

*República de Cuba*  
*Ministerio de Educación Superior*  
*Instituto Superior Minero Metalurgico*  
*Facultad de Metalurgia-Electromecánica.*  
*VI Contingente Estudiantil Universitario*  
*" 13 de Marzo "*

**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Titulo: Estudio sobre la combustión incompleta del  
petróleo.**

*Diplomante: Luis Ramón Peña Pico.*

*Tutor: Ing. César Bustamante González.*

*Moa 1989*

*"Año 31 de la Revolución"*

## DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a la *Revolución Cubana* que como parte del pueblo trabajador nos dió la oportunidad de estudiar y superarnos para ampliar nuestros conocimientos en los adelantos científico-técnicos, para que podamos ser más útiles al desarrollo industrial de nuestro país en aras de consolidar la construcción del socialismo, objetivo trazado por el *Programa del Partido Comunista de Cuba* para los próximos años.

*A mis padres, a mis hermanos.*

A nuestros combatientes internacionalistas caídos en Angola.

## AGRADECIMIENTO

Sería injusto que comenzáramos este trabajo sin antes agradecer a todos los compañeros que han hecho posible este momento.

Manifestamos nuestro más sinceros agradecimientos a nuestro queridos profesores por transmitirnos sus conocimientos y en particular al Ing. César Bustamante González Tutor de este Trabajo de Diploma quien ha sido ejemplo de abnegación y sacrificio y ha hecho patente el pensamiento de nuestro Héroe Nacional:

*" Al llegar a la tierra todo hombre tiene derecho a que se le eduque y después en pago el deber de contribuir a la educación de los demás. "*

Con esa premisa nos graduaremos y prometemos seguir su ejemplo.

Muchas Gracias.

### RESUMEN:

Se estudia la combustión incompleta del petróleo (Mazut), utilizando un nuevo quemador en etapa de diseño, evaluando las relaciones de dependencia entre diferentes variables, estudiando las características de los gases producto de la combustión que favorezcan la reducción de los minerales lateríticos.

Se analizan las posibilidades de aplicación de los diseños estadísticos de experimentos, empleando un diseño (PLACKETT-BURMAN) para la evaluación de la significación de diferentes variables independientes.

Para el procesamiento de los datos experimentales, se utilizan programas de computación en diferentes lenguajes y máquinas.

Se establece la dependencia de las relaciones gaseosas de las características de operación y se determina la necesidad de trabajar con mayor presión del petróleo.

Se recomienda a la industria, controlar, en la operación, variables que aún no lo son.



## INDICE

<u>CAPITULO I:</u>	Pág.
1.1 Introducción .....	5
1.2 Objetivos .....	6
<u>CAPITULO II: Fundamentos teóricos.</u>	
2.1 Hornos de reducción de múltiples soleras .....	7
2.2 Teoría de la combustión .....	9
2.3 Combustibles Líquidos .....	13
2.4 Cámara de combustión .....	14
2.5 Quemador. Características de Operación .....	15
<u>CAPITULO III: Materiales y métodos.</u>	
3.1 Descripción de la instalación experimental ...	17
3.2 Características de los materiales e instrumentos de medición empleado .....	19
3.3 Plan de prueba del quemador TCHE II en la cámara -12 sur Horno 9 .....	21
3.3.1 Base del plan de prueba .....	21
3.3.2 Método de trabajo .....	25
<u>CAPITULO IV: Resultados.</u>	
4.1 Resultados de los experimentos .....	30
4.2 Procesamiento de datos .....	39
4.2.1 Resultados del balance de masa .....	39
<u>CAPITULO V: Analisis de los resultados.</u>	
5.1 Valores promedio de los resultados del balance de masa para cada experimento .....	44
5.2 Desarrollo estadístico .....	45
5.3 Análisis de los modelo obtenidos .....	61
<u>CAPITULO VI: Conclusiones</u> .....	65
<u>CAPITULO VII: Recomendaciones</u> .....	67
<u>CAPITULO VIII</u> Símbolos .....	69
<u>CAPITULO IX</u> <u>Bibliografía</u> .....	71
<u>CAPITULO X: Anexos</u> .....	72

Capitulo: I1.1 Introduccion

Nuestro partido y gobierno han patentizado la importancia de la industria extractiva del níquel, factor fundamental para el desarrollo económico y social del país, el cual recibirá un mayor impulso con el que se respaldará el propósito de avanzar firmemente en la creación de la Base Técnico Material del Socialismo y a la vez fortalecer el proceso de integración económica entre los diferentes sectores y ramas de la economía, por eso en la metalurgia no ferrosa se priorizará la creación de nuevas capacidades productivas y la rehabilitación de las plantas existentes para la producción y diversificación de productos de níquel y cobalto con calidad y valores superiores por toneladas métricas.[1]

El aseguramiento de las necesidades de la economía exigirá el desarrollo continuado del complejo de combustible y energía nacional y del incremento significativo de la eficiencia energética.

El desarrollo de estas tareas se deberá acompañar de un amplio programa científico-técnico para el ahorro y uso racional de la energía en todas las esferas de la economía nacional, teniendo en cuenta ante todo la introducción de tecnologías más eficientes y el mejoramiento de las existentes.

Esta investigación recoge los resultados de un estudio teórico práctico de la combustión incompleta del petróleo (Mazut), prestando atención a las restricciones y diferentes factores que pueden influir en la combustión en una instalación industrial.

### 1.2: Objetivos.

El presente trabajo sobre la combustión incompleta del petróleo (Mazut), tiene como objetivos:

1.- Evaluar las relaciones de dependencia entre diferentes variables de los gases producto de la combustión incompleta y las características de operación de los quemadores.

2.- Evaluar la posibilidad de aplicación de técnicas de análisis estadísticos a la evaluación o estudio de las características de los gases producto de la combustión incompleta del petróleo (Mazut).

## Capítulo II Fundamentos teóricos.

### 2.1: Hornos de reducción de múltiples soleras.

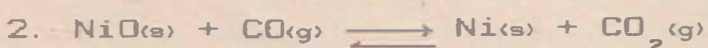
El horno es un cilindro de 23 m de altura por 6.8 m de diámetro, revestido interiormente por ladrillos refractarios que son los que forman los 17 pisos, posee un eje central, que es movido por un motor de 25 Kw, al que van acoplados 68 brazos, dispuestos radialmente 4 en cada piso, y estos están equipados con dientes que son los encargados de mover el mineral en la solera y provocar la caída de este de una a otra.[12]

El objetivo de estos hornos es la reducción selectiva de los elementos oxidados de níquel, es decir el óxido de níquel hasta el níquel metálico, y a la vez que la menor cantidad de óxido de hierro pase a hierro metálico.

La reducción es un proceso heterogéneo donde las reacciones ocurren en el límite de la fase sólida-gaseosa, y la reacción va estar limitada por la velocidad de difusión o sea la penetración del gas al interior de la partícula y la salida de los resultantes de la reacción.

Los Hornos poseen 12 cámaras de combustión, encargadas de producir los gases calientes capaces de calentar sus componentes, compensar las pérdidas por radiación y convección, así como aportar los componentes reductores necesarios para mantener una adecuada atmósfera reductora.

Las reacciones químicas de la reducción de los óxidos de hierro y níquel son:







Como puede observarse estas reacciones tienen carácter reversible, teniendo en cuenta que el NiO y el Ni metálico se encuentran en estado sólido, podemos determinar las constantes de equilibrio.

$$K_{p_1} = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2}}$$

$$K_{p_2} = \frac{P_{\text{CO}_2}}{P_{\text{CO}}}$$

Donde:

$P_{\text{H}_2\text{O}}$  y  $P_{\text{CO}_2}$  - Presiones parciales de los vapores de agua y del dióxido de carbono cuando el sistema se encuentra en equilibrio.

$P_{\text{H}_2}$  y  $P_{\text{CO}}$  - Presiones parciales del  $\text{H}_2$  y del  $\text{CO}$  respectivamente para las condiciones de equilibrio.[4]

Como al ocurrir la reacción química el número de moles de gases en el sistema no varía se puede escribir  $K_p$  sustituyendo las presiones parciales.

$$K_{H_2} = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot B_{\text{H}}}{M_{\text{H}_2} \cdot B_{\text{H}}}$$

$$K_{\text{CO}} = \frac{M_{\text{CO}_2} \cdot B_{\text{H}}}{M_{\text{CO}} \cdot B_{\text{H}}}$$

En conclusión la reducción se realiza con un ritmo tanto de calentamiento para que se descompongan lentamente los silicatos lo que permitiría mantener el debido exceso de gases reductores obtenidos como resultados de la combustión incompleta del combustible y una mayor recuperación teórica de níquel y cobalto.[4]

La concentración de gas es importante porque la reducción se lleva a efecto gracias al contacto de dicho gas reductor con el mineral tanto en la superficie de la solera como en el vuelo de las partículas de un hogar a

otro.

La atmósfera reductora del horno se enriquece con el gas reductor que se produce en cada cámara producto de la combustión incompleta del petróleo en los quemadores.[4]

## 2.2 Teoría de la combustión.

Combustión se define: cualquier, reacción química a través de la luz, exotérmica que se realiza con determinada velocidad, producción de radiaciones, no necesariamente en el espectro visible y se desarrolla en fase gaseosa o heterogénea.[5]

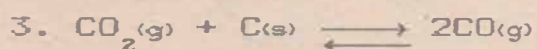
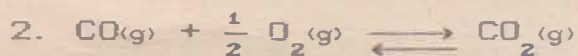
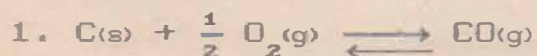
El mecanismo de la combustión consiste en el proceso donde los átomos de las sustancias reaccionantes (combustibles) reaccionan con oxígeno para formar productos gaseosos.[5]

La combustión del petróleo ocurre en etapas simple o complejas que dependen del tipo de combustible.[5]

En nuestro caso la combustión es incompleta por lo que requiere de mayores cuidados en su ejecución para que las pérdidas de carbono en forma de hollín no sean muy elevadas.

El calentamiento del mineral se produce a partir de cámaras de combustión donde quemadores de petróleo producen los gases calientes necesarios para calentar y absorber los procesos endotérmicos del horno.[4]

La obtención de gases reductores está dada en la aereación en defecto, según las reacciones siguientes:



Con adición de vapor de agua o la humedad del aire atmosférico se producirá la reacción siguiente:



El exceso de esta humedad produciría una reacción no deseada:



Para el logro de una reducción y una economía térmica adecuada hay que tener en cuenta factores que están directamente relacionados con la combustión incompleta del petróleo como son:

#### 1.- Hollín carbónico:

Constituye una pérdida térmica permanente, el hollín no arde durante la combustión.

La cantidad de carbono perdido como hollín o en forma de escoria carbónica disminuye linealmente con el aumento de la aereación.[6]

El carbono puede estar presente no sólo en forma de hollín sino en forma de escoria, la formación de ambos deben ser evitadas a toda costa, esto lo podremos lograr manteniendo la aereación en el rango requerido.

Se han realizado investigaciones para evaluar la influencia del humedecimiento del aire para la combustión y determinar si favorece la transformación de más carbono en compuestos gaseosos por unidad de aire que en el aire seco.

#### 2.- Hidrocarburos:

El calor potencial contenido en los hidrocarburos es proporcional a la cantidad de hidrocarburos formados por kilogramos de petróleo, esta cantidad disminuye con el aumento de la aereación.

Los hidrocarburos incluyendo el metano ( $CH_4$ ) pueden provocar trastornos e irregularidades en el proceso de



reducción, estos constituyen una pérdida permanente desde el punto de vista de la reducción misma. El mineral reducido absorbe gran parte de los hidrocarburos y estos traen pérdidas en el proceso de extracción (lixiviación).

