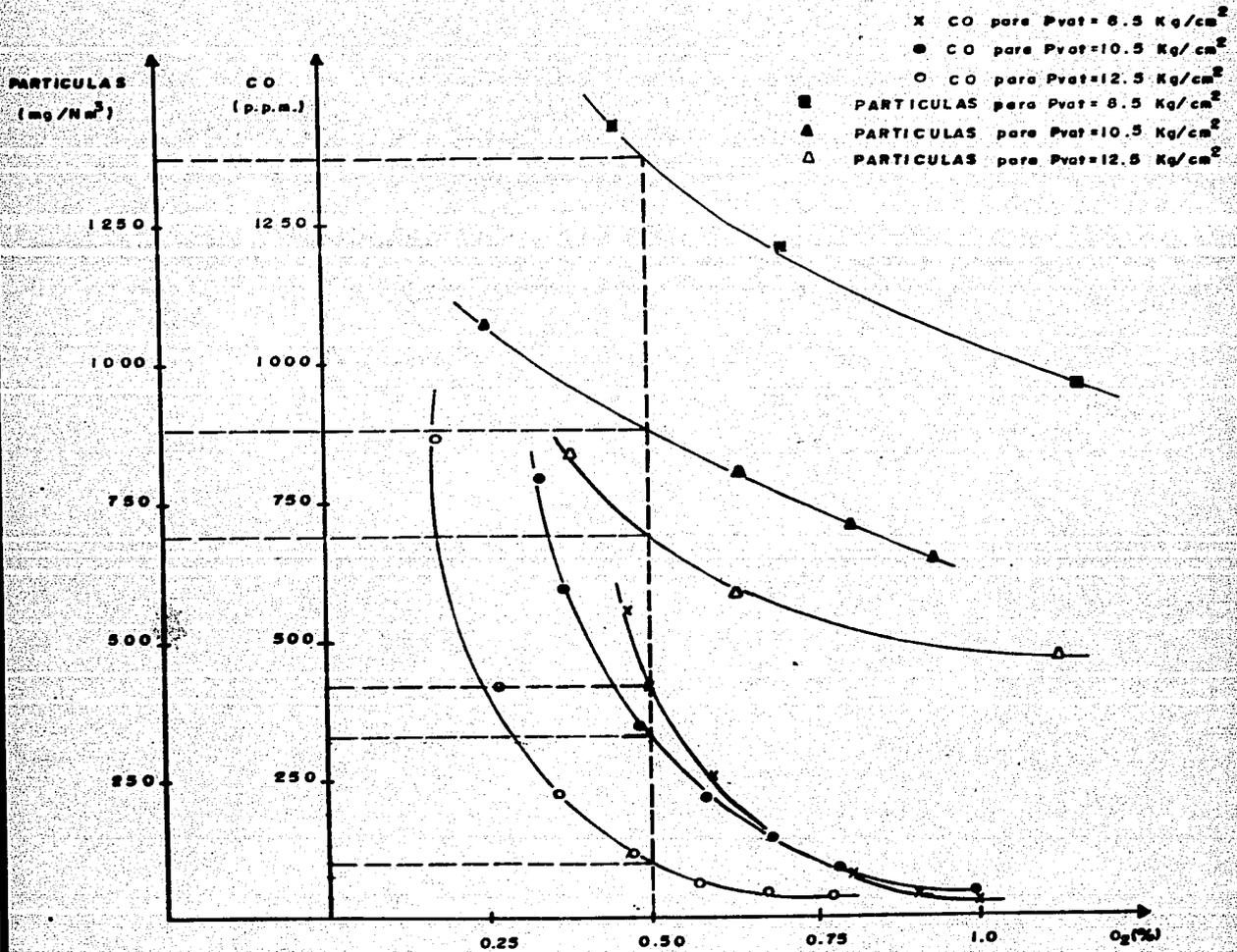


FIGURA 4.27 COMPARACION ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION OPERANDO CON LAS PRESIONES DE VAPOR DE 8.5 y 12.5 Kg/cm², Y LA PRUEBA DE CONDICIONES INICIALES (P_{vat} = 10.5 Kg/cm², FIGURA 4.20).

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA .

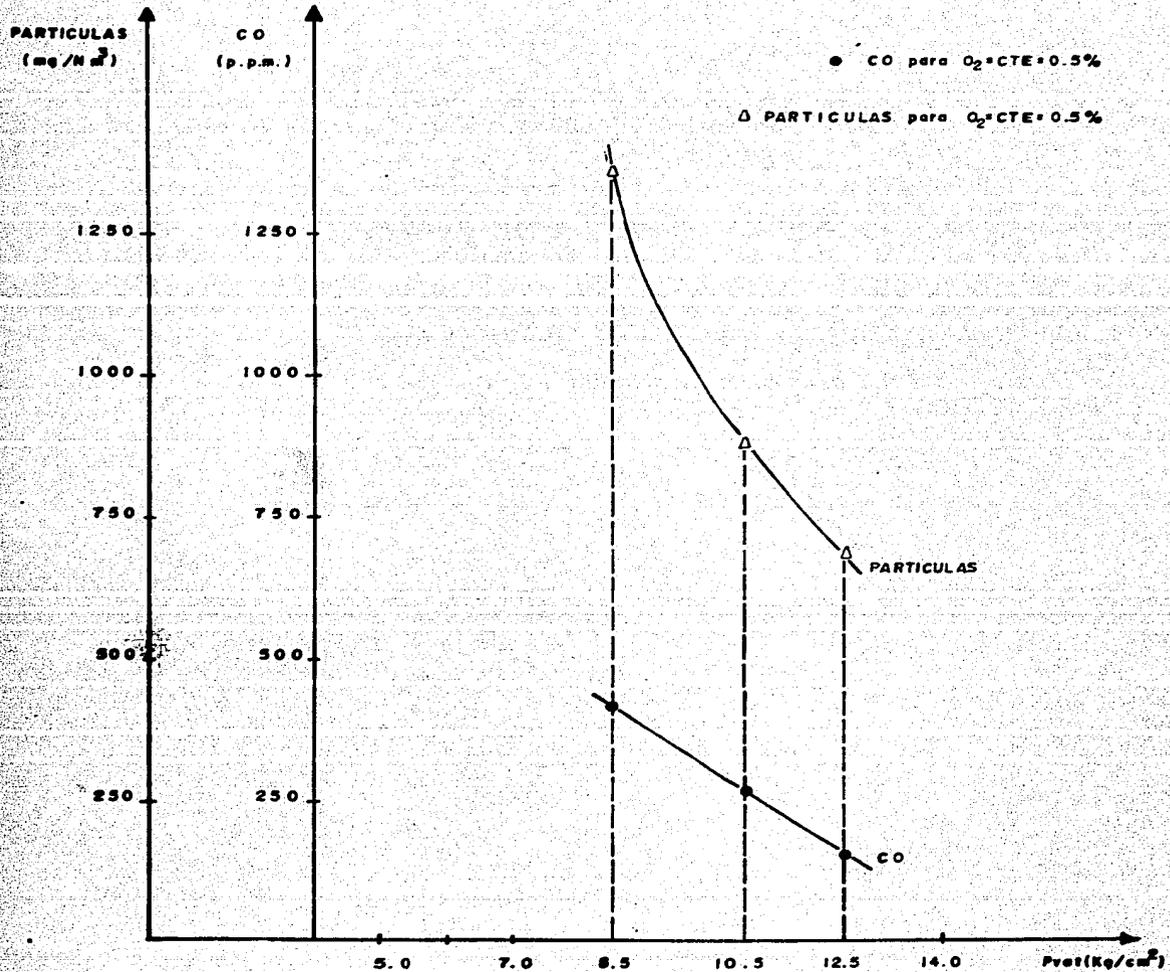


FIGURA 4.28 INFLUENCIA DE LA PRESION DEL VAPOR DE ATOMIZACION EN EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION.

4.2.5. COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION A 150 MW (CONDICIONES FINALES).

Considerando los resultados obtenidos en las pruebas de variación de temperatura de combustóleo y de presión de vapor de atomización (figuras 4.23 y 4.26) se concluyó que las condiciones mas favorables para la operación del sistema de combustión fueron las que se tuvieron durante la segunda parte de la prueba 4.2.4., esto es: temperatura de combustible igual a 125°C y presión vapor de atomización de 12.5 kg/cm².

Esto determinó que no se considerara necesario realizar una prueba de mejores condiciones, tomándose como tales las ya mencionadas.

Por lo tanto, en la figura 4.29 se realiza la comparación entre el comportamiento del sistema de combustión en condiciones iniciales y condiciones finales, representados este último por los resultados de la prueba 4.2.4.

Como puede observarse en dicha figura a 0.6% de O₂ se tienen valores de 40 p.p.m. de CO en condiciones finales, mientras que en condiciones iniciales, para el mismo valor de oxígeno se tienen valores de concentraciones de 200 p.p.m. de CO.

Por otra parte existe una disminución en la producción de partículas inquemadas, al pasar de 820 mg/Nm³ a 0.6% de O₂ en condiciones iniciales hasta 620 mg/Nm³ a 0.6%

de O_2 en condiciones finales, sin que se alcancen valores altos de SO_3 (8 p.p.m. para 0.6% de O_2), como se muestra en la figura 4.30, variación del SO_3 en función del oxígeno presente en los gases de combustión.

La figura 4.31 es una grafica realizada para auxiliar la operación del generador de vapor debido a que los analizadores de O_2 se encontraron fuera de servicio y la selectora de exceso de aire operaba en manual.