La cantidad excesiva de hidrocarburos pueden ser eliminadas con la aplicación adecuada del procedimiento de la combustión incompleta. La cantidad de hidrocarburos durante la combustión incompleta del petróleo en las aereaciones que se corresponden con la ausencia de carbono en forma de hollín y de escoria no excede de 0.4 %.[6]

### 3. Capacidad reductora de los gases.

Para expresar la capacidad reductora de los gases se establece en la práctica por medio de la relación compuesta: oxidantes-reductores

$$KCOH_2 = \frac{MTCO_2 \text{ BH} + MTH_2O \text{ BH}}{MTCO \text{ BH} + MTH_2 \text{ BH}}$$

Mientras más pequeña sea esta relación mayor será la capacidad reductora de los gases. Cualque exceso de CO<sub>2</sub> y/o H<sub>2</sub>O tiende a incrementar dicha relación y disminuirá el poder reductor de los gases.

El poder reductor de los gases y las relaciones dependen en gran medida de la ejecución del procedimiento aplicado para obtener la combustión incompleta.[6]

### 4. Calor potencial:

El calor potencial presente en el CO y el H<sub>2</sub> disminuye con el aumento de la aereación.

La capacidad reductora y el calor aprovechable de los gases tienen un máximo exponente cuando la aereación se corresponde con la completa eliminación del carbono.[6]



Otros aspectos de gran importancia tanto teórica como práctica de la combustión incompleta son los siguientes:

1.- Todos los combustibles líquidos son considerablemente volátiles antes de la temperatura de combustión, muchos están sujetos a la descomposición térmica acompañada de la deposición de hollín carbónico extremadamente dividido.[6]

2.- Los hidrocarburos calientes se mezclan con el oxígeno, se combinan con este y dan lugar a productos oxigenados los cuales no forman deposiciones carbónicas en la descomposición térmica.

Estos dos aspectos muestran la importancia de la mezcla íntima entre las gotas de petróleo y el aire de la combustión (atomización), esto constituye un factor determinante para la aplicación exitosa de la combustión incompleta.[6]

El principal factor que determina el éxito y la economía de la combustión incompleta es la atomización del petróleo. Este se divide en pequeñas partículas formando un vapor que es el que se quema. La proporción de evaporación y la posterior mezcla con el aire depende de la intensidad de atomización.

La correcta atomización es importante para cuando la combustión presenta exceso de aire, una partícula de hollín una vez formada bajo las condiciones de la combustión incompleta, se desprenderá por la acción de los gases calientes, hacia una zona donde no exista oxígeno libre el cual pueda garantizar la combustión de la misma. La reacción entre el hollín y el dióxido de carbono se manifiesta de forma incompleta durante el corto período de que dispone la reacción en la cámara de

combustión.

El hollín puede ser limitado siempre que la cantidad de aire de la combustión no disminuya y se sitúe por debajo del 60 % de la cantidad requerida para lograr la combustión teóricamente perfecta (estequiométrica).

Un factor importante es la formación de escoria en el tubo de ignición o piedra debido a la mezcla deficiente entre el aire y el petróleo al hacer contacto con cualquier sólido en ausencia del oxígeno requerido para el proceso de oxihidrilación.[6]

### 2.3 Combustible líquidos

Los combustibles líquidos son de gran importancia y uso en la industria pirometalúrgica independientemente del incremento de utilización y búsqueda de otras fuentes de energía.[2]

La viscosidad y el calor latente así como la temperatura de ignición son parámetros de gran importancia a tener en cuenta.

Debe de mantenerse una temperatura en el petróleo, tal que la viscosidad sea factible para el bombeo y óptima para el mezclado combustible-aire.[7]

El combustible líquido utilizado en los hornos de reducción de nuestra planta es Mazut 100, que posee características aproximada como sigue tomada en 1988:

Densidad:	$0.974 \text{ t/m}^3 = 974 \text{ Kg/m}^3$
Viscosidad:	$124.69 \text{ STK} = 0.012469 \text{ m}^2/\text{s}$
Calor latente:	$4677.1 \text{ Kcal/Kg} = 19596.04 \text{ KJ/Kg}$
Punto de Inflamación:	$120^\circ\text{C} = 393 \text{ K}$

Composición química:

C = 84.4 %

H = 12.2 %

S = 2.3 %

En los meses de prueba (año 1989) la característica del combustible Mazut 100 se comportó de la siguiente forma.[8]

Densidad =  $0.954 \text{ Kg/m}^3$

Viscosidad = 138.45 STK

Punto de inflamación =  $121.8 \text{ }^\circ\text{C} = 394.8 \text{ K}$

Composicion química:

C = 85.8 %

H = 11.7 %

S = 2.5 %

#### 2.4. Cámaras de combustión

Las cámaras de combustión son diseñadas para lograr un mayor contacto entre los fluidos aire-petróleo. Equipada con una piedra de ignición que se mantiene a una temperatura elevada durante la operación facilitando la rápida ignición del combustible en presencia del oxígeno del aire, la turbulencia provocada ayuda sustancialmente a la velocidad de la combustión.[7]

Los hornos de reducción de múltiples soleras cuentan con dos tipos de cámaras:

- 1.- Cilíndricas dobles horizontales.
- 2.- Cilíndricas simples horizontales.

Las piedras de ignición son fabricadas con material refractario de alta alúmina y elevada resistencia térmica. Se protege con ella los ladrillos de la cámara de los efectos de las altas temperaturas producidas en la zona de ignición.

La temperatura dentro de la cámara de combustión es de alrededor de los  $1300 \text{ }^\circ\text{C}$  a esta temperatura el monóxido de carbono (CO) es más estable químicamente que el dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Con estas cámara debe garantizarse las condiciones



aerodinámicas necesarias para la mezcla de los componentes de la combustión, así como para la evaluación de los productos de la combustión en las soleras.[7]

### 2.5 Quemador. Características de operación.

El quemador de petróleo TCHE - II está destinado para la pulverización y combustión del mismo, mediante el suministro de aire necesario a través de él.

La serie de quemadores TCHE - II y su conjunto aerodinámico fueron diseñados con vistas a darle solución a los problemas de la combustión en los hornos de reducción de soleras múltiples.

Atomiza mecánicamente con vapor o aire y en forma combinada, es decir, a altas presiones del combustible atomiza mecánicamente y a baja presiones con vapor o aire.

Está probado con aire estequiométrico o con exceso de aire. Se puede obtener un ángulo de atomización desde  $10.5^{\circ}$  -  $110^{\circ}$ .

Trabaja con presiones del combustible desde  $0.05$  -  $3.5$  Kgf/cm<sup>2</sup>, flujo de combustible de  $10$  -  $5000$  Kg/h.

Presiones de aire de  $0.2$  -  $6$  Kgf/cm<sup>2</sup> según el flujo de combustible.[8]

Se obtienen llamas anchas y cortas, largas y estrechas según convengan.

Se pueden diseñar según el principio de mezcla: con mezcla interna o externa.

En las pruebas que se han llevado a cabo (tanto a escala de laboratorio como industrial) se han obtenidos los siguientes logros:

1.- Flujo de combustible de  $10$  -  $200$  Kg/h



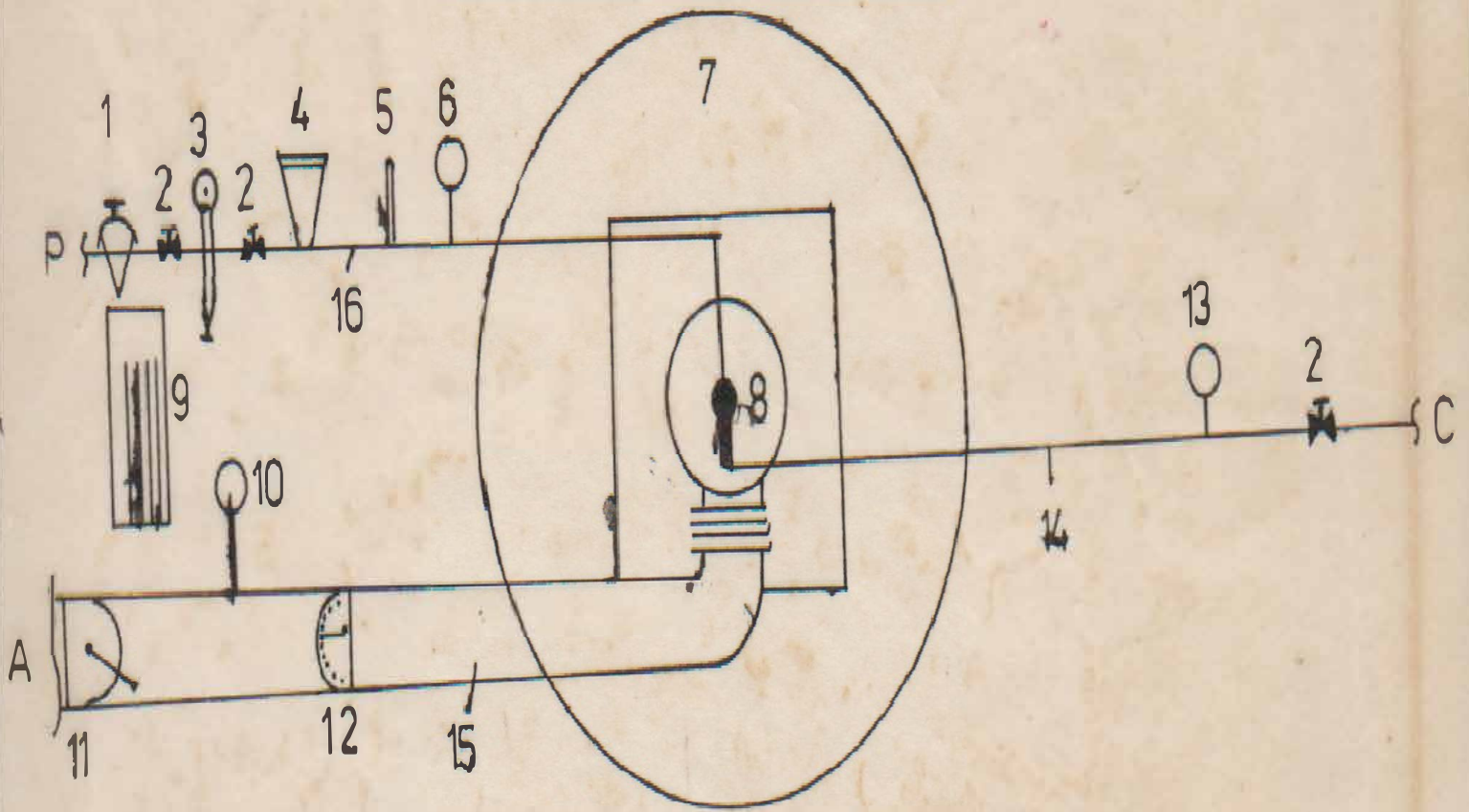
- 2.- Concentraciones de agente reductor (CO) desde 11.7  
- 19 % con porcentaje de aereación de 55 a 70 %
- 3.- Angulo de atomización de  $10.5^{\circ} \pm 1.5^{\circ}$
- 4.- Ha trabajado con presiones de combustibles de 0.05  
- 2.5 Kgf/cm<sup>2</sup>.


Es fácil su explotación y su contrucción, permite la inspección a la garganta durante la explotación.

Permite la limpieza de la piedra con facilidad, garantiza una alta estabilidad en la llama y ha permitido trabajar durante diez días sin ensuciamiento de la piedra.[7]

3.1.- Descripción de la instalación experimental.