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA

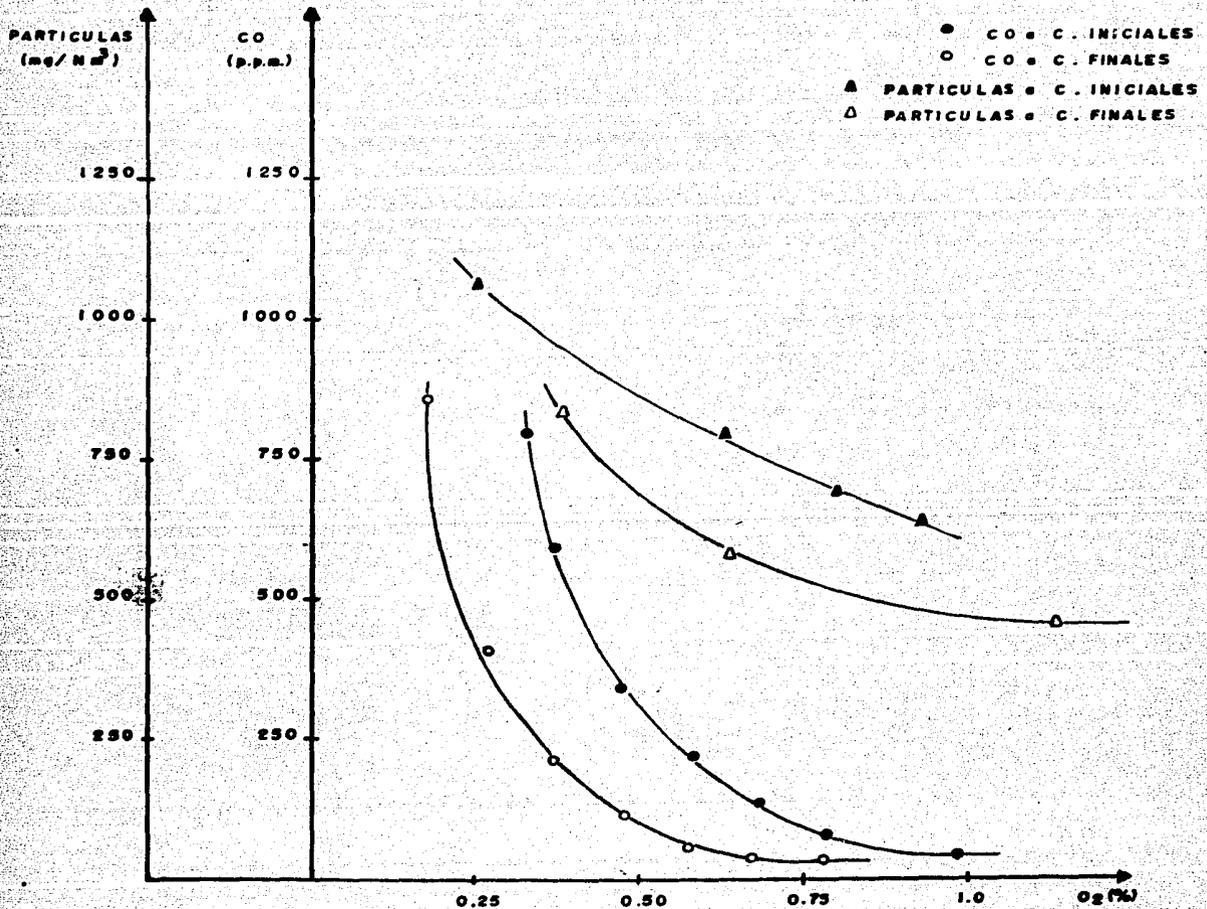


FIGURA 4.29 COMPARACION ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE COMBUSTION EN CONDICIONES INICIALES, CON LA PRUEBA DE CONDICIONES FINALES.

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA.

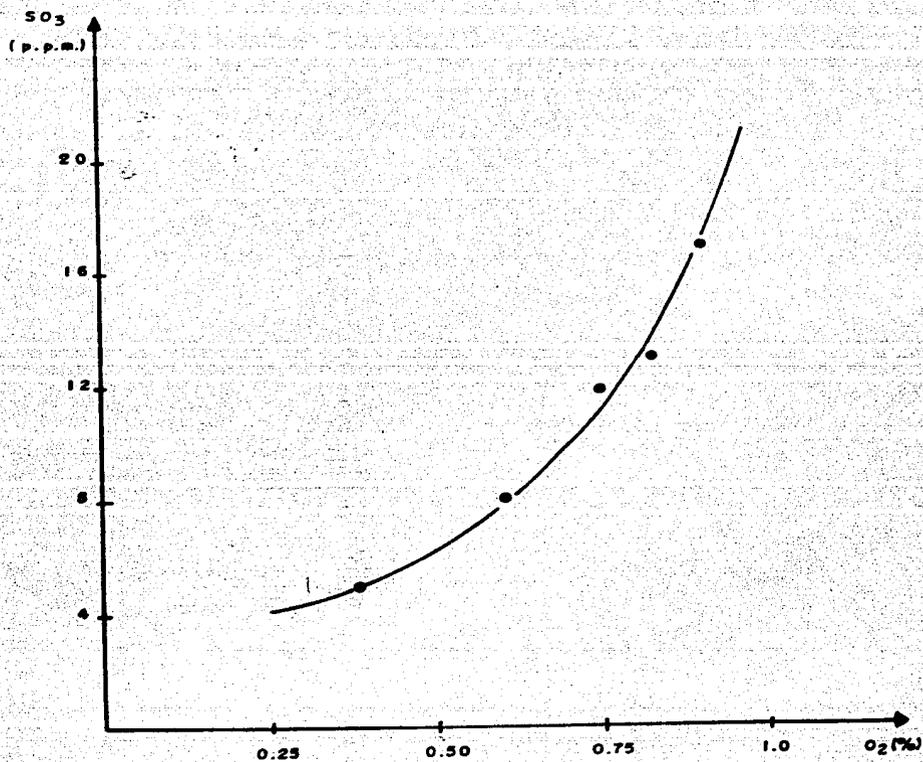


FIGURA 4.30 VARIACION DEL SO₃ EN FUNCION DEL OXIGENO PRESENTE EN LOS GASES DE COMBUSTION.

UNIDAD 5 CENTRAL TERMoeLECTRICA FCO. VILLA.

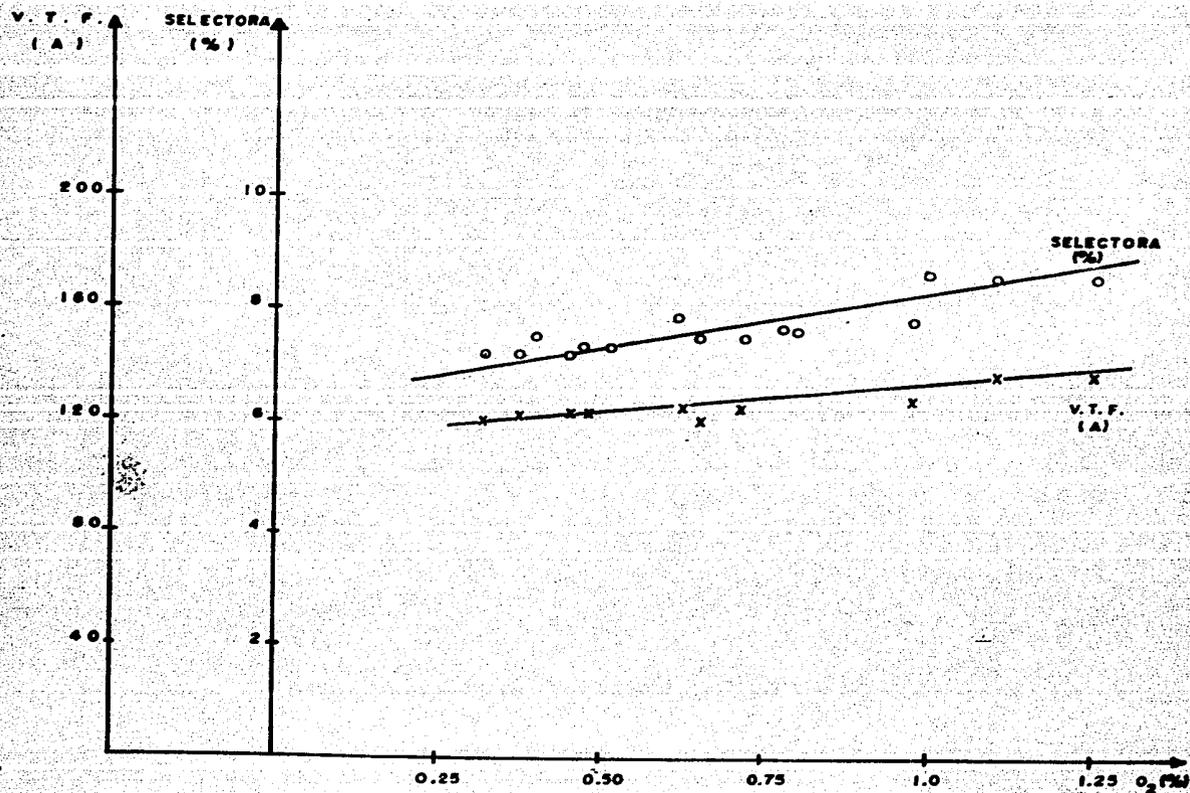


FIGURA 4.31 AMPERAJE EN LOS V.T.F. y % DE EXCESO DE AIRE DE LA SELECTORA CONTRA EL OXIGENO PRESENTE EN LOS GASES DE COMBUSTION.

4.2.6. DETERMINACION DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR, DEL CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE Y DEL REGIMEN TERMICO BRUTO DE LA UNIDAD EN CONDICIONES INICIALES Y FINALES.

Los resultados obtenidos en la determinación de la eficiencia del generador del consumo específico de combustible y del régimen térmico bruto de la unidad en condiciones iniciales y finales se muestran en la tabla 4.37, los cálculos realizados en el apéndice 2.

La eficiencia del generador de vapor obtenida con las condiciones iniciales (86.75%) es 2.25% menor que la de diseño (89.0%), mientras que la eficiencia determinada con las mejores condiciones (87.01%) es 1.99% menor que la de diseño. Se logró incrementar la eficiencia del generador de vapor en 0.26%, al pasar de 86.75% (condiciones iniciales) a 87.01% (condiciones finales), al aplicar la presente metodología.

El régimen térmico bruto disminuye de 2331.72 a 2305 kcal/KW-h, siendo este valor 1.85% mayor que el diseño (2263 kcal/KW-h).

El consumo específico de combustible en condiciones iniciales (0.2343 kgcom/KW-h) es 1.3% mayor que el de diseño (0.2313 kgcom-KW-h); mientras que en condiciones finales el consumo específico de combustible (0.2317 kgcom-KW-h) es

solo 0.17% mayor que el de diseño.

TABLA 4.37 VALORES OBTENIDOS EN EL CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR, DEL CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE Y DEL REGIMEN TERMICO BRUTO DE LA UNIDAD.

	CONDICIONES INICIALES	CONDICIONES FINALES	DISEÑO
EFICIENCIA (%)	86.75	87.01	89.0
CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE (kgcom/KW/h)	0.2343	0.2317	0.2313
REGIMEN TERMICO BRUTO (kcal/kgcom)	2331.72	2305.58	2263

4.2.7. DETERMINACIONES COMPLEMENTARIAS.

ANALISIS DE COMBUSTIBLE.

Se tomaron dos muestras de combustóleo correspondientes a los días 21 y 29 de noviembre. Se determinaron las propiedades reportadas en las tablas 4.38 y 4.39 respectivamente.

De los resultados se observa que es un combustible de alto contenido de azufre (3.89% peso) y de alta viscosidad (638 S.S.F. a 50°C).