La instalación experimental para la investigación está formada por: una cámara de combustión, un quemador tipo TCHE II, una línea de aire primario y una línea de alimentación del petróleo. Además la componen: filtro de petróleo, regulador de presión del petróleo, termómetro, manómetro y flujómetro de petróleo, dos microválvulas en la línea de aire secundario, cuatro columnas verticales de vidrio para medir la caída de presión del aire secundario, flujómetro para el aire secundario, manómetro en la línea de aire primario así como válvulas tipo agujas en las tres líneas.



- 
- 1.- Filtro de petróleo.
  - 2.- Válvulas tipo aguja.
  - 3.- Regulador de petróleo.
  - 4.- Fluviómetro de petróleo.
  - 5.- Termómetro de petróleo.
  - 6.- Manómetro de petróleo.
  - 7.- Cámara de combustión.
  - 8.- Quemador TCHE II.
  - 9.- Columna vertical de vidrio.
  - 10.- Fluviómetro de aire secundario.
  - 11,12.- Microválvula de aire secundario.
  - 13.- Manómetro de aire primario.
  - 14.- Línea de aire primario.
  - 15.- Línea de aire secundario.
  - 16.- Línea de petróleo.



3.2 Características de los materiales e instrumentos de medición empleado.

1.- Filtro SCAM:

Se utiliza para el filtrado de petróleo.

Características.

- a) Caudales desde 101 - 5000 m<sup>3</sup>/h.
- b) Filtro de lámina autolimpiante.
- c) Totalmente metálico.
- d) Adaptación fácil.
- e) Dimensiones reducidas.
- f) No necesita mantenimiento.
- g) Fabricación: España.

2.- Regulador de presión de petróleo WIKA

- a) es totalmente metálico.
- b) Dimensiones reducidas.
- c) Rango de medición desde 0 - 39.24 • 10<sup>4</sup> Pa (4 Kgf/cm<sup>2</sup>)
- d) Fácil manipulación.

Fabricación: España.

3.- Flujómetro de petróleo.

- a) Totalmente metálico.
- b) Presenta un integrador y una aguja para medir los litros por hora.
- c) Dimensiones considerables.
- d) Flujo máximo 25 L/h
- e) Flujo mínimo 5 L/h
- f) temperatura de trabajo 0-130°C

Fabricación: Checoslovaquia.

4.- Termómetro de vidrio para medir la temperatura del petróleo.

- a) El rango de medición de 273 - 473 K (0 - 200°C)
  - b) Fácil manipulación.
  - c) Dimensiones pequeñas.
- Fabricación: URSS.

5.- Manómetro para medir la presión de petróleo.

a) Totalmente metálico.

b) Dimensiones pequeñas.

c) Rango de medición:

$$0 - 24.525 \cdot 10^4 \text{ Pa (0 - 2.5 Kgf/cm}^2\text{)}$$

d) Fabricación: URSS.

6.- Manómetro para medir la presión de aire primario.

a) Totalmente metálico.

b) Dimensiones pequeñas.

c) Rango de medición: ● -  $58.86 \cdot 10^4 \text{ Pa (0 - 6 Kgf/cm}^2\text{)}$

Fabricación: URSS.

7.- Columnas verticales de vidrio para medir la caída de presión en la línea de aire secundario.

a) Fabricación sencilla.

b) Líquido, indicador agua.

c) Rango de medición: 0 - 7848 Pa (0 - 800 mm de H<sub>2</sub>O)

Fabricación: Taller de instrumento de medición.

8.- Fluviómetro de aire secundario.

a) Totalmente metálico.

b) Dimensiones pequeñas.

c) Rango de medición: 0 - 800 m<sup>3</sup>/h

Fabricación: Taller mecánico central.

9.- Microválvula para la regulación de aire secundario.

a) Totalmente metálico.

b) Angulo de giro: 0 - 160°.

c) Construcción sencilla.

d) Pequeño tamaño.

Fabricación: España.

10.- Cronómetro para determinar el flujo de petróleo puntual que pasa en un minuto.

Fabricación: URSS.

11.- Pirómetro de radiación INFRATRANCE 801

Fabricación inglesa.

12.- Termómetro de bulbo seco y bulbo húmedo para medir la temperatura del aire secundario.

Fabricación: URSS.

13.- Cromatógrafo LKM - 80 para el análisis de los gases

a) Muy sensible y requiere de condiciones especiales.

Fabricación: URSS.

#### Materiales Utilizados.

1.- Muestreadores de gases.

a) Fácil construcción.

b) Dimensiones pequeñas.

c) Pueden perder fácilmente la hermeticidad.

d) Pueden ser de vidrio o plástico.

2.- Manguera y varilla toma muestras.

a) Fácil construcción.

b) Manguera de goma.

c) Varilla de níquel.

Otros:

Guantes, linternas, y herramientas de mecánica.

3.3 .- Plan de pruebas del quemador TCHE II en la camara 12 sur horno 9.

3.3.1. Base del plan de prueba.

Se decidió aplicar para esta prueba los métodos estadísticos de experimentos ya que estos permiten minimizar el número de experimentos, disminuir los costos de la investigación, obtener mayor información sobre el sistema estudiado y poseer una mayor seguridad en las conclusiones alcanzadas. Cuestiones éstas que aventajan a los métodos tradicionales. Anteriores trabajos no fueron realizados con estos procedimientos.



Se realizó un estudio sobre cual método utilizar (simplex o factoriales), teniendo en cuenta su particularidad de aplicación. No se utilizó el método simplex a pesar de ser sencillo, pero en comparación con los métodos factoriales estos últimos recogen mayor información que pueden obtenerse a través de su aplicación.

En la pruebase aplican los diseños estadísticos de experimentos ya que estos permiten realizar un estudio más acertado sobre el sistema y establecer condiciones de operación determinada.

La aplicación de un diseño  $2^k$  implica la realización de un mayor número de experimentos que en esta fase de inicio de la investigación no sería recomendable, pues es más preciso conocer si las variables seleccionadas son las adecuadas y si los intervalos seleccionados son los adecuados.

Concretamente la selección de las variables independientes, los rangos de variación y su nivel de significación es el objeto de este trabajo, para poder fijar en un futuro trabajo los métodos más precisos a partir de los resultados alcanzados en este investigación.

Dentro de los diseños estadísticos de experimentos se seleccionó el método PLACKETT - BURMAN ya que es un método de selección de variables y en la realización de la prueba se quiere conocer cuales variables son significativas para los rangos establecidos de operación.

Para la realización de la prueba se escogieron para su estudio 7 variables las cuales dos de ellas son imaginarias.



Las cinco variables estudiadas se le seleccionaron un rango de operación máximo y otro mínimo con el objetivo de observar que significación podían presentar para luego en una posterior investigación aplicar otros métodos más precisos, es decir que el método PLACKETT - BURMAN serviría de base para la aplicación de otros métodos.

Las variables independientes que se estudiaron por este método son las siguientes:

<u>Variables</u>	<u>Denom.</u>	<u>U/m</u>	<u>Rango</u>	
			<u>Max.</u>	<u>Min.</u>
Flujo de Petróleo	X1	$\times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{h}$	80	50
Variable imaginaria	X2		+1	-1
Temp. del Petróleo	X3	$^{\circ}\text{C}$	130	115
Variable imaginaria	X4		+1	-1
Presión del regulador de Petróleo	X5	$\times 9.81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$	3	1
% de aereación	X6	%	65	50
Presión de aire primario	X7	$\times 9.81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$	2.5	1

Las funciones respuestas que se analizaron por medio del método estadísticos PLACKETT - BURMAN son las siguientes:

1.- Constante de equilibrio del monóxido de carbono, (KCO) o sea moles totales de  $\text{CO}_2$  base húmeda/ moles totales de CO base húmeda.

2.- Constante de equilibrio del hidrógeno ( $\text{KH}_2$ ) o sea moles totales de  $\text{H}_2\text{O}$  base húmeda/ moles totales de hidrógeno Base húmeda.

3.- Relación monóxido de carbono e hidrógeno  $\text{CO}/\text{H}_2$  o sea moles totales de CO base húmeda/ moles totales de  $\text{H}_2$  base húmeda.

4.- Fuerza impulsora de los gases ( $\text{KCOH}_2$ ) o sea moles totales de  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$  base húmeda/ moles totales de CO +

H<sub>2</sub> base húmeda.

5.- Volumen productos de la combustión base húmeda ( $V_{m^3PCBH}$ ), m<sup>3</sup> de gas producto de la combustión base húmeda/ kilogramos de mazut.

6.- Moles de Carbono en forma de hollín (MCHollín), kilogramos mol de carbono producto de la combustión en forma de Hollín/ Kilogramos de Mazut.

7.- Moles de Carbono gasificado (MCGASIF), o sea kilogramos mol de carbono producto de la combustión gasificado/ por kilogramo de mazut.

8.- Eficiencia de gasificación (EficGasif).

VARIABLES A CONTROLAR:

Se llevó un modelo donde se reflejaron los siguientes parámetros:

- Fecha y Hora.
- Caída de presión del aire secundario.
- Flujo de aire secundario.
- Presión en el regulador de petróleo.
- Temperatura del petróleo.
- Presión en línea del petróleo.
- Posición de la microválvula de aire secundario.
- Presión de aire primario.
- Presión en línea del ventilador de aire secundario.
- Temperatura de los gases.
- Temperatura de los refractarios.
- Temperatura del hogar 11.
- Composición de los gases:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ .
- Porcentaje de aereación.
- Radiaciones en diferentes puntos de la cámara.
- Temperatura en diferentes puntos de la pared de la cámara.
- Características visuales de la llama.
- Temperatura del petróleo a la entrada de la planta.
- Temperatura del bulbo seco y bulbo húmedo.

3.3.2. Método de trabajo.

Para la investigación se aplicó el método estadístico PLACKETT - BURMAN para siete variables independientes de las cuales dos de ellas son imaginarias y cinco reales y se realizaron 8 experiencias.

Funciones respuestas analizadas por el método:

1.- Constante de equilibrio del monóxido de carbono,

$$K_{CO} = \frac{M_{CO_2} BH}{M_{H_2} BH}$$

2.- Constante de equilibrio del hidrógeno,

$$K_{H_2} = \frac{M_{H_2O} BH}{M_{H_2} BH}$$

3.- Relación monóxido de carbono e hidrógeno,

$$\frac{CO}{H_2} = \frac{M_{CO} BH}{M_{H_2} BH}$$

4.- Fuerzas impulsoras de los gases,

$$K_{COH_2} = \frac{M_{CO_2} + H_2O}{M_{CO} + H_2}$$

5.- Volumen producto de la combustión base húmeda,  $V_{m^3 PCBH}$ , metros cúbicos de gas producto de la combustión base Húmeda/ kilogramos de Mazut.

6.- Moles de carbono en foema de Hollín,  $M_{CHollín}$ , Kilogramos mol de carbono producto de la combustión en forma de hollín / kilogramos de Mazut.

7.- Moles de carbono gasificado,  $M_{CGasif}$ , Kilogramo mol de carbono de la combustión gasificada/ kilogramo de Mazut.

8.- Eficiencia de gasificación,  $E_{ficGasif}$ .

Variables Independientes estudiadas.