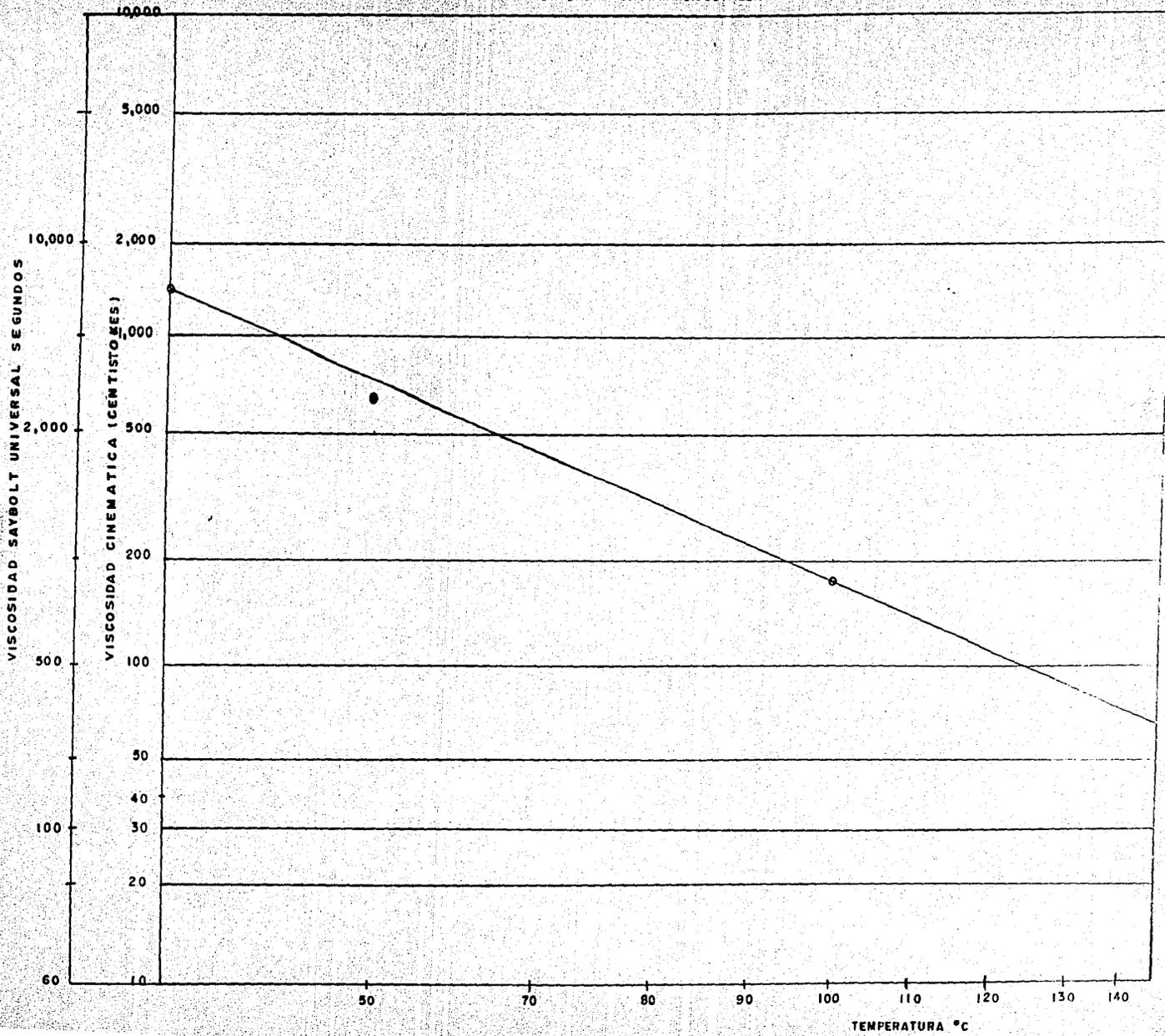
En la figura 4.32 se grafica la viscosidad del combustóleo en función de la temperatura. Como puede apreciarse, para una $T_c=125^\circ\text{C}$ (con la cual operaba el generador de vapor), se obtiene una viscosidad de 22 S.S.F.

COMPOSICION DE PARTICULAS CONTENIDAS EN LOS GASES DE COMBUSTION.

Las partículas se muestrearon isocinéticamente durante cada prueba. En la tabla 4.40 se presentan los resultados obtenidos de la determinación de azufre y carbono contenidos en algunas de las muestras de partículas así como las condiciones de operación en que fueron tomadas.

La concentración de azufre comprende al SO_2 y al SO_3 adsorbidos en las partículas además de diversos sulfatos. El contenido de carbono es inversamente proporcional al contenido de O_2 en los gases de combustión.

UNIDAD 5 C.T. FRANCISCO VILLA



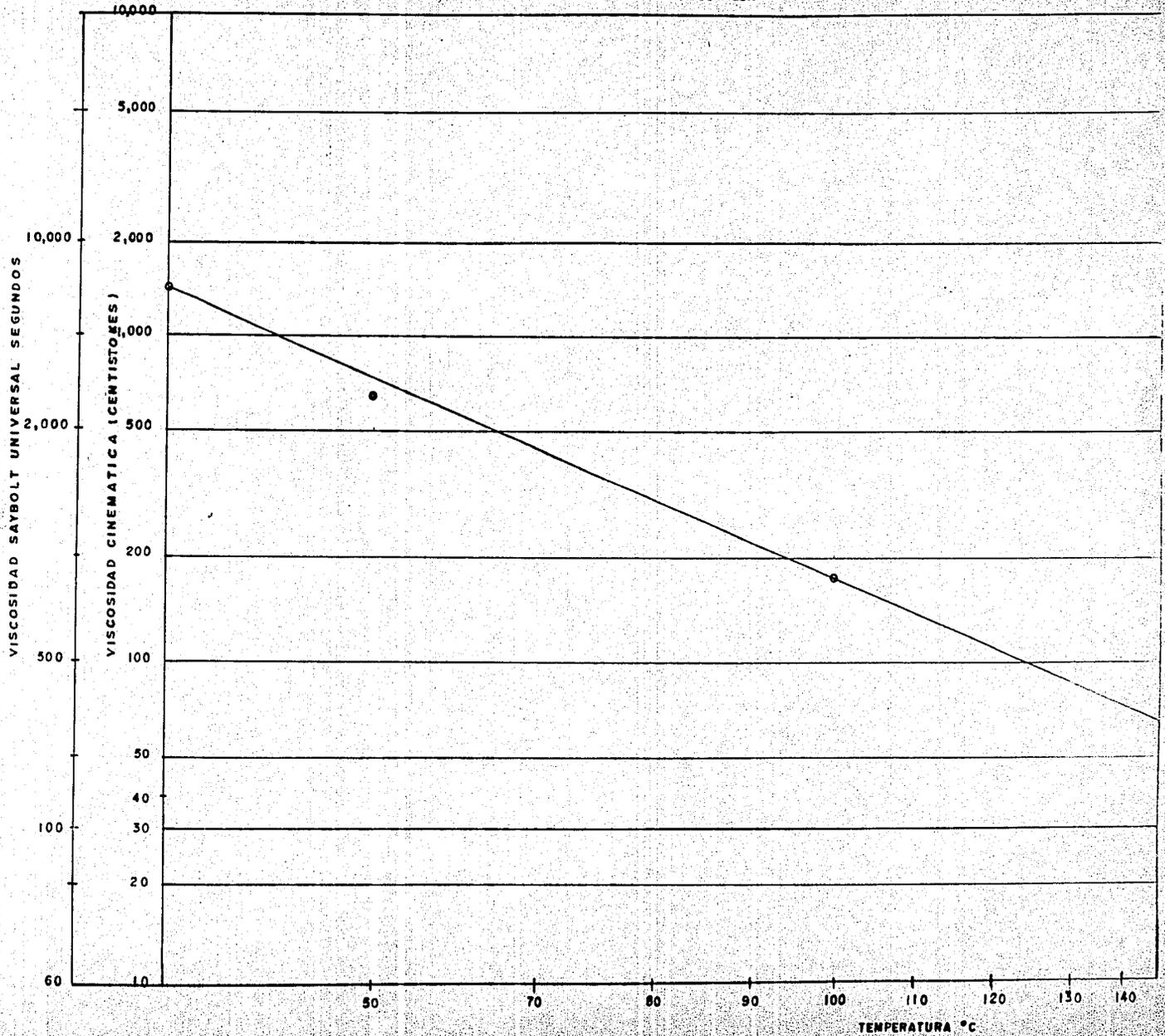


FIGURA 4.32 VARIACION DE LA VISCOSIDAD DEL COMBUSTIBLE EN FUNCION DE LA TEMPERATURA.

DEPARTAMENTO DE COMBUSTIBLES FOSILES
 LABORATORIO QUIMICO
 ANALISIS DE COMBUSTOLEO

TABLA 4.38 ANALISIS DE COMBUSTOLEO.

Procedencia de la muestra	C.T. Francisco Villa.
Número de muestra	1
Fecha de muestreo	21 de Noviembre de 1986
Agua y sedimento % en volumen	-
Agua por destilación % volumen	3.00
Asfaltenos en nC_5 % peso	-
Azufre % en peso	3.89
Temperatura de inflamación :C	86.00
Viscosidad S.S.F. a 50.0:C	638.00
Viscosidad S.S.F. a 60.0:C	308.00
Viscosidad S.S.F. a 82.2:C	86.00
Peso específico a 20/4:C	0.9871
:API	-
Estabilidad Térmica	-
Carbon Conradson % peso	14.62
Tensión superficial Dinas/cm	-
Cenizas totales % peso	-
Análisis elemental (% peso)	
C	83.89
H	11.07
N	0.27
O	-

DEPARTAMENTO DE COMBUSTIBLES FOSILES.
 LABORATORIO QUIMICO
 ANALISIS DE COMBUSTOLEO

TABLA 4.39 ANALISIS DE COMBUSTOLEO.

Procedencia de la muestra	C.T. Francisco Villa
Número de muestra	2
Fecha de muestreo	29 de Noviembre de 1986
Agua y sedimento % en volumen	-
Agua por destilación % en volumen	3.80
Asfaltenos en nC ₅ % peso	-
Azufre % peso	3.80
Temperatura de Inflamación :C	-
Viscosidad S.S.F. a 50:C	615.00
Viscosidad S.S.F. a 60:C	294.00
Viscosidad S.S.F. a 82.2:C	84.00
Peso específico a 20/4 :C	0.9863
:API	-
Estabilidad Térmica	-
Carbon Codradson % peso	14.58
Tensión Superficial a 60:C	-
Cenizas totales % peso	0.052
Analisis de cenizas (p.p.m.)	
Analisis elemental (% peso)	
C	83.89
H	11.07
N	0.27
O	-

TABLA 4.40 COMPOSICION DE PARTICULAS. CONTENIDOS DE AZUFRE Y CARBONO.

MUESTRA No.	COMPOSICION		CONDICIONES DE OPERACION	
	% AZUFRE	% CARBONO	% OXIGENO	CANTIDAD mg/Nm ³
5	8.74	81.94	0.85	700.00
7	8.05	83.48	0.95	650.00
18	8.20	82.35	1.25	600.00
31	7.61	81.28	0.40	966.00
42	8.62	77.79	1.5	-
53	8.45	79.94	0.65	575.00
66	8.31	76.39	0.75	-

CONCLUSIONES.

A través de este trabajo se ha presentado una metodología para caracterizar el comportamiento de los sistemas de combustión de generadores de vapor de Centrales Termoeléctricas.

La interpretación de los resultados de la secuencia de pruebas que la constituye, permite poner de manifiesto la influencia individual de las principales variables que afectan a dicho comportamiento, y de este modo, definir aquellos valores que para cada combustible y cada diseño particular del generador de vapor en cuestión, maximizan la calidad del proceso de combustión.

Con el objeto de demostrar su validez, se presentaron en el Capítulo 4 los resultados de aplicar la metodología a dos generadores de vapor de tamaños y características diferentes: el de la Unidad 3 de la Central Termoeléctrica Salamanca (300 MW), con quemadores tangenciales y el de la Unidad 5 de la Central Termoeléctrica Francisco Villa (150 MW), con quemadores frontales.

La operación continua de un generador de vapor manteniendo sus parámetros (temperatura del combustible, calidad de la atomización, aerodinámica y exceso de aire) en los valores que brindan mayor eficiencia de combustión, trae como consecuencia múltiples beneficios, que pueden evaluarse

ellos se manifiestan en forma inmediata, otros solo podrán hacerse patentes mediante evaluaciones a corto y mediano plazo.

Desde el punto de vista de ahorro energético, los incrementos obtenidos en la eficiencia de los dos generadores de vapor estudiados se expresan por sí mismos.

A este respecto es necesario tener presente que no siempre será posible incrementar la eficiencia de un generador de vapor en las magnitudes de los dos casos estudiados, ya que ésto dependerá no solo de los resultados de la aplicación de la metodología sino también de las condiciones con que operaba el generador de vapor antes de aplicarla. No obstante lo anterior lo que sí puede afirmarse es que el signo del cambio de la eficiencia será siempre positivo.

Desde el punto de vista de la política energética, esto es, de la necesidad o conveniencia de utilizar combustibles alternativos en función de su costo y/o su disponibilidad en el mercado nacional, resulta claro que la metodología desarrollada puede constituir una herramienta valiosa para determinar tanto la factibilidad de la sustitución de un combustible por otro como los cambios en las condiciones de operación que requerirá el nuevo combustible para su adecuada combustión.

Desde el punto de vista de la disponibilidad de los equipos, si bien las ventajas de operar en las condiciones de combustión óptimas no son susceptibles de ser cuantificadas

en forma inmediata, (debido a que por una parte la indisponibilidad debe evaluarse en períodos relativamente largos, y por otra a que en esta problemática influyen numerosos factores, muchos de ellos ajenos al proceso de combustión), puede afirmarse que serán importantes.

Dado que los resultados de la aplicación de la metodología permiten definir las condiciones que posibilitan operar al generador de vapor con el mínimo exceso de aire de combustión compatible con la no emisión de productos inquemados, la operación en tales condiciones conducirá a disminuir la producción de óxidos superiores de Vanadio (V_2O_5), de trióxido de azufre (SO_3) y de partículas inquemadas. Esto a su vez traerá como consecuencia menores velocidades de corrosión y ensuciamiento de las diferentes partes del generador de vapor, lo que deberá producir un impacto positivo en su disponibilidad.

Desde el punto de vista de la contaminación ambiental, las ventajas de reducir al mínimo posible la emisión de algunos contaminantes (partículas, SO_3 , CO) resultan evidentes.

En cuanto a los alcances de la metodología, si bien ha sido desarrollada para ser aplicada a generadores de vapor de Centrales Termoeléctricas, puede también aplicarse a prácticamente cualquier equipo que involucre procesos de combustión. Esto puede revestir particular importancia para aquellas instituciones o industrias que utilicen en forma intensiva energía calórfica, ya sea como parte de sus

procesos (industrias del cemento, del vidrio, del acero, etc) o para la producción de vapor en calderas medianas o pequeñas

Finalmente, es oportuno no perder de vista que la metodología presentada es perfectible y que de hecho sería muy útil perfeccionarla. En tal sentido, un aspecto importante que convendría desarrollar y que no se ha considerado en este trabajo es la medición de los patrones de flujo de calor en el interior del generador de vapor, ya que los cambios en las condiciones de operación del sistema de combustión los modifican en mayor o menor grado y, como es obvio, un cambio en el tipo de combustible puede alterarlos totalmente.

Se desea sinceramente poder contar en el futuro con una metodología perfeccionada, esperando que el esfuerzo realizado sea de algún modo útil al desarrollo de la tecnología en este campo y, en particular, a la mejor utilización de los recursos energéticos del país.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

1. Comisión Federal de Electricidad
"Análisis Retrospectivo del Comportamiento de la
Generación a Base de Hidrocarburos en el Sector
Eléctrico Nacional período 1979-1980".
2. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal
"Programa Nacional de Energeticos 1984-1988".
Primera Edición, Agosto 1984.
3. Bautista Margulis, R.
"Características de los Generadores de Vapor
para la generación de energía eléctrica
mayor de 80 MW y análisis de sus fallas de
materiales más frecuentes."
Tesis Licenciatura. Universidad Veracruzana.
Noviembre de 1985..
4. Informe Final "Caracterización de los Combustibles
utilizados en Generadores de Vapor" Parte II.
(I.I.E./2/1829/I/09) 1985.
5. Glassman, I.
"Combustion", Academic Press, Inc, Londres.
1977.

6. Lenz, W y Wittmer, V.
Informe final "Aspectos Teóricos sobre Combustión".
Instituto de Investigaciones Eléctricas 1981.
7. Laxton, J.W.
"The influence of excess Oxigen and Metallic Additives
on the formation and Deposition of Sulphur Oxides in
Flue Gas", The Mechanism of Corrossion by Fuel
Impuritles. Butterworths, Londres, 1963.
8. Milan Foressi, J. y varios autores.
"Diagnostico para la puesta a punto del sistema de
Combustión de Generadores de Vapor de Centrales
Termoeléctricas .(Informes Finales I-XV).
(I.I.E.) 1981-1986.
9. Manual de operación.
"Pulser Fluorescent SO₂ Analyzer".
Thermo Electron Corporation
Environmental Instrument Division.
10. Manual de operación.
"Infrared Analyzer CO".
Beckman Instrument.
Fullerton Cal, January 1980.

11. Land Combustion Limited
"Sulfuric Acid Measurement in Boiler Flue Gas"
12. Verhoff, F.H. Banchero, J.T.
"Predicting Dew Points of flue Gas", Chemical
Engineering Progress, Vol.70, No 8, 1974, pags 71-72.
13. Manual de operación
"Continuously Recording SO₃ Monitor".
Severn Science Limited.
14. G. R. Peacock
"Methods of Measuring Sulfuric Acid Dewpoint"
Presented at 23.th Annual ISA
Analysis Instrumentation Symposium.
May-17-19 1977.
15. Norma Oficial Mexicana Secretaria de Industria y
Comercio.
"Determinación de oxígeno, Monóxido de carbono y
Dióxido de Carbono en los Gases de Combustión".
14 mayo 1976, México

16. Manual de Operación
Oxigen Analyzer
Beckman Instruccion mod. 765.
Beckman Instrument.
Fullerton Cal, January 1980.

17. Tipping, F.
"The Determination of Oxigen in Gases".
Presented During the Spring School of
Process Analytical instrumentation held
at University of Warwick.
March 1974.

18. Lorenzano Porras, F.
Informe "Desarrollo de un Equipo para Muestreo
isocinético de Partículas en Gases de Combustión."
I.I.E. 1984.

19. Código A.S.M.E norma P.T.C. 4.1.

20. Lorenzano Porras Francisco.
Investigador del I.I.E.
Comunicación personal.

APENDICE 1

La norma A.S.M.E. define el exceso de aire como:

$$EA(\%) = \frac{W_a - W_{ae}}{W_{ae}} \times 100$$

Si todas las cantidades son referidas a porcentaje en volumen:

$$EA(\%) = \frac{V_a - V_{am}}{V_{am}} \times 100 \quad (1)$$

donde:

V_a = Volumen de aire.

V_{am} = Volumen de aire mínimo o estequiométrico.

Se define el el aire en exceso como:

$$V_{ae} = V_a - v_{am} \quad (2)$$

Substituyendo (2) en (1)

$$EA(\%) = \frac{V_{ae}}{V_{am}} \times 100 \quad (3)$$

Como el aire posee 21% O_2 el V_{am} será:

$$V_{am} = \frac{V_{O_2}}{0.21} \quad (4)$$

De manera simplificada el volumen de oxígeno mínimo (V_{O_2m}) será:

$$V_{O_2m} = 22.41 \left[\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right] \quad (5)$$

Substituyendo (5) en (4) se tiene:

$$V_{am} = \frac{22.41}{0.21} \left[\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right] \quad (6)$$

Ahora bien el volumen de aire en exceso se define por:

$$V_{O_2e} = \frac{VO_{2e}}{0.21} \quad (7)$$

$$VO_{2e} = [O_2] V_{gs} \quad (8)$$

Donde:

VO_{2e} = Volumen de oxígeno en exceso.

$[O_2]$ = Porcentaje de oxígeno medido en la salida de los gases.

V_{gs} = Volumen de gases secos.

Substituyendo (8) en (7)

$$V_{ae} = \frac{[O_2]}{0.21} \times V_{gs}$$

Se define el volumen de gases secos (V_{gs}) como:

$$V_{gs} = V_{gms} + V_{ae} \quad (9)$$

Substituyendo (9) en (8)

$$V_{ae} = \frac{[O_2]}{0.21} (V_{gms} + V_{ae})$$

$$V_{ae} = \frac{[O_2]}{0.21} \times V_{gms} + \frac{[O_2]}{0.21} \times V_{ae}$$

$$V_{ae} \left(1 - \frac{[O_2]}{0.21}\right) = \frac{[O_2]}{0.21} \times V_{gms} \quad (10)$$

El volumen de gases mínimos secos (V_{gms}) se calcula con:

$$V_{gms} = 22.41 \times \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \right) + \frac{0.79}{0.21} \times VO_{2m} \quad (11)$$

Substituyendo (6) en (11)

$$V_{gms} = 22.41 \times \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} + 0.79 \right) + \dots \times 22.41 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \quad (12)$$

Substituyendo (12) en (10)

$$V_{ae} = \left[\frac{O_2}{0.21} \right] \left[22.41 \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} + 0.79 \right) + \dots \times 22.41 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \right] \quad (13)$$

Substituyendo (13) y (6) en (3) se obtiene

$$EA(\%) = \frac{\left[\frac{O_2}{0.21 - [O_2]} \right] \left[22.41 \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} + 0.79 \right) + \dots \times 22.41 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \right]}{22.41 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) + 0.21}$$

Simplificando

$$EA(\%) = \frac{0.21 [O_2]}{0.21 - [O_2]} \left\{ \left(\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} + 3.762 \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \right) \right\}$$

Definimos el factor de combustión (Fc) como:

$$Fc = \frac{\frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28}}{\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32}}$$

Finalmente se define el exceso de aire como:

$$EA = \left((3.762 + Fc) \times \frac{0.21 [O_2]}{0.21 - [O_2]} \right) \times 100 (\%)$$

APENDICE 2

PRUEBA PARA EL CALCULO DE LA EFICIENCIA BASADO EN LA NORMA ASME P.C.T. 4.1 (METODO DE PERDIDAS) CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE Y REGIMEN TERMICO BRUTO

DATOS PARA EL CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR, CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE Y REGIMEN TERMICO BRUTO DE LA UNIDAD.

ANALISIS DE COMBUSTOLEO.