<u>Variables Indepen</u>	<u>U/M</u>	<u>Max</u>	<u>Min</u>
X1. Flujo de Petróleo	$\times 10^{-3} m^3/h$	80	50
X2. Imaginaria		+1	-1
X3. Temp.del Petróleo	$^{\circ}C$	130	115
X4. Imaginaria		+1	-1
X5. Presión el regulador de Petróleo	$\times 9.81 \cdot 10^4 Pa$	3	1
X6. Porciento de aereación	%	65	50
X7. Presión de aire primario	$\times 9.81 \cdot 10^4 Pa$	2.5	1



El método asume como base de partida el modelo lineal para la regresión:

$$\hat{Y} = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_nX_n.$$

Donde:

$\hat{Y}$  - Variable estimada.

$B$  - Coeficiente de las variables independientes.

$X$  - Variables independiente.

Con el fin de simplificar los cálculos aumentar la precisión y generalizar las expresiones del cálculo de los coeficientes del modelo, se acostumbra a codificar las variables de forma que tomen valores de +1 para el nivel máximo y de -1 para el nivel mínimo mediante las fórmulas siguientes:

$$X_1 = \frac{X_1 - \frac{X_{1\text{máx}} + X_{1\text{mín}}}{2}}{\frac{X_{1\text{máx}} - X_{1\text{mín}}}{2}} \quad (1)$$

$$X_2 = \frac{X_2 - \frac{X_{2\text{máx}} + X_{2\text{mín}}}{2}}{\frac{X_{2\text{máx}} - X_{2\text{mín}}}{2}}$$

Matriz de diseño.

$$D = \begin{bmatrix} X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 & X_6 & X_7 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 \\ -1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 \\ -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Matriz de los niveles de trabajo.

Exp. #	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1	80	+1	130	-1	3	50	1
2	80	+1	115	+1	1	50	2.5
3	80	-1	130	-1	1	65	2.5
4	50	+1	115	-1	3	65	2.5
5	80	-1	115	+1	3	65	1
6	50	-1	130	+1	3	50	2.5
7	50	+1	130	+1	1	65	1
8	50	-1	115	-1	1	50	1

Matriz de los parámetros de trabajo o experimentos a realizar.

Exp. #	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
1	80	+1	130	-1	3	340	1
2	80	+1	115	+1	1	340	2.5
3	80	-1	130	-1	1	460	2.5
4	50	+1	115	-1	3	265	2.5
5	80	-1	115	+1	3	460	1
6	50	-1	130	+1	3	190	2.5
7	50	+1	130	+1	1	265	1
8	50	-1	115	-1	1	190	1

Los efectos de las variables independientes se calculan por la fórmula siguiente:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n X_{ji} \cdot Y_i}{N} \quad J = 0, 1, \dots, k \quad (3)$$

Las varianzas se calcula por:

$$V = \frac{\Sigma(\text{efectos imaginarios})^2}{\# \text{ de factores imaginarios.}} \quad (4)$$

El error standard se determina por:

$$SE = \sqrt{V} \quad (5)$$

El cálculo de los coeficientes del modelo se realizó de la siguiente forma:

Cada valor de los efectos de las variables independientes entre dos.

$$B = \frac{\text{valor de los efectos}}{2} \quad (6)$$

Para valorar la significación de los coeficiente se utilizó el estadígrafo de la "t" de Students

Si t calculada es mayor que la t tabulada los coeficientes son significativos para el porcentaje de confiabilidad asumido.

La significación de las variable independiente se tomaron para valores de t tabla (80%,3) y t tabla (90%,3) de confiabilidad.

CAPITULO IV: Resultados.

4.1 Resultados de los experimentos.



Resultados del experimento n.º 1

Fecha : 31/5/89

Condiciones de experimentación:

Teoría

X1 = +1 L/h 80  
X2 = +1 img  
X3 = +1 img  
X4 = -1 img  
X5 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = -1 % 50  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1

Práctica

X1 = +1 L/h 80  
X2 = +1 img  
X3 = +1 img  
X4 = -1 img  
X5 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = -1 % 50  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.2

TpBS	TpBH	TpCa	TpPe	EntpAH	HumMas	VEsp	ICMa	IH2M	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
91.4	77.0	1020	80.0	40.0	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	80.0	40.0	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	80.0	40.0	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	80.0	40.0	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	80.0	40.0	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	80.0	40.0	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	IO2	IN2	ICH4	ICO	ICO2	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
18.0	0.0	61.3	0.6	16.2	3.8	80
17.9	0.3	62.1	0.6	14.8	4.2	80
17.1	0.4	62.4	0.7	14.9	4.6	80
15.1	0.5	64.4	0.8	15.1	4.0	80
16.7	0.2	63.0	0.7	14.5	4.8	80
17.2	0.0	63.1	0.6	14.2	4.8	80

Resultados del experimento n° 2

Fecha : 20/6/89

Condiciones de experimentación:

Teoría

X1 = +1 L/h 80  
X2 = +1 img  
X3 = -1 img  
X4 = +1 img  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.5  
X6 = -1 % 50  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

Práctica

X1 = +1 L/h 80  
X2 = +1 img  
X3 = -1 img  
X4 = +1 img  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.5  
X6 = -1 % 50  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

TpBS	TpBH	TpCa	TpPe	EntpAH	HumMas	VIEsp	ICMa	IH2M	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
96.8	80.6	1020	84.0	43.5	0.0186	14.45	85.8	11.7	2.5
96.8	80.6	1020	84.0	43.5	0.0186	14.45	85.8	11.7	2.5
96.8	80.6	1020	84.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
96.8	80.6	1020	89.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
96.8	80.6	1020	89.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
96.8	80.6	1020	89.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	IO2	IN2	ICH4	ICO	ICO2	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
9.5	3.9	69.5	0.0	10.2	6.8	80
9.2	0.2	65.4	0.0	16.8	8.4	80
9.5	0.7	67.4	0.0	17.6	4.8	80
11.9	0.4	66.7	0.3	16.3	4.4	80
11.3	0.6	66.1	0.4	15.7	6.0	80
11.2	1.3	67.8	0.3	14.7	4.6	80

Resultados del experimento n.º 3

Fecha : 20/6/89

Condiciones de experimentación:

Teoria

X1 = +1 L/h 80  
X2 = -1 inq  
X3 = +1 inq  
X4 = -1 inq  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.5  
X6 = +1 % 65  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

Práctica

X1 = +1 L/h 80  
X2 = -1 inq  
X3 = +1 inq  
X4 = -1 inq  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.5  
X6 = +1 % 65  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

TpBS	TpBH	TpCa	TpPe	EntpAH	HumMas	VI Esp	ICMa	IH2M	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
92.3	78.8	1020	84.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
92.3	78.8	1020	84.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
92.3	78.8	1020	84.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
92.3	78.8	1020	86.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
92.3	78.8	1020	86.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5
92.3	78.8	1020	86.0	43.5	0.0185	14.45	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	IO2	IN2	ICH4	ICO	ICO2	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
6.6	0.5	75.8	0.0	10.1	6.9	80
11.7	0.3	68.4	0.0	13.4	6.2	80
11.6	0.6	67.7	0.0	13.2	6.8	80
11.6	0.6	69.2	0.0	13.3	5.4	80
13.3	0.0	67.5	0.0	14.0	5.2	80
13.3	0.0	68.9	0.0	12.8	4.8	80



Resultados del experimento N° 4

Fecha : 31/5/89

Condiciones de experimentación:

Teoría

X1 = -1 L/h 50  
X2 = +1 img  
X3 = -1 img  
X4 = -1 img  
X5 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = +1 % 65  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

Práctica

X1 = -1 L/h 50  
X2 = +1 img  
X3 = -1 img  
X4 = -1 img  
X5 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = +1 % 65  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

TpBS	TpBH	TpCa	TpPe	EntpAH	HumMas	VI Esp	ICHa	IHM	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
87.8	77.9	1100	80.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	80.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	103.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	96.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	96.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	104.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	104.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	92.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5
87.8	77.9	1100	92.0	41.0	0.0185	14.20	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	I02	IN2	ICH4	IC0	IC02	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
12.8	0.7	63.6	1.6	16.2	5.0	50
12.4	1.8	61.7	1.3	14.6	8.0	50
16.6	1.1	56.1	4.1	14.5	7.6	50
15.5	0.3	58.3	4.5	17.3	4.0	50
13.9	0.2	61.3	4.0	14.5	4.0	50
15.1	0.5	59.1	0.2	13.1	6.0	50
16.5	0.7	56.2	0.6	12.9	8.0	50
17.9	0.6	59.5	0.3	11.0	5.0	50
18.8	0.1	58.9	0.2	10.9	6.0	50



Resultados del experimento h i 5 z

Fecha : 26/5/89

Condiciones de experimentación:

Teoría

X1 = +1 L/h 80  
X2 = -1 inq  
X3 = -1 inq  
X4 = +1 inq  
X5 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = +1 % 65  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1

Práctica

X1 = +1 L/h 80  
X2 = -1 inq  
X3 = -1 inq  
X4 = +1 inq  
X5 = + Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = +1 % 65  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1

TpBS	TpRH	TpCa	TpPe	EntpAH	HumMas	VI Esp	ICMa	IH2M	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
95.0	77.0	1020	77.0	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	77.0	40.0	0.0160	14.35	45.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	81.9	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	85.0	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	85.0	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	83.0	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	83.0	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	83.5	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	83.5	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	90.0	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5
95.0	77.0	1020	90.0	40.0	0.0160	14.35	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	IO2	IN2	ICH4	ICO	ICO2	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
14.6	0.7	58.9	3.8	15.0	7.0	80
16.5	0.8	59.2	3.9	14.3	5.4	80
6.3	0.7	63.8	1.0	12.5	7.8	80
12.0	0.4	66.7	0.0	16.9	4.4	80
11.1	0.3	64.5	0.8	15.9	6.4	80
13.2	0.6	64.6	0.0	17.2	4.0	80
12.9	0.4	71.9	0.0	14.9	3.0	80
10.9	0.5	62.8	0.0	15.3	4.4	80
10.0	0.2	70.5	0.0	14.1	5.4	80
13.8	0.3	71.2	0.0	13.2	5.4	80
10.8	1.0	70.2	0.0	13.7	4.0	80

Resultados del experimento N° 6

Fecha : 2/6/89

Condiciones de experimentación:

Teoría

X1 = -1 L/h 50  
X2 = -1 img  
X3 = +1 img  
X4 = +1 img  
X5 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = -1 % 50  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

Práctica

X1 = -1 L/h 42  
X2 = -1 img  
X3 = +1 img  
X4 = +1 img  
X5 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 3  
X6 = -1 % 50  
X7 = +1 Kg/Cm<sup>2</sup> 2.2

TpBS	TpBH	TpCa	TpPe	EntpAH	HumMas	VEsp	ICMa	IH2M	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
98.6	78.8	1050	90.0	43.0	0.0170	14.45	85.8	11.7	2.5
98.6	58.8	1050	90.0	43.0	0.0170	14.45	85.8	11.7	2.5
98.6	78.8	1050	90.0	43.0	0.0170	14.45	85.8	11.7	2.5
98.6	78.8	1050	90.0	43.0	0.0170	14.45	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	ID2	IN2	ICH4	ICO	ICO2	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
12.0	0.7	70.6	0.7	15.8	4.0	50
12.9	0.6	63.2	0.2	15.6	6.0	50
11.2	0.6	69.8	0.8	14.9	6.4	50
12.9	0.5	63.4	0.2	15.7	5.6	50

Resultados del experimento n° 7

Fecha : 2/6/89

Condiciones de experimentación:

Teoría

X1 = -1 L/h 50  
X2 = +1 inq  
X3 = +1 inq  
X4 = +1 inq  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.5  
X6 = +1 % 65  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1

Práctica

X1 = -1 L/h 42  
X2 = +1 inq  
X3 = +1 inq  
X4 = +1 inq  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.6  
X6 = +1 % 65  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1