COMBUSTOLEO % PESO

CARBON C

HIDROGENO H₂

AZUFRE S

NITROGENO N₂

HUMEDAD H_c

CENIZAS

GRAVEDAD
ESPECIFICA

ANALISIS DE GASES
(SALIDA DE CHIMENEA).

ELEMENTO % PESO MOLEC.

O₂

CO₂

CO

N₂

PARTICULAS
(mg/Nm³)

PODER CAL.SUP.VOL.CTE. kcal/kg. PCSV
FLUJO VAP.ATOMIZACION. kg/kg com.
CARBONO EN PARTICULAS. %
FLUJO DE COMBUSTOLEO. kg/Hr.

TEMPERATURAS.
BULBO SECO AMBIENTE TABS :C
BULBO HUMEDO AMBIENTE TABH :C

COMBUSTOLEO	TDIA	:C
GASES CHIMENEA	IG15	:C
VAPOR DE ATOMIZACION.	TVAT	:C
PROM,AIRE ENT.PRECA(Tref)	TA7	:C

PRESIONES	
ATMOSFERICA	PA mmHg
VAPOR DE ATOMIZACION	PVAT kg/cm2
GENERACION BRUTA	GB.

HOJAS DE OPERACIONES
DATOS

1. PODER CALORIFICO SUPERIOR A PRESION CONSTANTE.

$$\begin{aligned} \text{PCSP} &= \text{PCSV} + 146.9 \text{ H} \\ \text{PCSP} &= + 146.9 (\quad) \\ \text{PCSP} &= \quad \text{kcal/kg} \end{aligned}$$

2. KG DE GASES DE COMBUSTION POR KG DE COMBUSTIBLE W'G

$$\begin{aligned} \text{W'G} &= \frac{44.01(\text{CO}_2) + 32(\text{O}_2) + 28.02(\text{N}_2) + 28.01(\text{CO})((\text{Cc}) + 12.1(\text{Sc})/32.07)}{12.01(\text{CO}_2 + \text{CO})} \end{aligned}$$

$$\text{W'G} = \frac{44.01(\quad) + 32(\text{O}_2) + 28.02(\quad) + 28.01(\quad) ((\quad) + 12.01(\quad)/32.07)}{12.01(\quad)}$$

W'G = \quad kg de gas/kg de comb.

3. KG DE AIRE POR KG DE COMBUSTIBLE W'A

$$\begin{aligned} \text{W'A} &= \frac{28.02 \text{ N}_2 \quad ((\text{Cc} + 12.01(\text{Sc})/32.07) - (\text{Nc}))}{12.01(\text{CO}_2 + \text{CO})} \\ &= \quad 0.7685 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{W'A} &= \frac{28.02(\quad) \quad ((\quad) + 12.01(\quad)/32.07) - (\quad)}{12.01(\quad)} \\ &= \quad 0.7685 \end{aligned}$$

W'A = \quad kg de aire/kg de combustible

4. CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION Cpg.

Se obtiene de la figura 7 P.T.C. ASME
con $T = \text{IG15} - \text{IABS}/2$, relación C/H, % O₂

Cpg = \quad kcal/kg:C

5. HUMEDAD DEL AIRE A LA ENTRADA CORREGIDA Ha .

se obtiene de la carta psicométrica para presión atmosférica, corrigiendo por altitud del lugar sobre el nivel del mar.

con:
IABS, IABH, Ha nivel del mar + corrección por altitud

Ha = \quad kg agua/kg combustible.

6. HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION Hg ..

$$H_g = 8.936(H_c) + (W_A)(h_a) + h_c$$

$$H_g = 8.936 (\quad) + (\quad) (\quad) + (\quad)$$

$$H_g = \quad \text{kg de agua/kg de combustible.}$$

7. ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HV15

Se obtiene en tablas de vapor sobrecalentado con:

$$P = 1 \text{ psia}$$

$$T_{G15} =$$

$$H_{V15} = \quad \text{kcal/kg}$$

8. ENTALPIA DE VAPOR DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HVA

Se obtiene de tablas de vapor (saturado) con:

$$T_{\text{ambiente}} (T_{\text{abs}})$$

$$H_{VA} = \quad \text{kcal/kg.}$$

9. ENTALPIA DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HWA ..

Se obtiene de tablas de vapor (lado de agua) con:

$$T_{\text{ambiente}} (T_{\text{abs}})$$

$$H_{WA} = \quad \text{kcal/kg.}$$

10. ENTALPIA DEL VAPOR DE ATOMIZACION HVAT.

Se obtiene de tablas de vapor (sobrecalentado) con:

$$T_{\text{vapor de atom}} (T_{\text{VAT}})$$

$$\text{Presión de vapor atom.}$$

$$H_{\text{VAT}} = \quad \text{kcal/kg.}$$

II PERDIDAS..

1. POR GASES SECOS PGS

PGS= W'G Cpg (TG15-TABS)

PGS= () () (() - ())

PGS= kcal/kg

2. POR HUMEDAD EN EL AIRE PHA

PHA=HA W'A (HV15-HWA)

PHA= () () (() - ())

PHA= kcal/kg.

3. POR HUMEDAD EN EL COMBUSTIBLE PHC..

PHC= hc W'A (HV15-HWA)..

PHC= () () (() - ())

PHC= kcal/kg.

4. POR COMBUSTION DEL HIDROGENO PCH.

PCH= 8.936 (H) (HV15-HWA)

PCH= 8.936 () (-)

PCH= kcal/kg.

5. POR FORMACION DE CO PCO.

PCO=..... $\frac{CO}{CO+CO_2}$ (5644) (Cc)

PCO=..... () (5644) ()
(+)

PCO= kcal/kg..

6. POR PARTICULAS INQUEMADAS PPI.

PPI=..... (0.18044) (particulas en mg/m³ N) (W'G) (% Cp)
P.M.G.

Donde: P.M.G. = $XO_2 + 44 XCO_2 + 28 (XCO + XN_2)$

$Xn = \% n / 100$

P.M.G = $32() + 44() + 28(+)$

PPI = $\frac{0.18044 () () ()}{()}$

PPI = kcal/kg.

7. POR VAPOR DE ATOMIZACION PVA.

PVA = WVAP (HV15-HVA)

PVA = () (-)

PVA = kcal/kg.

8. POR RADIACION PR.

Se obtiene de la figura 8 P.T.C. 4.1 con el calor total de entrada en millones o se toma de datos de diseño de la unidad.

PR = (CTE) (% PR)

PR = () ()

PR = kcal/kg.

III CREDITOS..

1. POR AIRE CALIENTE CAC.

Solo si los precalentadores de aire a vapor usan vapor de otra unidad.

$$CAC = WA CPA (TA8 - TA7)$$

CPA se obtiene de la figura 3 PIC 4.1 con $T = (TA8 - TA7) / 2$

$$CAC = (\quad) (\quad) (\quad - \quad)$$

$$CAC = \quad \text{kcal/kg.}$$

2. POR VAPOR DE ATOMIZACION CVA.

Solo si el vapor de atomización proviene de otra unidad.

$$CVA = WVAP (HVAT - HVA)$$

$$CVA = (\quad) (\quad - \quad)$$

$$CVA = \quad \text{kcal/kg.}$$

3. POR CALOR SENSIBLE EN EL COMBUSTIBLE CC

$$CCC = (1 \text{ kg}) Cpc (Tdia 1,2,3, - Tabs)$$

Si el vapor de calentamiento proviene de otra unidad usar $T1, T2, T3$ en fig. 4. Si no hay vapor de otra unidad usar $Tdia$.

$$CCC = (1) (\quad) (\quad - \quad)$$

$$CCC = \quad \text{kcal/kg.}$$

IV VALORES FINALES..

CALOR TOTAL ENTRADA CTE= PCSP + CREDITOS

CTE= ()+ ()

CTE= kcal/kg.

% PERDIDAS.

PGS/CTE= =

PHA/CTE= =

PHC/CTE= =

PCH/CTE= =

PCO/CTE= =

PPI/CTE= =

PVA/CTE= =

PR/ CTE= =

.....
%TOTAL DE PERDIDAS=()x100

EFICIENCIA= 100-%TOTAL DE PERDIDAS..

EFICIENCIA= ()- ()

EFICIENCIA= %

REGIMEN TERMICO BRUTO RTG

RTG= CTE (Wc)/ KW-h..

RTG= () ()/ ()

RTG= kcal/KWh..

CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE CEC.

CEC= kg combustible en 1 Hr/ KW-h producidos

CEC= ()/ ()

CEC= kg comb/ KW-h.

APENDICE 2

DATOS PARA EL CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR DE LA UNIDAD No. 3 DE LA C.T. SALAMANCA EN CONDICIONES INICIALES.

ANALISIS DE COMBUSTOLEO.

COMBUSTOLEO	% PESO
CARBON C	84.6590
HIDROGENO H ₂	10.9860
AZUFRE S	3.4000
NITROGENO N ₂	0.8740
HUMEDAD Hc	0.1000
CENIZAS	0.0420
GRAVEDAD ESPECIFICA	0.9904

ANALISIS DE GASES (SALIDA DE CHIMENEA)

ELEMENTO	% VOL.	PESO MOLEC.
O ₂	4.250	32.0
CO ₂	11.450	44.01
CO	0.082	28.01
N ₂	84.218	28.02

PARTICULAS (mg/m³N) 362.00

PODER CAL.SUP.VOL.CTE.	PCSV	9956.0
FLUJO VAP.ATOMIZACION	kg/kg com.	0.0381
CARBONO EN PARTICULAS	%	70.0
FLUJO DE COMBUSTOLEO	kgcom.	68580.0

TEMPERATURAS		
BULBO SECO AMBIENTE	TABS :C	27.5
BULBO HUMEDO AMBIENTE	TABH :C	18.5
COMBUSTOLEO	TDIA :C	55.0
GASES CHIMENEA	TG15 :C	158.0
VAPOR DE ATOMIZACION	TVAP :C	365.0
PROM.AIRE ENT. PRECAS	TA7 :C	27.5

PRESIONES

PRESION ATMOSFERICA

PA mm Hg 622.0

PRESION VAPOR ATOMIZACION

PVAT kg/cm² 18.0

GENERACION BRUTA

GB KW-H 290 000

I.-DATOS

1. PODER CALORIFICO SUPERIOR A PRESION CONSTANTE PCSP.

PCSP= PCSV+ 146.9 H
 PCSP= 9956+ 146.9 (.10986)
 PCSP= 9972.13 kcal/kg

2. KG DE GASES DE COMBUSTION POR KG DE COMBUSTIBLE W'G.

$$W'G = \frac{44.01(CO_2) + 32(O_2) + 28.02(N_2) + 28.01(CO)}{12.01(CO_2 + CO)} \quad ((C_c) + 12.01(S_c) / 32.07)$$

$$W'G = \frac{44.01(11.45) + 32(4.25) + 28.02(84.2) + 28.01(0.082)}{12.01(11.45 + 0.082)} \quad ((0.846) + 12.01(0.0034) / 32.07)$$

W'G=18.6260 kg gas/kg com.

3. KG DE AIRE POR KG DE COMBUSTIBLE W'A.

$$W'A = \frac{28.02(N_2) + 12.01(S_c)}{12.01(CO_2 + CO) + 32.07} - (N_c)$$

$$W'A = \frac{28.02(84.2) + 12.01(0.0034)}{12.01(11.45 + 0.082) + 32.07} - (0.0087)$$

W'A=19.0406 kg aire/kg com.

4. CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION.

Se obtiene de la figura 7 PIC. 4.1 ASME
 con: $T = T_{G15} + T_{ABS}/2$, relación C/H, %CO₂
 $T = 158 + 27.5/2 = 92.75$
 $C/H = 84.659/10.986 = 7.7071$
 $\%CO_2 = 11.45$

C_{pg}=0.237 kcal/kg:C

5. HUMEDAD DEL AIRE A LA ENTRADA CORREGIDA hA.

Se obtiene de tabla psicométrica para presión atmosférica, corrigiendo por altitud del lugar sobre el nivel del mar.
 con: TABS, TABH..... hA+corrección por altitud

hA=0.0134 kg agua/ kg aire seco

6. HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION hg

$$hg = 8.936(Hc) + W'AhA + hc$$

$$hg = 8.936(.10) + (19.0406)(0.0134) + (0.0010)$$

$$hg = 1.1497 \text{ kg agua/kg com.}$$

7. ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA EN LOS GASES DE COMBUSTION HV15.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado
con:

$$P = 1 \text{ psia}$$

$$TG15 = 158 : C = 316 : F$$

$$HV15 = 668.36 \text{ kcal/kg.}$$

8. ENTALPIA DE VAPOR DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado
con:

$$\text{Tambiente(TABS)} = 27.5 : C$$

$$HVA = 609.48 \text{ kcal/kg.}$$

9. ENTALPIA DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HWA.

Se obtiene de tablas de vapor (lado agua)
con:

$$\text{Tambiente(TABS)} = 27.5 : C$$

$$HWA = 27.5189 \text{ kcal/kg.}$$

10. ENTALPIA DE VAPOR DE ATOMIZACION.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado
con:

$$T_{\text{vapor atom(TVAT)}} = 365 : C$$

$$\text{Presión vapor de atom.} = 18.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$HVAT = 758.54 \text{ kcal/kg.}$$

II.- PERDIDAS.

1. POR GASES SECOS PGS.

PGS=W'G Cpg (TG15-TABS)
PGS=(18.626)(0.237) (158-27.5)
PGS= 576.84 kcal/kg.

2. POR HUMEDAD EN EL AIRE PHA.

PHA=ha W'A (HV15-HVA)
PHA=(0.0134)(19.0406)(668.36-609.48)
PHA= 15.0213 kcal/kg.

3. POR HUMEDAD EN EL COMBUSTIBLE PHC.

PHC= hc(HV15-HWA)
PHC=(0.001)(668.36-27.51)
PHC=0.6408 kcal/kg com.

4. POR COMBUSTION DE HIDROGENO PCH.

PCH=8.936 (H) (HV15-HWA)
PCH=8.936 (0.1098) (668.36-27.5189)
PCH=629.1194 kcal/kg comb.

5. POR FORMACION DE CO PCO.

CO
PCO=..... (5644) (Cc)
CO+ CO₂
0.082
PCO=..... (5644) (.84659)
0.082+11.45

PCO= 33.9758 kcal/kg com.

6. POR PARTICULAS INQUEMADAS PPI.

(0.18044)
PPI=..... (partículas en mg/N m³)(W'G) (ZCp)
P.M.G.

donde:

$$P.M.G. = 32XO_2 + 44XCO_2 + 28(XCO + XN_2)$$

$$X_n = Z_n/100$$

$$P.M.G. = 32(0.0425) + 44(0.1145) + 28(0.00082 + 0.84218) = 30.002$$

$$(0.18044)$$

$$P.P.I. = \dots (362) (18.6260) (0.70) \\ (30.002)$$

$$P.P.I. = 28.3702 \text{ kcal/kg com.}$$

7. POR VAPOR DE ATOMIZACION PVA.

$$PVA = WVAI (HV15 - HVA)$$

$$PVA = (0.0381)(669.36 - 609.48)$$

$$PVA = 2.2814 \text{ kcal/kg com.}$$

8. POR RADIACION PR.

Se obtiene de la figura 8 P.T.C. con el calor total de entrada en millones de BTU/hr=0.90 o se toma de datos de diseño de la unidad.

$$PR = (CTE) (\% PR)$$

$$PR = (9985.33) (0.0019)$$

$$PR = 18.9721 \text{ kcal/kg com.}$$

III.- CREDITOS.

Solo existe el credito por calor sensible en el combustible CCC.

$CCC = (1 \text{ kg}) Cpc(Tdia - TABS)$

$CCC = (1) (0.48) (55 - 27.5)$

$CCC = 13.2 \text{ kcal/kg.}$

IV VALORES FINALES.

CALOR TOTAL ENTRADA $CTE = PCSP + CREDITOS$

$CTE = 9972.13 + 13.2$

$CTE = 9985.3384 \text{ kcal/kg.}$

% PERDIDAS

$PGS/CTE = 576.84 / 9985.33 = 0.0578$

$PHA/CTE = 15.02 / 9985.33 = 0.0015$

$PHC/CTE = 0.64 / 9985.33 = 0.0001$

$PCH/CTE = 629.11 / 9985.33 = 0.0630$

$PCO/CTE = 33.97 / 9985.33 = 0.0034$

$PPI/CTE = 28.37 / 9985.33 = 0.0028$

$PVA/CTE = 2.28 / 9985.33 = 0.0002$

$PR/CTE = 18.97 / 9985.33 = 0.0019$

 $\% \text{TOTAL DE PERDIDAS} = (0.1307) \times 100 = 13.07$

$EFICIENCIA = 100 - \% \text{PERDIDAS.}$

$EFICIENCIA = 100 - 13.07$

$EFICIENCIA = 86.93\%$

REGIMEN TERMICO BRUTO $RTB = CTE(WC) / KW-h.$

$RTB = 9985.33(68580) / 290 \ 000$

$RTB = 2361.36 \text{ kcal/KW-h}$

CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE CEC.

$CEC = \text{kg combustible en 1 h/KW-h producidos}$

$CEC = 68.58 / 290$

$CEC = 0.2365 \text{ kg com/KW-h}$

DATOS PARA EL CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR
DE VAPOR DE LA UNIDAD 3 DE LA C.T. SALAMANCA
EN CONDICIONES FINALES.

ANALISIS DE COMBUSTOLEO

COMBUSTOLEO	% PESO
CARBON C	84.659
HIDROGENO H ₂	10.986
AZUFRE S	3.40
OXIGENO O ₂	-
HUMEDAD Hc	0.10
CENIZAS	0.050
GRAVEDAD ESPECIFICA	0.9902

ANALISIS DE GASES
(SALIDA DE CHIMENEA)

ELEMENTO	% VOL	PESO MOLECULAR
O ₂	3.800	32.00
CO ₂	13.800	44.01
CO	0.028	28.01
N ₂	83.172	28.02

PARTICULAS
mg/m₃N 258.00

PODER CAL. SUP. VOL.CIE		PCSV	9956.0
FLUJO VAP ATOMIZACION	kgvap/kg com		0.0381
CARBONO EN PARTICULAS	%		70.0
FLUJO DE COMBUSTOLEO	kg/Hr.		70.0

TEMPERATURAS

BULBO SECO AMBIENTE	TABS	:C	26.5
BULBO HUMEDO AMBIENTE	TABH	:C	19.0
COMBUSTOLEO(TANQUE DE DIA)	TDIA	:C	55.0
GASES DE CHIMENEA	TG15	:C	159.0
VAPOR DE ATOMIZACION	TVAT	:C	365.0
PROM.AIRE ENT. PRECAS.(TREF)	TA7	:C	26.5

PRESIONES

PRESION ATMOSFERICA	PA mm Hg	622.0
PRESION VAPOR ATOMIZACION	PVAT kg/cm ²	18.5
GENERACION BRUTA	GB KW-H	300,000

I.-DATOS

1. PODER CALORIFICO SUPERIOR A PRESION CONSTANTE PCSP.

PCSP=PCSV+146.9 H
 PCSP=9956+146.0(0.10986)
 PCSP=9972.13 kcal/kg.

2. KG DE GASES DE COMBUSTION POR KG DE COMBUSTIBLE W'G.

44.01(CO₂) + 32(O₂) + 28.02(N₂) + 28.01(CO)
 W'G = ((Cc) + 12.01(Sc) / 32.07)
 12.01(CO₂ + CO)

44.01(13) + 32(3.8) + 28.02(83.172) + 28.01(0.028)
 W'G = ((.8465) + 12.01(.0034) / 32.07)
 12.01(13 + 0.028)

W'G = 16.613 kg gas/kg com.

3. KG DE AIRE POR KG DE COMBUSTIBLE W'A.

28.02(N₂) 12.01(Sc)
 (Cc +) - Nc
 12.01(CO₂ + CO) 32.07
 W'A =
 0.7685

28.02(83.172) 12.01(0.034)
 (0.8465 +) - (0.00874)
 12.01(13 + 0.028) 32.07
 W'A =
 0.7685

W'A = 16.6429 kaire/kgcom

4. CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION Cpg.

Se obtiene de la figura 7 PTC 4.1 ASME
 con:

T = TG15 + TABS/2; relación C/H; %CO₂
 T = 159 + 26.5/2 = 92.75°C
 C/H = 84.659/10.986 = 7.7061
 %CO₂ = 13.0

Cpg = 0.241 kcal/kg°C

5. HUMEDAD DEL AIRE A LA ENTRADA CORREGIDA hA.

Se obtiene de tabla psicométrica para presión atmosférica, corrigiendo
 por altitud del lugar sobre el nivel del mar.
 con: TABS, TABS.....hA nivel mar + corrección por altitud

hA = 0.0138 kgagua/kgcom.

6. HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION h_g .

$$h_g = 8.936(H_c) + W/A h_A + h_c$$

$$h_g = 8.936(0.1098) + (16.6429)(0.0138) + (0.001)$$

$$h_g = 1.2118 \text{ kg agua/kg com.}$$

7. ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA EN LOS GASES DE COMBUSTION $HV15$.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado

$$\text{con: } P = 1 \text{ psia}$$

$$T_{G15} = 159^\circ\text{C}$$

$$HV15 = 670.4306 \text{ kcal/kg.}$$

8. ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HVA .

Se obtiene de tablas de vapor saturado

$$\text{con: } T_{\text{ambiente}}(T_{ABS}) = 26.5^\circ\text{C}$$

$$HVA = 610.02 \text{ kcal/kg.}$$

9. ENTALPIA DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HWA .

Se obtiene de tablas de vapor (lado agua)

$$\text{con: } T_{\text{ambiente}}(T_{ABS}) = 26.5^\circ\text{C}$$

$$HWA = 26.6232 \text{ kcal/kg.}$$

10. ENTALPIA DEL VAPOR DE ATOMIZACION $HVAT$.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado

$$\text{con: } T_{\text{vap atom}}(T_{VAT}) = 365^\circ\text{C}$$

$$HVAT = 759.3301 \text{ kcal/kg.}$$

II.-PERDIDAS.