TpBS	TpBH	TpCa	TpPe	EntpAH	HumMas	VlEsp	ICMa	IH2M	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
93.2	77.0	1040	97.0	40.1	0.0165	14.29	85.8	11.7	2.5
93.2	77.0	1040	90.0	40.1	0.0165	14.29	85.8	11.7	2.5
93.2	77.0	1040	90.0	40.1	0.0165	14.29	85.8	11.7	2.5
93.2	77.0	1040	90.0	40.1	0.0165	14.29	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	IO2	IN2	ICH4	ICO	ICO2	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
12.0	1.7	64.3	0.8	14.0	7.2	50
8.2	0.1	71.9	0.0	12.8	7.0	50
8.2	0.3	72.8	0.0	10.8	8.0	50
8.0	0.4	71.8	0.0	12.0	7.0	50



Resultados del experimento R ; B ;

Fecha : 20/6/89

Condiciones de experimentación:

Teoría

X1 = -1 L/h 50  
X2 = -1 inq  
X3 = -1 inq  
X4 = -1 inq  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.5  
X6 = -1 % 50  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1

Práctica

X1 = -1 L/h 50  
X2 = -1 inq  
X3 = -1 inq  
X4 = -1 inq  
X5 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1.5  
X6 = -1 % 50  
X7 = -1 Kg/Cm<sup>2</sup> 1

TpBS	TpBH	TpCa	TpPe	EntpAH	HuMas	VI Esp	ICMa	IHM	ISM
°f	°f	°C	°C	BTU/LbAs	LbH2O/LbAs	CUFT/LbAs	%	%	%
91.4	77.0	1020	80.0	40.5	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	80.0	40.5	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	80.0	40.5	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	76.0	40.5	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	76.0	40.5	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5
91.4	77.0	1020	76.0	40.5	0.0170	14.25	85.8	11.7	2.5

« Composición de los gases »

IH2	IO2	IN2	ICH4	ICO	ICO2	FP
%	%	%	%	%	%	L/H
16.1	2.6	62.9	0.3	14.4	3.6	50
22.7	0.6	54.3	0.8	18.6	3.0	50
27.5	0.6	53.9	1.0	18.7	3.2	50
15.4	0.6	61.1	0.0	18.5	3.8	50
16.6	0.6	60.6	0.0	18.4	3.8	50
17.1	0.2	60.7	0.0	18.2	3.6	50



#### 4.2 Procesamiento de Datos.

Los cálculos del balance de masa fueron efectuado en la computadora NEC/ PC 9801F, elaborados en trabajos anteriores a partir de una metodología propuesta por la Nichols Eng. Corp.[6]

Los datos de humedad del aire fueron obtenidos por mediciones de la temperatura del bulbo húmedo y bulbo seco del aire secundario y buscando en carta psicrométrica (anexos). Las características restantes.

Los resultados de la tabla se obtienen en sistemas inglés. El programa permite trabajarlo en sistema internacional.

Los análisis de gases fueron realizados en el cromatógrafo LKM-80 de fabricación soviética en la cual se determinó:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ .

##### 4.2.1. Resultados del balance de masa.

Los resultados del balance de masa se muestran en las tablas siguientes.

TABLA 9 31/MAY/89

RESULTADO DEL EXPERIMENTO 1

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	VM3PCBH	MCHOLLIN	MGGASIF	EFICGAS
1	33.43	0.235	0.610	0.900	0.432	5.116	2.917	4.227	59.17
2	33.48	0.284	0.638	0.827	0.478	5.078	3.169	3.975	55.64
3	35.60	0.309	0.607	0.871	0.468	5.340	2.793	4.350	60.90
4	36.62	0.265	0.823	1.000	0.544	5.405	2.585	4.258	59.61
5	35.49	0.331	0.673	0.868	0.214	5.297	2.904	4.239	59.34
6	34.22	0.338	0.697	0.826	0.535	5.134	3.145	3.999	55.98

TABLA 10 20/JUN/89

RESULTADO DEL EXPERIMENTO 2

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	VM3PCBH	MCHOLLIN	MGGASIF	EFICGAS
1	71.31	0.667	0.845	1.074	0.753	9.370	0.572	6.571	91.99
2	51.58	0.250	1.525	1.826	0.701	7.154	1.273	5.870	82.17
3	51.81	0.193	1.408	1.853	0.619	7.227	1.179	5.964	93.50
4	46.17	0.270	1.015	1.370	0.584	6.567	1.662	5.481	76.73
5	50.77	0.338	0.927	1.389	0.584	7.119	0.999	6.144	86.01
6	48.45	0.313	1.086	1.313	0.647	6.775	1.870	5.274	73.82

TABLA 11 20/JUN/89

## RESULTADO DEL EXPERIMENTO 3

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	VM3PCBH	MCOLLIN	MGGASIF	EFICGAS
1	52.55	0.683	2.775	1.530	1.510	6.936	2.707	4.437	62.11
2	48.21	0.463	1.072	1.145	0.747	6.715	1.935	5.209	72.92
3	52.70	0.515	0.914	1.138	0.702	7.278	1.281	5.863	82.07
4	45.80	0.406	1.211	1.147	0.781	6.399	2.471	4.672	65.41
5	41.58	0.371	1.055	1.053	0.704	5.947	2.685	4.458	62.41
6	39.18	0.375	1.274	0.962	0.833	5.470	3.481	3.663	51.28

TABLA 12 31/MAY/89

## RESULTADO DEL EXPERIMENTO 4

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	VM3PCBH	MCOLLIN	MGGASIF	EFICGAS
1	42.85	0.296	0.717	1.266	0.482	6.198	1.428	5.715	80.00
2	54.60	0.438	0.416	1.177	0.428	7.654	0.091	7.234	101.27
3	34.24	0.448	0.173	0.873	0.301	5.213	1.478	5.666	79.32
4	29.48	0.214	0.524	1.116	0.360	4.597	2.316	4.827	67.57
5	29.60	0.276	0.950	1.043	0.606	4.474	3.186	3.958	55.40
6	41.40	0.458	0.726	0.868	0.602	5.974	2.517	4.627	64.77
7	46.82	0.620	0.279	0.782	0.429	6.764	0.949	6.190	86.72
8	32.15	0.455	0.834	0.615	0.689	4.798	4.118	3.026	42.30
9	32.44	0.550	0.710	0.580	0.651	4.864	3.890	3.263	45.68

TABLA 13 26/MAY/89

## RESULTADO DEL EXPERIMENTO 5

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	UM3PCBH	IMCHOLLIN	IMGGASIF	EFICGAS
1	35.66	0.400	0.370	1.027	0.385	5.313	1.570	5.568	77.90
2	31.10	0.376	0.402	0.867	0.391	4.751	2.463	4.681	65.52
3	64.71	0.624	1.739	1.984	0.998	8.477	0.110	7.253	101.53
4	47.26	0.243	0.973	1.408	0.546	6.713	1.521	5.622	78.71
5	47.41	0.321	0.990	1.432	0.596	6.669	1.308	5.830	81.69
6	46.96	0.221	0.759	1.303	0.455	6.739	1.413	5.730	80.22
7	37.82	0.201	1.327	1.150	0.724	5.451	3.437	3.706	51.89
8	46.90	0.288	1.264	1.404	0.694	6.557	2.087	5.056	70.78
9	48.63	0.383	1.437	1.410	0.820	6.697	2.056	5.086	71.19
10	41.14	0.409	0.969	0.957	0.690	5.867	2.859	4.280	59.98
11	43.79	0.292	1.489	1.269	0.820	6.100	3.000	4.143	58.00

TABLA 14 02/JUN/89

## RESULTADO DEL EXPERIMENTO 6

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	UM3PCBH	IMCHOLLIN	IMGGASIF	EFICGAS
1	43.01	0.253	1.052	1.317	0.598	6.140	2.167	4.977	69.67
2	48.84	0.346	0.727	1.209	0.519	6.926	1.163	5.980	83.72
3	51.20	0.409	0.831	1.330	0.590	7.136	0.802	6.341	88.77
4	48.08	0.338	0.755	1.217	0.526	6.830	1.265	5.878	82.29



TABLA 15 02/JUN/89

## RESULTADO DEL EXPERIMENTO 7

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	VM3PCBH	MCHOLLIN	MGGASIF	EFICGAS
1	59.72	0.500	0.422	1.167	0.464	8.235	0.473	7.616	106.62
2	56.52	0.547	1.664	1.561	0.983	7.563	1.273	5.870	82.17
3	57.07	0.741	1.670	1.317	1.142	7.556	1.578	5.566	77.91
4	55.99	0.583	1.780	1.500	1.062	7.459	1.617	5.526	77.36

TABLA 16 20/JUN/89

## RESULTADO DEL EXPERIMENTO 8

No	AE	KCO	KH2	COH2	KCOH2	VM3PCBH	MCHOLLIN	MGGASIF	EFICGAS
1	41.12	0.250	0.551	0.894	0.409	6.017	2.641	4.502	63.02
2	29.02	0.129	0.286	0.819	0.215	4.766	2.801	4.343	60.79
3	24.17	0.123	0.137	0.680	0.131	4.255	3.129	4.014	56.19
4	39.76	0.135	0.713	1.201	0.398	5.930	2.147	4.997	69.95
5	38.27	0.141	0.614	1.108	0.366	5.778	2.240	4.903	68.64
6	36.65	0.154	0.628	1.064	0.384	5.570	2.441	4.703	65.83

5.1 Valores promedios de los resultados del balance de masa para cada experimentos.

Tabla No.

Exp. #	KCO	KH <sub>2</sub>	COH <sub>2</sub>	KCOH <sub>2</sub>	Vm <sup>3</sup> PC	MCHol	MCGas	EFiga
1	0.293	0.674	0.882	0.495	5.228	2.885	4.174	58.44
2	0.338	1.134	1.470	0.648	7.368	1.259	5.884	82.37
3	0.468	1.383	1.163	0.879	6.457	2.426	4.717	66.03
4	0.417	0.592	0.924	0.505	5.615	2.218	4.945	60.41
5	0.341	1.065	1.292	0.647	6.303	1.984	5.178	72.49
6	0.336	0.841	1.269	0.558	6.758	1.349	5.794	81.11
7	0.592	1.384	1.386	0.912	7.703	1.235	4.240	86.01
8	0.155	0.488	0.961	0.317	5.386	2.566	4.577	64.07

5.2 Desarrollo estadístico.

DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

VARIABLE: KCO

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
KCO	0.293	0.338	0.468	0.417	0.341	0.336	0.592	0.155

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
-0.015	0.085	0.110	0.068	0.041	0.174	0.044

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 0.3675  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 0.0079  
 ERROR STANDARD 0.0892

ACUERDO A(1) 0.1686  
 ACUERDO A(2) 0.9529  
 ACUERDO A(3) 0.2262  
 ACUERDO A(4) 0.7669  
 ACUERDO A(5) 0.4644  
 ACUERDO A(6) 1.9500  
 ACUERDO A(7) 0.4991

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_a + \sum [ E(1) * X(1) + E(2) * X(2) + \dots + E(N-1) * X(N-1) ]$$

$$Y_p = 0.3675 + \sum [ -0.015 * X(1) + 0.085 * X(2) + 0.110 * X(3) + 0.068 * X(4) + 0.041 * X(5) + 0.174 * X(6) + 0.044 * X(7) ]$$

VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 Z, 3)

PARA UN (90 Z, 3)

X6

X8

MODELO MATEMATICO PARA LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS.