1. POR GASES SECOS PGS.

PGS=W'G(Cpg)(TG15-TABS)
 PGS=(17.0386) (0.24) (164.5-26.0)
 PGS=566.36 kcal/kg com.

2. POR HUMEDAD EN EL AIRE PHA.

PHA=HA W'A(HV15-HVA)
 PHA=(0.0079)(17.1616) (671.45-606.22)
 PHA=8.8437 kcal/kg com.

3. POR HUMEDAD EN EL COMBUSTIBLE PHC.

PHC=hc(HV15-HWA)
 PHC=(0.013) (671.45-20.03)
 PHC= 8.4685 kcal/kg com.

4. POR COMBUSTION DE HIDROGENO PCH.

PCH= 8.936 (H) (HV15-HWA)
 PCH= 8.936(0.1107) (671.45-20.03)
 PCH= 644.39 kcal/kg com.

5. POR FORMACION DE CO PCO.

CO
 PCO=..... (5644) (Cc)
 CO+CO₂
 (0.015)
 PCO= (5644) (0.8389)
 (0.015+12.57)

PCO=5.64 kcal/kg com.

6. POR PARTICULAS INQUEMADAS PPI.

(0.1804)
 PPI=..... (particulas en mg/N m³)(W'G)(ZCp)
 P.M.G.

donde:

$$P.M.G. = 32X_{O_2} + 44X_{CO_2} + 28(X_{CO} + X_{N_2})$$

$$X_n = \%n/100$$

$$P.M.G. = 32(0.0425) + 44(0.1145) + 28(0.00082 + 0.84218) = 30.002$$

$$(0.18044)$$

$$P.P.I. = \dots (362) (18.6260) (0.70) \\ (30.002)$$

$$P.P.I. = 28.3702 \text{ kcal/kg com.}$$

7. POR VAPOR DE ATOMIZACION PVA.

$$PVA = W_{VAT} (H_{V15} - H_{VA})$$

$$PVA = (0.0381) (669.36 - 609.48)$$

$$PVA = 2.2814 \text{ kcal/kg com.}$$

8. POR RADIACION PR.

Se obtiene de la figura 8 P.T.C. con el calor total de entrada en millones de BTU/hr = 0.90 o se toma de datos de diseño de la unidad.

$$PR = (CTE) (\% PR)$$

$$PR = (9985.33) (0.0019)$$

$$PR = 18.9721 \text{ kcal/kg com.}$$

III.-CREDITOS.

Solo existe el credito por calor sensible en el combustible CCC.

CCC=(1kg) Cpc(TDIA-TABS)
 CCC=(1) (0.48) (55-26.5)
 CCC=13.68 kcal/kg.

IV VALORES FINALES

CALOR TOTAL ENTRADA CTE=PCSP+CREDITOS
 CTE=9972.1384+13.68
 CTE=9985.3344 kcal/kg.

% PERDIDAS

PGS/CTE=530.49/9985.33=0.0531
 PHA/CTE= 13.87/9985.33=0.0013
 PHC/CTE=0.6438/9985.33=0.0064
 PCH/CTE=632.03/9985.33=0.0633
 PCO/CTE= 10.26/9985.33=0.0010
 PPI/CTE= 17.90/9985.33=0.0017
 PVA/CTE= 2.30/9985.33=0.0002
 PR/CTE= 18.97/9985.33=0.0019

 %TOTAL DE PERDIDAS=(0.1228)×100=12.2827

EFICIENCIA=100-%TOTAL DE PERDIDAS..

EFICIENCIA=100-12.28
 EFICIENCIA=87.7173%

REGIMEN TERMICO BRUTO RTB=..... CTE(Wc)
 KW-h

RTB=(9985.33)(68580)/300,000
 RTB=2282.64 kcal/KW-h.

CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE CEC

CEC=kg combustible en 1 hr/KW-hproducidos
 CEC=(68.58)/(300)
 CEC=0.2286 kg com/KW-h.

APENDICE 2

DATOS PARA EL CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR DE LA UNIDAD No. 5 DE LA C. T. FRANCISCO VILLA. CD DELICIAS CHIH. EN CONDICIONES INICIALES.

ANALISIS DE COMBUSTOLEO.

COMBUSTOLEO		% PESO
CARBON C		83.890
HIDROGENO	H ₂	11.070
AZUFRE S		3.80
NITROGENO	N ₂	0.270
HUMEDAD	H ₂ O	1.30
CENIZAS		0.060
GRAVEDAD ESPECIFICA		--

ANALISIS DE GASES
(SALIDA DE CHIMENEA)

ELEMENTO	% VOL.	PESO MOLEC.
O ₂	4.0	32.0
CO ₂	12.414	44.01
CO	0.021	28.01
N ₂	83.36	28.02

PARTICULAS
(mg/m³N) 650.00

PODER CAL. SUP. VOL. CTE.		PCSV	9910.0
FLUJO VAP. ATOMIZACION	kg/kg	com	0.0381
FLUJO DE COMBUSTOLEO	kg/Hr		35200
CARBONO EN PARTICULAS	%		0.70

TEMPERATURAS			
BULBO SECO AMBIENTE	TABS	:C	23.0
BULBO HUMEDO AMBIENTE	TABH	:C	14.5
COMBUSTOLEO	IDIA	:C	44.0
GASES CHIMENEA	TG15	:C	167.5
VAPOR DE ATOMIZACION	TVAP	:C	310.0
PROM. AIRE ENT. PRECA	TA7	:C	28.5

PRESIONES
PRESION ATMOSFERICA
PRESION VAPOR ATOMIZACION
GENERACION BRUTA

PA	mm Hg	657.0
PVAT	kg/cm ²	12.5
GB	KW-H	150,000

I.--DATOS

1. PODER CALORIFICO SUPERIOR A PRESION CONSTANTE PCSP.

PCSP= PCSV+ 146.9 H
 PCSP= 9910.0+ 146.9 (.1107)
 PCSP= 9926.26 kcal/kg.

2. KG DE GASES DE COMBUSTION POR KG DE COMBUSTIBLE W'G.

$$W'G = \frac{44.01(CO_2) + 32(O_2) + 28.02(N_2) + 28.01(CO)}{12.01(CO_2 + CO)} \dots ((Cc) + 12.01(Sc) / 32.07)$$

$$W'G = \frac{44.01(12.41) + 32(4.00) + 28.02(83.3) + 28.01(0.021)}{12.01(12.41 + 0.021)} \dots ((0.838) + 12.01(0.0038) / 32.07)$$

W'G=17.2085 kg gas/kg com.

3. KG DE AIRE POR KG DE COMBUSTIBLE W'A.

$$W'A = \frac{28.02(N_2) + 12.01(Sc) - (Cc)}{12.01(CO_2 + CO) + 32.07} \dots - (Nc)$$

$$W'A = \frac{28.02(83.36) + 12.01(0.389) - (0.838)}{12.01(12.41 + 0.021) + 32.07} \dots - (0.0027)$$

W'A=17.3699 kg aire/kg com.

4. CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION.

Se obtiene de la figura 7 PTC. 4.1 ASME
 con: $T = TG15 + TABS/2$, relación C/H, %CO₂
 $T = 167.5 + 28.5/2 = 98.00$; $C = 208$; F
 $C/H = 83.89/11.07 = 7.57$
 $\%CO_2 = 12.414$

Cpg=0.240 kcal/kg:C

5. HUMEDAD DEL AIRE A LA ENTRADA CORREGIDA ha.

Se obtiene de tabla psicométrica para presión atmosférica, corrigiendo por altitud del lugar sobre el nivel del mar.
 con: TABS, TABH..... ha+corrección por altitud

ha=0.0089 kg agua/ kg aire seco

822

6. HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION hg

$$hg = 8.936(Hc) + W'AhA + hc$$

$$hg = 8.936(.1107) + (17.3699)(0.0089) + (0.013)$$

$$hg = 1.1568 \text{ kg agua/kg com.}$$

7. ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA EN LOS GASES DE COMBUSTION HV15.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado con:

$$P = 1 \text{ psia}$$

$$TQ15 = 167.5; C = 333.5; F$$

$$HV15 = 672.83 \text{ kcal/kg.}$$

8. ENTALPIA DE VAPOR DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado con:

$$T_{\text{ambiente}}(TABS) = 23.0; C$$

$$HVA = 609.88 \text{ kcal/kg.}$$

9. ENTALPIA DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HWA.

Se obtiene de tablas de vapor (lado agua) con:

$$T_{\text{ambiente}}(TABS) = 23.0; C$$

$$HWA = 23.09 \text{ kcal/kg.}$$

10. ENTALPIA DE VAPOR DE ATOMIZACION.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado con:

$$T_{\text{vapor atom}}(TVAT) = 310; C$$

$$\text{Presión vapor de atom.} = 10.0 \text{ kg/cm}^2 + \text{Patm.}$$

$$HVAT = 753.97 \text{ kcal/kg.}$$

II.-PERDIDAS..

1. POR GASES SECOS PGS.

PGS=W'G(Cpg)(TG15-TABS)
 PGS=(16.613) (0.241) (159-26.5)
 PGS=530.49 kcal/kg com.

2. POR HUMEDAD EN EL AIRE PHA.

PHA=ha W'A(HV15-HVA)
 PHA=(0.0138)(16.6429) (670.4706-610.02)
 PHA=13.8837 kcal/kgcom.

3. POR HUMEDAD EN EL COMBUSTIBLE PHC.

PHC=hc(HV15-HWA)
 PHC=(0.001) (670.4706-26.6232)
 PHC=0.6438 kcal/kg com.

4. POR COMBUSTION DE HIDROGENO PCH.

PCH=8.936 (H) (HV15-HWA)
 PCH=8.936(0.10986) (670.4306-26.6232)
 PCH=632.03 kcal/kg com.

5. POR FORMACION DE CO PCO.

CO
 PCO=..... (5644) (Cc)
 CO+CO₂
 (0.028)
 PCO=..... (5644) (0.8465)
 (0.028+13)

PCO=10.269 kcal/kg com.

6. POR PARTICULAS INQUEMADAS PPI.

(0.1804)
 PPI=.....(particulas en mg/Nm3)(W'G)(%Cp)
 P.M.G.

donde:

$$P.M.G. = 32XO_2 + 44XC0_2 + 28(XCO + XN_2)$$

Y

$$X_n = \%n/100$$

$$P.M.G. = 32(0.04) + 44(0.1241) + 28(0.00021 + 0.8336) = 30.0871$$

$$P.P.I. = \dots \dots \dots (0.18044) \quad (650) \quad (17.2085) \quad (0.70) \\ (30.0871)$$

$$P.P.I. = 46.95 \text{ kcal/kg com.}$$

7. POR VAPOR DE ATOMIZACION PVA.

$$PVA = WVAT (HV15 - HVA) \\ PVA = (0.0381)(672.83 - 609.88) \\ PVA = 2.3984 \text{ kcal/kg com.}$$

8. POR RADIACION PR.

Se obtiene de la figura 8 P.T.C. con el calor total de entrada en millones de BTU/hr=0.90 o se toma de datos de diseño de la unidad.

$$PR = (CTE) (\% PR) \\ PR = (9936.34) (0.0023) \\ PR = 22.8536 \text{ kcal/kg com.}$$

III.- CREDITOS.

Solo existe el credito por calor sensible en el combustible CCC.
CCC=(1 kg) Cpc(Tdia-IABS)
CCC=(1) (0.48) (44-23.0)
CCC= 10.08 kcal/kg.

IV VALORES FINALES.

CALOR TOTAL ENTRADA CTE=PCSP+CREDITOS
CTE=9926.26+10.08
CTE=9936.34 kcal/kg.

% PERDIDAS

PGS/CTE= 576.14/9936.34=0.057983
PHA/CTE= 9.73/9936.34=0.000979
PHC/CTE= 8.44/9936.34=0.000850
PCH/CTE= 642.75/9936.34=0.064687
PCO/CTE= 7.99/9936.34=0.000805
PPI/CTE= 46.45/9936.34=0.004725
PVA/CTE= 2.39/9936.34=0.000241
PR/CTE= 22.85/9936.34=0.002300

%TOTAL DE PERDIDAS=(0.1325)*100

EFICIENCIA=100-ZPERDIDAS

EFICIENCIA=100-13.25
EFICIENCIA=86.75%

REGIMEN TERMICO BRUTO RTB=CTE(WC)/KW-h
RTB=9936.34(35200)/150 000
RTB=2331.72 kcal/KW-h.

CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE CEC.

CEC=kg combustible en 1 h/KW-h producidos
CEC= 35200/150 000
CEC=0.2347 kg com/KW-h

DATOS PARA EL CALCULO DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR DE VAPOR DE LA UNIDAD 5 DE LA C.T. FRANCISCO VILLA DE CD. DELICIAS CHIH. EN CONDICIONES FINALES.

ANALISIS DE COMBUSTOLEO

COMBUSTOLEO	% PESO
CARBON C	83.89
HIDROGENO H ₂	11.07
AZUFRE S	3.80
NITROGENO N ₂	0.27
OXIGENO O ₂	-
HUMEDAD Hc	1.30
CENIZAS	0.060
GRAVEDAD ESPECIFICA	--

ANALISIS DE GASES
(SALIDA DE CHIMENEA)

ELEMENTO	% VOL	PESO MOLECULAR
O ₂	4.000	32.00
CO ₂	12.570	44.01
CO	0.0150	28.01
N ₂	83.415	28.02

PARTICULAS mg/m₃N 475.00

PODER CAL. SUP. VOL.CTE		PCSV	9910.0
FLUJO VAP ATOMIZACION	kgvap/kg com		0.0381
FLUJO DE COMBUSTOLEO	kg/Hr.		34750
CARBONO EN PARTICULAS	%		0.70

TEMPERATURAS

BULBO SECO AMBIENTE	TABS	:C	20.0
BULBO HUMEDO AMBIENTE	TABH	:C	13.5
COMBUSTOLEO (TANQUE DE DIA)	TDIA	:C	80.0
GASES DE CHIMENEA	TG15	:C	164.5
VAPOR DE ATOMIZACION	TVAT	:C	325.0
PROM. ENT. PRECAS (TREF.)	TA7	:	26.0

PRESIONES

PRESION ATMOSFERICA

PA mm Hg

657.0

PRESION VAPOR ATOMIZACION

PVAT kg/cm²

12.5

GENERACION BRUTA

GB KW-H

150,000

I.-DATOS

1. PODER CALORIFICO SUPERIOR A PRESION CONSTANTE PCSP

$$\begin{aligned} \text{PCSP} &= \text{PCSV} + 146.9 \text{ H} \\ \text{PCSP} &= 9910 + 146.9(0.1107) \\ \text{PCSP} &= 9926.26 \text{ kcal/kg.} \end{aligned}$$

2. KG DE GASES DE COMBUSTION POR KG DE COMBUSTIBLE W'G.

$$\text{W'G} = \frac{44.01(\text{CO}_2) + 32(\text{O}_2) + 28.02(\text{N}_2) + 28.01(\text{CO})}{12.01(\text{CO}_2 + \text{CO})} \dots ((\text{Cc}) + 12.01(\text{Sc}) / 32.07)$$

$$\text{W'G} = \frac{44.01(12.57) + 32(4) + 28.02(83.415) + 28.01(0.015)}{12.01(12.57 + 0.015)} \dots ((.8389) + 12.01(.0038) / 32.)$$

W'G = 17.0386 kg gas/kg com.

3. KG DE AIRE POR KG DE COMBUSTIBLE W'A.

$$\text{W'A} = \frac{28.02(\text{N}_2) + 12.01(\text{Sc})}{12.01(\text{CO}_2 + \text{CO}) + 32.07} \dots (\text{Cc} + \dots) - \text{Nc}$$

0.7685

$$\text{W'A} = \frac{28.02(83.415) + 12.01(0.038)}{12.01(12.57 + 0.015) + 32.07} \dots (0.8389 + \dots) - (0.0027)$$

0.7685

W'A = 17.1616 kcal/kg com

4. CALOR ESPECIFICO DE LOS GASES DE COMBUSTION Cpg.

Se obtiene de la figura 7 PTC 4.1 ASME
 con: $T = \text{IG15} + \text{TABS}/2$; relación C/H; %CO₂
 $T = 164.5 + 26.0/2 = 95.25$; $C = 203.45$; F
 $C/H = 83.89/11.07 = 7.57$
 $\% \text{CO}_2 = 12.57$

Cpg = 0.241 kcal/kg:C

5. HUMEDAD DEL AIRE A LA ENTRADA CORREGIDA ha.

Se obtiene de tabla psicométrica para presión atmosférica, corrigiendo por altitud del lugar sobre el nivel del mar.
 con: TABS, TABS.....ha nivel mar+ corrección por altitud

ha = 0.0079 kg agua/kg com.

6. HUMEDAD EN LOS GASES DE COMBUSTION hg.

$$hg = 8.936(Hc) + W'A hA + hc$$

$$hg = 8.936(0.1107) + (17.1616) (0.0079) + (0.013)$$

$$hg = 1.1378 \text{ kg agua/kg com.}$$

7. ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA EN LOS GASES DE COMBUSTION HV15.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado

$$\text{con: } P = 1 \text{ psia}$$

$$T_{G15} = 164.5 : C$$

$$HV15 = 671.45 \text{ kcal/kg.}$$

8. ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HVA.

Se obtiene de tablas de vapor saturado

$$\text{con: } T_{\text{ambiente}}(T_{ABS}) = 20.0 : C$$

$$HVA = 606.22 \text{ kcal/kg.}$$

9. ENTALPIA DE AGUA A TEMPERATURA AMBIENTE HWA.

Se obtiene de tablas de vapor (lado agua)

$$\text{con: } T_{\text{ambiente}}(T_{ABS}) = 20.0 : C$$

$$HWA = 20.03 \text{ kcal/kg.}$$

10. ENTALPIA DEL VAPOR DE ATOMIZACION HVAT.

Se obtiene de tablas de vapor sobrecalentado

$$\text{con: } T_{\text{vap atom}}(T_{VAT}) = 325 : C$$

$$\text{PRESIN VAPOR DE ATOMIZACION} = 12.5 \text{ kg/cm}^2 = +P_{\text{atm.}}$$

$$HVAT = 740.76 \text{ kcal/kg.}$$

II.-PERDIDAS..

1. POR GASES SECOS PGS.

PGS=W'G(Cpg)(TG15-TABS)
PGS=(17.0386) (0.24) (164.5-26.0)
PGS=566.36 kcal/kg com.

2. POR HUMEDAD EN EL AIRE PHA.

PHA=ha W'A(HV15-HVA)
PHA=(0.0079)(17.1616) (671.45-606.22)
PHA=8.8437 kcal/kg com.

3. POR HUMEDAD EN EL COMBUSTIBLE PHC.

PHC= hc(HV15-HWA)
PHC= (0.013) (671.45-20.03)
PHC= 8.4685 kcal/kg com.

4. POR COMBUSTION DE HIDROGENO PCH.

PCH= 8.936 (H) (HV15-HWA)
PCH= 8.936(0.1107) (671.45-20.03)
PCH= 644.39 kcal/kg com.

5. POR FORMACION DE CO PCO.

CO
PCO=..... (5644) (Cc)
CO+CO₂
(0.015)
PCO= (5644) (0.8389)
(0.015+12.57)
PCO=5.64 kcal/kg com.

6. POR PARTICULAS INQUEMADAS PPI.

(0.1804)
PPI=..... (particulas en mg/N m3)(W'G)(%Cp)
P.M.G.

donde:

$$P.M.G. = 32(XO_2) + 44(XCO_2) + 28(XCO + XN_2)$$

X_n

$$X_n = \dots$$

100

$$P.M.G. = 32(0.04) + 44(0.1257) + 28(0.00015 + 0.83415) = 30.1712$$

(0.18044)

$$PPI = \dots (475)(17.0386)(0.7)$$

30.1712

$$PPI = 33.88 \text{ kcal/kg com.}$$

7. POR VAPOR DE ATOMIZACION PVA.

$$PVA = W_{VAT} (H_{V15} - H_{VA})$$

$$PVA = (0.0381)(671.45 - 60.22)$$

$$PVA = 2.4765 \text{ kcal/kg com.}$$

8. POR RADIACION PR.

Se obtiene de la figura B P.T.C. 4.1 con el calor total de entrada en millones de BTU/hr = 0.90 o se toma de datos de diseño de la unidad.

$$PR = (CTE)(ZPR)$$

$$PR = (9952)(0.0023)$$

$$PR = 22.89 \text{ kcal/kg com.}$$

III.-CREDITOS

Solo existe el credito por calor sensible en el combustible CCC

CCC=(1kg) Cpc(TDIA-TABS)

CCC=(1) (0.48) (80-26)

CCC=25.92 kcal/kg.

IV VALORES FINALES

CALOR TOTAL ENTRADA CTE=PCSP+CREDITOS

CTE=9926.26+25.92

CTE=9952.18 kcal/kg.

% PERDIDAS

PGS/CTE=566.36/9952.18=0.056900

PHA/CTE= 8.84/9952.18=0.000889

PHC/CTE= 8.46/9952.18=0.000851

PCH/CTE=644.39/9952.18=0.064749

PCO/CTE= 5.64/9952.18=0.000567

PPI/CTE= 33.88/9952.18=0.003404

PVA/CTE= 2.47/9952.18=0.000249

PR/CTE= 22.89/9952.18=0.002300

%TOTAL DE PERDIDAS=(0.012990)x100

EFICIENCIA=100-%TOTAL DE PERDIDAS.

EFICIENCIA=100-12.99

EFICIENCIA=87.01%

REGIMEN TERMICO BRUTO RTB=.....
CIE(Wc)
KW-h

RTB=(9952.18)(34750)/150,000

RTB=2305.58 Kcal/KW-h.

CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE CEC

CEC=kg combustible en 1 hr/KW-hproducidos

CEC=(34750)/(150,000)

CEC=0.2317 kg com/KW-h.