$$KCO = 0.3675 + 0.087 * X(6)$$

DESCODIFICANDO LA VARIABLE SIGNIFICATIVA OBTENEMOS

$$KCO = 0.3675 + 0.087 \left[ \frac{\alpha - 57.5}{7.5} \right]$$

$$KCO = -0.2995 + 0.0116 \alpha$$



DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

VARIABLE: KH2

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
KH2	0.674	1.134	1.333	0.592	1.065	0.842	1.384	0.488

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0.237	0.001	0.250	0.321	-0.304	0.321	0.084

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 0.9451  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 0.0554  
 ERROR STANDARD 0.2355

ACUERDO A(1) 1.0094  
 ACUERDO A(2) 0.0074  
 ACUERDO A(3) 1.0646  
 ACUERDO A(4) 1.3661  
 ACUERDO A(5) 1.2918  
 ACUERDO A(6) 1.3661  
 ACUERDO A(7) 0.3598

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_a + \sum [E(1) * X(1) + E(2) * X(2) + \dots + E(M-1) * X(M-1)]$$

$$Y_p = 0.9451 + \sum [0.237 * X(1) + 0.001 * X(2) + 0.250 * X(3) + 0.321 * X(4) + \\ - 0.304 * X(5) + 0.321 * X(6) + 0.084 * X(7)]$$

VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 %, 5)

X1  
X5  
X6

PARA UN (90 %, 3)

NS  
NS  
NS

MODELO MATEMATICO PARA LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS.

$$KH2 = 0.9451 + 0.1185 * X(1) - 0.152 * X5 + 0.1605 * X6$$

DESCODIFICANDO LA VARIABLE SIGNIFICATIVA OBTENEMOS

$$KH2 = 0.9451 + 0.1185 \left[ \frac{Fp - 65}{15} \right] - 0.152 \left[ \frac{Prp - 2.25}{0.75} \right] + 0.1605 \left[ \frac{\alpha - 57.5}{7.5} \right]$$

$$KH2 = 0.2722 + 0.079 Fp - 0.2026 Prp + 0.0214 \alpha$$

DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

VARIABLE: COH2

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
COH2	0.882	1.470	1.163	0.924	1.292	1.269	1.386	0.961

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0.066	0.285	0.013	0.371	-0.153	0.454	0.076

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 1.1683  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 0.0461  
 ERROR STANDARD 0.2197

ACUERDO A(1) 0.3107  
 ACUERDO A(2) 0.0267  
 ACUERDO A(3) 0.0616  
 ACUERDO A(4) 1.7307  
 ACUERDO A(5) 0.7134  
 ACUERDO A(6) 0.2129  
 ACUERDO A(7) 0.3549

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_a + \sum_{i=1}^{M-1} E(i)X(i) + \dots + E(M-1)X(M-1)$$

$$Y_p = 1.1683 + \sum_{i=1}^7 [ 0.066 * X(1) + 0.285 * X(2) + 0.030 * X(3) + 0.371 * X(4) + \\ -0.153 * X(5) + 0.454 * X(6) + 0.076 * X(7) ]$$



VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 %, 3)

NS

PARA UN (90 %, 3)

NS



DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

VARIABLE: KCOH2

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
KCOH2	0.495	0.648	0.879	0.505	0.647	0.558	0.912	0.317

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0.094	0.039	0.181	0.142	-0.137	0.231	0.054

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 0.6201  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 0.0182  
 ERROR STANDARD 0.1352

ACUERDO A(1) 0.6970  
 ACUERDO A(2) 0.2939  
 ACUERDO A(3) 1.3441  
 ACUERDO A(4) 1.0520  
 ACUERDO A(5) 1.0187  
 ACUERDO A(6) 1.7020  
 ACUERDO A(7) 0.4049

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_a + \sum [ E(1) * X(1) + E(2) * X(2) + \dots + E(M-1) * X(M-1) ]$$

$$Y_p = 0.6201 + \sum [ 0.094 * X(1) + 0.039 * X(2) + 0.181 * X(3) + 0.142 * X(4) + \\ -0.137 * X(5) + 0.231 * X(6) + 0.054 * X(7) ]$$

VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 %, 3)

X5  
X6

PARA UN (90 %, 3)

N5  
X6

MODELO MATEMATICO PARA LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS.

$$KCOH2 = 0.6201 - 0.0687 * X(5) + 0.115 * X6 \quad (\text{PARA UN 80 \%})$$

$$KCOH2 = 0.6201 + 0.115 * X6 \quad (\text{PARA UN 90 \%})$$

DESCODIFICANDO LA VARIABLE SIGNIFICATIVA OBTENEMOS

PARA EL 80 %

$$KCOH2 = 0.6201 - 0.0687 \left[ \frac{Prp - 2.25}{0.75} \right] + 0.115 \left[ \frac{\alpha - 57.5}{7.5} \right]$$

PARA EL 90 %

$$KCOH2 = 0.6201 + 0.115 \left[ \frac{\alpha - 57.5}{7.5} \right]$$

PARA EL 80 %

$$KCOH2 = -0.0607 - 0.0913 Prp + 0.0154 \alpha$$

PARA EL 90 %

$$KCOH2 = -0.0607 + 0.0154 \alpha$$

DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

3

VARIABLE: VM PCBH

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
VM3 PCBH	5.283	7.368	6.457	5.615	6.303	6.758	7.703	5.386

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
-0.026	0.252	0.368	1.361	-0.752	0.334	0.394

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 6.3522  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 0.6844  
 ERROR STANDARD 0.6272

ACUERDO A(1) 0.0320  
 ACUERDO A(2) 0.3052  
 ACUERDO A(3) 0.4454  
 ACUERDO A(4) 1.6457  
 ACUERDO A(5) 0.9095  
 ACUERDO A(6) 0.4043  
 ACUERDO A(7) 0.4768

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_a + \sum [ E(1) * X(1) + E(2) * X(2) + \dots + E(M-1) * X(M-1) ]$$

$$Y_p = 6.3522 + \sum [ -0.026 * X(1) + 0.252 * X(2) + 0.368 * X(3) + 1.361 * X(4) + -0.752 * X(5) + 0.334 * X(6) + 0.394 * X(7) ]$$



VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 %, 3)

NS

PARA UN (90 %, 3)

NS



DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

VARIABLE: MC Hollin

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
MC Hollin	2.885	1.259	2.426	2.218	1.984	1.349	1.235	2.566

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0.296	-0.182	-0.033	-1.067	0.237	-0.048	-0.354

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 1.9902  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 0.3909  
 ERROR STANDARD 0.6252

ACUERDO A(1) 0.4742  
 ACUERDO A(2) 0.2910  
 ACUERDO A(3) 0.0527  
 ACUERDO A(4) 1.7055  
 ACUERDO A(5) 0.3798  
 ACUERDO A(6) 0.0783  
 ACUERDO A(7) 0.5670

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_e + \sum E E(1) * X(1) + E(2) * X(2) + \dots + E(N-1) * X(N-1)$$

$$Y_p = 1.9902 + \sum [ 0.296 * X(1) - 0.182 * X(2) - 0.033 * X(3) - 1.067 * X(4) + 0.237 * X(5) - 0.048 * X(6) - 0.354 * X(7) ]$$

VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 %,3)

NS

PARA UN (90 %,3)

NS

DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

VARIABLE: MC Gasif.

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
MC Gasif	4.174	5.884	4.717	4.945	5.178	5.794	4.240	4.577

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
0.099	-0.252	-0.414	0.670	0.168	-0.337	-0.792

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 4.9386  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 0.2291  
 ERROR STANDARD 0.4786

ACUERDO A(1) 0.2073  
 ACUERDO A(2) 0.5343  
 ACUERDO A(3) 0.8664  
 ACUERDO A(4) 1.4013  
 ACUERDO A(5) 0.3513  
 ACUERDO A(6) 0.7045  
 ACUERDO A(7) 1.6567

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_a + \sum [ E(1) * X(1) + E(2) * X(2) + \dots + E(M-1) * X(M-1) ]$$

$$Y_p = 4.9386 + \sum [ 0.099 * X(1) - 0.252 * X(2) - 0.414 * X(3) + 0.670 * X(4) + 0.168 * X(5) - 0.337 * X(6) - 0.792 * X(7) ]$$



VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 %,3)

X7

PARA UN (90 %,3)

X7

MODELO MATEMATICO PARA LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS.

$$MC \text{ Gasif} = 4.9386 - 0.3963 * X(7) \quad (\text{PARA UN } 80 \% \text{ y } 90 \%)$$

DESCODIFICANDO LA VARIABLE SIGNIFICATIVA OBTENEMOS

$$MC \text{ Gasif} = 4.9386 - 0.3963 \left[ \frac{Pap - 1.6}{0.5} \right]$$

$$MC \text{ Gasif} = 5.9955 - 0.6605 Pap$$



DESARROLLO ESTADISTICO Y CALCULO DE LOS COEFICIENTES  
PARA EL DISEÑO PLAKETT-BURMAN.

VARIABLE: Efic. Gas.

FUNCION RESPUESTA.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Efic Gas	58.44	82.37	66.03	60.41	72.49	81.11	86.01	64.07

EFFECTOS DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
-3.068	0.882	3.061	18.25	6.505	-0.257	2.227

PROMEDIO DE LAS RESPUESTAS 71.3691  
 VARIANZA EFECTOS IMAGINARIOS 114.5057  
 ERROR STANDARD 10.7007

ACUERDO A(1) 0.2867  
 ACUERDO A(2) 0.0824  
 ACUERDO A(3) 0.2861  
 ACUERDO A(4) 1.7062  
 ACUERDO A(5) 0.6079  
 ACUERDO A(6) 0.0240  
 ACUERDO A(7) 0.2081

MODELO MATEMATICO

$$Y_p = Y_a + \sum [ E(1) * X(1) + E(2) * X(2) + \dots + E(M-1) * X(M-1) ]$$

$$Y_p = 71.3691 + \sum [ -3.068 * X(1) + 0.882 * X(2) + 3.061 * X(3) + 18.25 * X(4) + 6.505 * X(5) - 0.257 * X(6) + 2.227 * X(7) ]$$

VARIABLES SIGNIFICATIVAS

PARA UN (80 %, 3)

NS

PARA UN (90 %, 3)

NS

### 5.3.- Análisis de los modelos obtenidos.

#### 1.- Análisis de la constante de equilibrio del monóxido de carbono ( $K_{CO}$ ).

En el modelo se aprecia que sólo es significativa la aereación para un 80 % de confiabilidad, lo que indica que la constante de equilibrio  $K_{CO}$  depende de la aereación, un aumento de la aereación provocaría un aumento de la  $K_{CO}$ . Por tanto se sugiere trabajar con la aereación lo más baja posible para que la  $K_{CO}$  disminuya y de esta forma aumente la capacidad reductora de los gases.

#### 2.- Análisis de la constante de equilibrio del Hidrógeno ( $K_{H_2}$ ).

En el modelo se aprecia que las variables que son significativas es el flujo de petróleo, la presión en el regulador de petróleo y la aereación. Esto nos demuestra que para obtener una  $K_{H_2}$  lo más pequeña posible es necesario disminuir el flujo de petróleo, mantener una alta presión en el regulador y disminuir la aereación y de esta forma aumentaría la capacidad reductora de los gases.

#### 3.- Análisis de la relación Monóxido de Carbono e hidrógeno ( $CO/H_2$ ).

Como se puede apreciar en el modelo ninguna de las variables son significativas para el 80 % y 90 % de confiabilidad. Esto puede estar dado por no tener en cuenta las interacción entre las variables o que la influencia de los efectos imaginarios tienden a ser grandes o que no se controlaron variables que tienen gran influencia en el proceso.

Para poder maximizar la relación  $CO/H_2$  es necesario trabajar con alto flujo de petróleo, baja presión en el



regulador de petróleo, alta aereación y alta presión de aire primario.

4.- Análisis de la fuerza impulsora de los gases  $KCOH_2$ .

Como se observa en el modelo la relación  $KCOH_2$  depende solamente de la presión del regulador de petróleo y de la aereación. Esto nos indica que para obtener una relación mínima se debe trabajar con alta presión en el regulador de petróleo y una baja aereación.

5.- Análisis del volumen producto de la combustión base húmeda, ( $Vm^3PCBH$ ).

Como se aprecia en el modelo ninguna de las variables son significativa para el 80 % y 90 % de confiabilidad esto puede estar dado por no tener en cuenta las interacciones entre las variables, o que la influencias de los efectos imaginarios tienden a ser grandes o que no se tuvo en cuenta o que no se controlaron variables que tienen gran influencia en el proceso.

Para poder maximizar el  $Vm^3PCBH$ , pudiese ser necesario como se observa en el modelo, disminuir el flujo de petróleo, disminuir la presión en el regulador de petróleo, aumentar la aereación y la presión de aire primario.

6.- Análisis de los moles de Carbono en forma de hollín, ( $MCHollín$ ).

En el modelo se aprecia que ninguna de las variables son significativas para el 80 % y el 90 % de confiabilidad. Esto quizás esté provocado por no tenerse en cuenta la interacciones entre las variables o por la influencia de otras variables que no se controlaron y que tienen efectos importantes en el proceso.

Para que MCHollín disminuya es necesario como se observa en el modelo trabajar con bajo flujo de petróleo, baja presión en el regulador de petróleo, elevada aereación y una alta presión de aire primario.

7.- Análisis de los moles de carbono gasificados, (MCGasif).

En el modelo se aprecia que los MCGasif depende de la presión de aire primario por lo que para obtener una mayor gasificación es necesario disminuir la presión de aire primario.

8.- Análisis de la eficiencias de la gasificación (EficGasif).

En el modelo se observa que ninguna de las variables son significativas para el 80 % y 90 % de confiabilidad. Esto pudiera estar provocado por los efectos de las variables imaginarias que son altos y tienen una influencia importante en el proceso, no fueron controladas variables que pudieran estar influyendo en el proceso.

Al observar el modelo la eficiencia de la gasificación aumenta cuando se trabaja con un mínimo flujo de petróleo, un máximo en la presión del regulador de petróleo, un mínimo en la aereación y una elevada presión de aire primario.

9.- Durante la prueba no se pudo lograr  $2,5 \text{ Kg/cm}^2$  de presión de aire primario, sólo en una ocasión, por lo que se pudo lograr  $2,2 \text{ Kg/cm}^2$  y se trabajó con esta presión.

10.- Durante el desarrollo de la prueba intentó controlarse la temperatura del petróleo hasta los valores deseados, las excesivas variaciones ocurridas diariamente y la imposibilidad de alcanzar altos valores

o regularla hicieron obligatorio considerar esta variable como imaginaria a lo largo de los experimentos.

11.- El valor asignado para el mínimo de la presión del regulador  $1 \text{ Kgf/cm}^2$  no pudo ser alcanzado, pues excesivas variaciones y alteraciones ocurridas se decidió tomar entonces como mínimo  $1,5 \text{ Kgf/cm}^2$  en el diseño experimental.



CAPITULO VI : Conclusiones.

1.- La cámara de combustión durante la prueba no presentó anomalías por lo que es capaz de soportar los regímenes de operación establecidos.

2.- El quemador TCHE II garantiza las condiciones de operación establecidas por lo que resuelve el problema de la combustión, aunque debe buscarse una proporcionalidad aire - petróleo mediante un sistema de regulación adecuado.

3.- La constante de equilibrio ( $K_{CO}$ ) disminuye cuando disminuye la aereación.

4.- La constante de equilibrio del hidrógeno ( $K_{H_2}$ ) disminuye cuando se trabaja con bajo flujo de petróleo, alta presión en el regulador de petróleo y baja aereación.

5.- La relación monóxido de carbono e hidrógeno ( $CO/H_2$ ) aumenta cuando se trabaja con alto flujo de petróleo, baja presión en el regulador de petróleo, alta aereación y alta presión de aire primario.

6.- La fuerza impulsora de los gases ( $K_{COH_2}$ ) disminuye cuando la presión del regulador de petróleo y la aereación disminuye.

7.- El volumen producto de la combustión base húmeda ( $V_m^3 FCBH$ ) aumenta con la aereación y la presión de aire primario y disminuye con el aumento del flujo de petróleo y la presión en el regulador de petróleo.

8.- Los moles de carbono en forma de hollín disminuyen con el aumento de la aereación y la presión de aire primario y la disminución del flujo de petróleo y la presión del regulador de petróleo.

9.- Los moles de carbono gasificados ( $MC_{Gasif}$ ) aumenta cuando disminuye la presión de aire primario.

10.- La eficiencia de la gasificación (EficGasif) aumenta con la disminución de la aereación y el aumento de la presión de aire primario al disminuir el flujo de petróleo y elevada presión del regulador de petróleo.

11.- La temperatura del petróleo no se controla sistemáticamente en el calentador a la entrada de la planta.

12.- Durante la prueba la temperatura del petróleo a la entrada del quemador no superó los  $100^{\circ}\text{C}$  y después de insulada la tubería no sobrepaso los  $104^{\circ}\text{C}$ , mientras que la temperatura en el calentador se mantenía a  $160^{\circ}\text{C}$  la debe ser suficiente para mantener  $110 - 120^{\circ}\text{C}$  a la entrada del quemador. El petróleo analizado exigía temperatura de  $107 - 114^{\circ}\text{C}$  para  $2.5^{\circ}\text{E}$  que no fué alcanzado.

13.- La viscosidad del petróleo parece tener gran importancia. Se requiere buscar una relación temperatura y viscosidad del petróleo adecuada para lograr una buena atomización y evitar el ensuciamiento de la piedra logrando una combustión eficiente. La viscosidad no pudo ser controlada durante la prueba y debe log arse un control sistemático.

14.- El consumo de petróleo durante el estudio de la combustión estuvo por debajo de  $100 \text{ l/h}$  más del 75% del tiempo estudiado aproximadamente  $94.52 \text{ Kg/h}$ . En algunas ocasiones alcanzó los  $300 \text{ l/h}$ .

15.- Se puede aplicar los diseños estadísticos de experimentos al estudio de las características de los gases producto de la combustión incompleta del petróleo (Mazut).

16.- La presión del ventilador varió considerablemente durante las pruebas.

CAPITULO: VII Recomendaciones.

1.- Deberá lograrse un control sistemático de la operación de la cámara y quemadores por parte de los operadores, lo que evitaría baja eficiencia de la operación y derrame de petróleo, formación de escorias y tupiciones del quemador.

2.- Se debe colocar un termopar en la cámara para medir la temperatura de los gases y refractarios en futuros trabajos.

3.- Se debe trabajar con altas presiones en el regulador de petróleo ( $2.5 - 3 \text{ Kgf/cm}^2$ ).

4.- Debe realizarse una inspección de la línea de alimentación de petróleo a la planta y al quemador para precisar las causas de las pérdidas de temperaturas que se producen. Como solución primera recomendamos insular la tubería de alimentación de petróleo.

5.- Revisar la instalación de aire primario (compresor, tubería) para precisar cual es la causa que conlleva a no mantener la presión de aire primario en  $2.5 \text{ Kgf/cm}^2$ .

6.- Debe utilizarse un instrumento de medición más preciso para determinar la temperatura del bulbo seco y bulbo húmedo.

7.- Debe tomarse muestra de petróleo a la entrada del quemador al menos dos por semanas para determinar sus características físicos-químicas y precisar la temperatura a la cual deberá lograrse una viscosidad adecuada para la operación.

8.- Debe controlarse sistemáticamente por turnos los filtros de petróleo, de esta forma lograríamos un mejor funcionamiento de los reguladores.

9.- Debe mantenerse una limpieza sistemática de las superficies del plato, ya que derrames de petróleo



provocarían llamas fuera de la cámara.

10.- Debe controlarse la presión del ventilador de aire secundario sistemáticamente.

11.- Debe controlarse la temperatura de petróleo en el calentador a la entrada de la planta de forma sistemática.

12.- Las investigaciones que se realicen deben ser ejecutadas primeramente a escala semiindustrial, porque a escala industrial ocurren muchas variaciones en el proceso de producción y harían mucho más costosas las investigaciones.

13.- Seguir aplicando los diseños estadísticos de experimentos en las investigaciones que se hagan posteriormente ya que reducen el costo de las investigaciones, el tiempo de realización y se puede llegar a una conclusión más precisa sobre el sistema que se estudia.

CAPITULO: VIII: Símbolos.

- C → Carbono.
- H → Hidrógeno.
- S → Azufre.
- CO<sub>2</sub> → Dióxido de Carbono.
- CO → Monóxido de Carbono.
- O<sub>2</sub> → Oxígeno.
- CH<sub>4</sub> → Metano.
- N<sub>2</sub> → Nitrógeno.
- $\alpha$  → Aereación, relación aire suministrado por el petróleo.
- F<sub>p</sub> → Flujo de petróleo.
- PRP → Presión en el regulador de petróleo.
- PAF → Presión de aire primario.
- i → Variables imaginarias.
- TPBS → Temperatura del bulbo seco.
- TPBH → Temperatura del bulbo húmedo.
- TPCA → Temperatura de la cámara.
- ENTPAH → Entalpía específica.
- HUMMAS → Humedad másica.
- VLESP → Volumen específico.
- ICM → Carbono en el mazut.
- IH<sub>2</sub>M → Hidrógeno en el mazut.
- ISM → Azufre en el mazut.
- EXP → Experimento.
- VP → Viscosidad del petróleo.
- Ttrabajo → Temperatura de trabajo necesaria para alcanzar 2°E.
- TEP → Temperatura del petróleo a la entrada de la planta.
- Tq → Temperatura del petróleo a la entrada del quemador.

TP → Temperatura de la pared de la cámara.

Nº70



CAPITULO: IX. Bibliografía.

- [1] Programa del PCC. Editora Política. La Habana 1987.
- [2] Chang Cardona A.R. Hornos metalúrgicos. Editorial EP MINED. La Habana. 1986.
- [3] Vaniukov A. V. Teoría de los procesos pirometalúrgicos. Editorial Vneshtorgizdat. URSS, 1981.
- [4] Moreno Daudinot, A. M. Evaluación económica de la combustión incompleta en hornos de reducción. Trabajo de Diploma. Moa, 1987.
- [5] Varios autores. Teoría de conservación de energía. Tomo I. España. 1984.
- [6] Ernest Lado. Incomplete combustion of Heavy fuel for reduction of lateritic ore. New York, 1955.
- [7] Guerra Hernández S.V. Análisis de la combustión incompleta en los hornos de solera múltiples para la reducción. Trabajo de Diploma. Moa 1988
- [8] Informe técnico sobre el funcionamiento de los quemadores. Sección Investigaciones metalúrgicas. Fábrica Ernesto Guevara. Punta Gorda.
- [9] Alvarez Alonso, A. El diseño experimental en las investigaciones químicas. Ciudad de la Habana, 1988.
- [10] Revista: La Minería en Cuba. EPG Aplicación de los diseños factoriales de experimentos en las investigaciones página 54 #3 1976.
- [11] Pérez .J.M. Características del petróleo utilizado en la Fábrica Ernesto Guevara en los 6 meses primero de 1989. Trabajo de Diploma. Técnico Medio. Moa, 1989.
- [12] Manual de Operaciones Planta Hornos de Reducción. Empresa " Ernesto Che Guevara ".

Nº72

CAPITULO X: Anexos.

# Temperaturas y Viscosidad del Mazut.

Tabla No. \_\_\_\_\_

fecha	V.P. $\times 10^{-4}$ m/s		t. trabajo $^{\circ}$ C		T.E.P. $^{\circ}$ C	T.q. $^{\circ}$ C
	50 $^{\circ}$ C	80 $^{\circ}$ C	2 $^{\circ}$ E	2.5 $^{\circ}$ E		
14.1.89	114.64	29.86	113	100	-	-
24.1.89	160.34	-	-	-	-	-
30.1.89	144.80	39.73	103	93	-	-
5.2.89	126.48	36.02	93	84	-	-
22.2.89	150.31	42.71	42.7	110	-	-
6.3.89	138.05	31.71	97	88	-	-
16.3.89	152	40.31	95	86	161	-
28.3.89	107.76	31.01	116	102	142.5	-
5.4.89	119.76	34.44	115	102	133	-
23.4.89	121.27	32.42	112	100	164	-
25.5.89	111.07	37.90	122	108	156	-
26.5.89	128.96	33.77	112	100	164	83.3
27.5.89	169.79	43.50	125	110	-	-
1.6.89	165.7	40.96	120	108	-	-
2.6.89	169.7	17.4	92	84	167	90
3.6.89	187.8	82.9	-	-	-	-
5.6.89	180.5	53	135	120	-	-
7.6.89	167.8	43	96	89	-	-
8.6.89	164.9	45.24	121	108	-	-
9.6.89	158.95	37.6	112	101	-	-

Trabajo  
de  
Diploma

INSTITUTO SUPERIOR MINERO - METALURGICO  
FACULTAD METALURGIA ELECTROMECANICA

HOJA  
NO. \_\_\_\_\_



Cont. \_\_\_\_\_ Tabla No. \_\_\_\_\_.

12.6.89	167.7	38.5	122	109	-	-
14.6.89	115.9	34.03	114	101	-	-
15.6.89	131.86	34.71	111	99	-	-
16.6.89	148.39	42.75	130	112	-	-
17.6.89	106.39	36.5	115	101	-	-
19.6.89	151.5	34.1	109	98	-	-
20.6.89	131.5	34.1	112	100	138	86.5
21.6.89	126.2	32.4	112	98	-	-

Temperaturas y Radiaciones de  
la cámara

Tabla No. \_\_\_\_\_

fecha	exp.	puntos	T.P. °C	Radiac. W/m <sup>2</sup>
2.6.89	6	1	254	1725
		2	240	1972
		3	-	-
		4	248	1329
		5	203	1782
		6	176	1734
		7	-	-
		8	142	1254
		9	162	1342
		10	185	1931
		11	186	1658
2.6.89	7	1	253	1900
		2	218	1981
		3	236	-
		4	236	1979
		5	189	1685
		6	153	1190
		7	130	1021
		8	142	1264
		9	164	1431
		10	287	1900
		11	196	1708



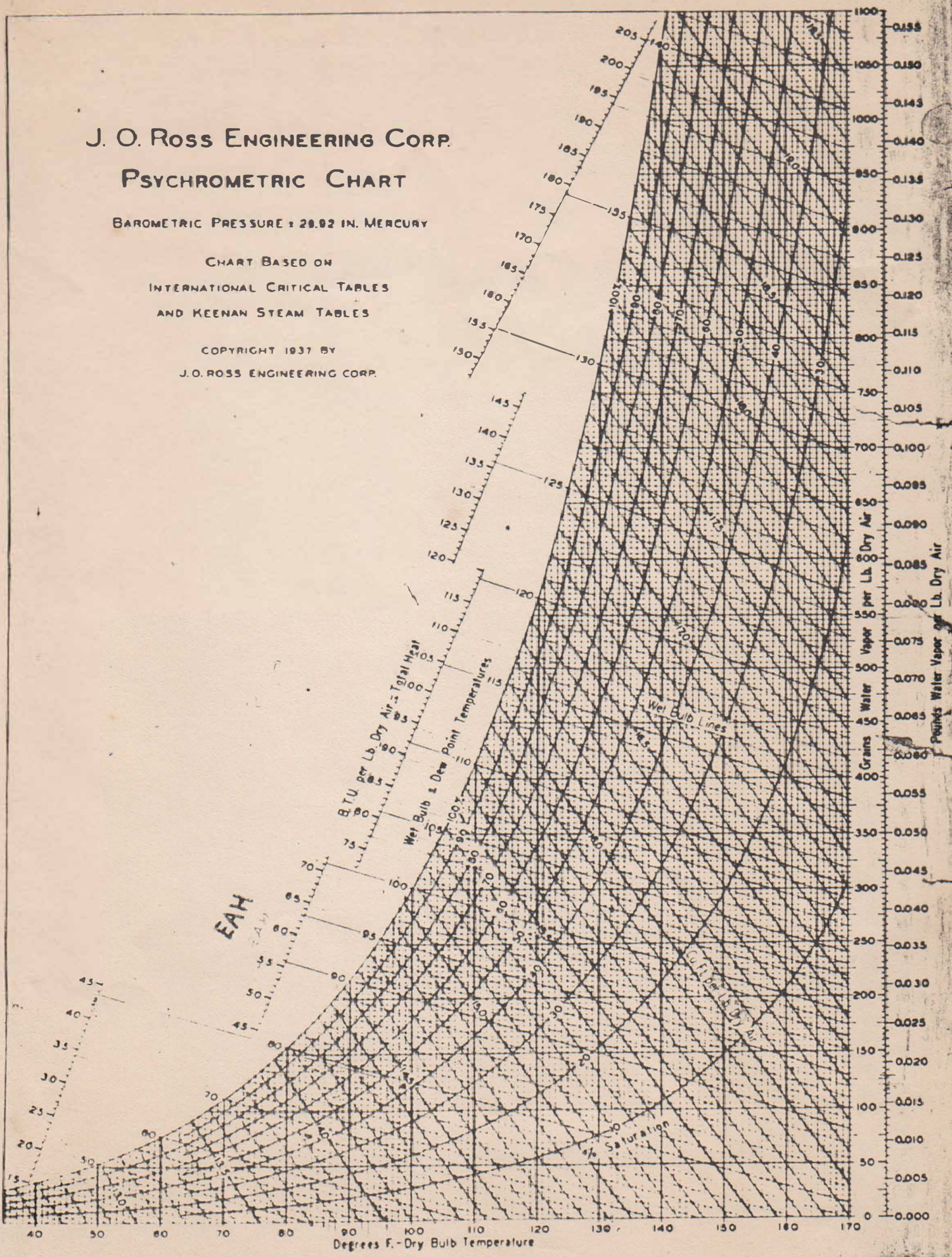
# J. O. ROSS ENGINEERING CORP.

## PSYCHROMETRIC CHART

BAROMETRIC PRESSURE : 29.92 IN. MERCURY

CHART BASED ON  
INTERNATIONAL CRITICAL TABLES  
AND KEENAN STEAM TABLES

COPYRIGHT 1937 BY  
J. O. ROSS ENGINEERING CORP.



EAH

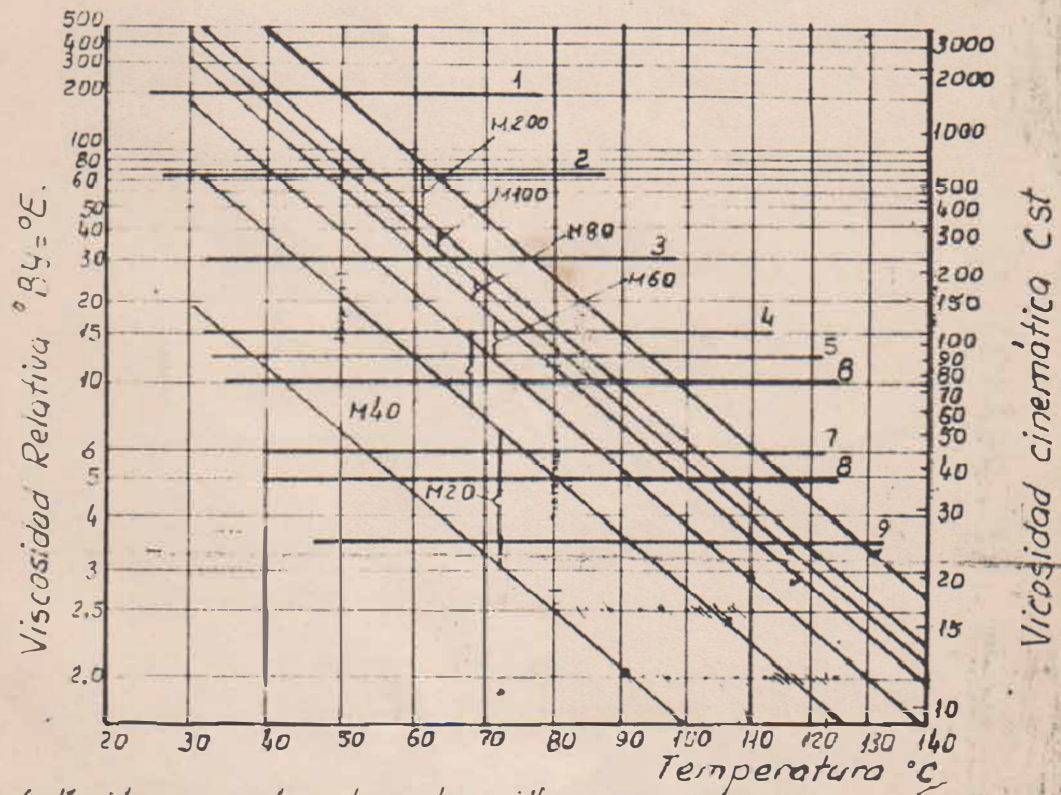


VISCOSIDAD RELATIVA °By = °E.

Se obtiene comparando el tiempo de paso por el orificio del viscosímetro de 200 cm<sup>3</sup> de combustible a 50°C con el tiempo de paso por el mismo orificio de 200 cm<sup>3</sup> de agua destilada a una temperatura de 20°C.

En combustibles de gran viscosidad, hay que determinar la viscosidad a 80°C.

Ejemplo: Si el combustible demora 40 veces más que el agua en pasar. Su viscosidad será de: 40 °By 50



- 1. Viscosidad límite para bombas tornillo y de engrane
- 2. Viscosidad límite para bombas de pistón y chupón
- 3. Viscosidad límite para bombas centrífugas
- 4. Viscosidad límite para quemadores con vapor
- 5. Viscosidad límite para quemadores con ventilador de aire
- 6. Viscosidad límite para quemadores con compresor de aire.
- 7. Viscosidad límite para quemadores mecánicos y recomendables para quemadores [con vapor]
- 8. Recomendada para quemadores con un compresor de aire.
- 9. Recomendada para quemadores mecánicos.

				GRAFICO VISCOSIDAD PETROLEO VS. TEMPERATURA.		E.G. M. GOMEZ MARIEL.			
						ETAPAS DE ELABORACION.			
MOD.	CANT.	Nº NOTIE.	FIRMA	FECHA	MASA.	ESC.	HOJA No	CANT. HOJA	
Dibujo			<i>[Signature]</i>	10-4-84.					
Proy.									
Revisó		A.L. Alonso	<i>[Signature]</i>	7/5/84					
Cont. Tec.		M. Justo	<i>[Signature]</i>	11/4/84					
Cont. Adm.									
Aprobó		R. Llobera	<i>[Signature]</i>	9/1/84					
					ST.P 20-0049.				