

213



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

PROGRAMA PARA EL CALCULO  
DE EFICIENCIA TERMICA  
PARA HORNOS

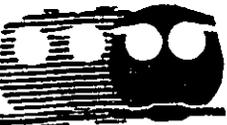
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERA QUIMICA

P R E S E N T A:

Mayra Adriana Tamayo Cantón



MEXICO, D. F.

2001



289011



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

Jurado asignado:

Presidente            Prof. Mayo Gines Martínez Kahn  
Vocal                Prof. Reynaldo Sandoval Gonzáles  
Secretario           Prof. José Fernando Barragán Aroche  
1er. Suplente        Prof. José Antonio Ortiz Ramírez  
2o. Suplente         Prof. Sergio Trejo Martínez

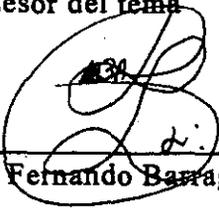
Universidad Nacional Autónoma de México  
Facultad de Química  
Conjunto E edificio de Ingeniería Química  
Departamento de Termodinámica Aplicada

**TRABAJO PARA SER REVISADO**

**POR EL H. JURADO**

**25 FNE. 2001**

Asesor del tema



M.C. Fernando Barragán

Supervisor Técnico



Dr. Enrique Bazua

Sustentante



Mayra A. Tamayo Cantón

A la vida por haberme enseñado  
a soñar y darme siempre la  
oportunidad de cumplir mis  
sueños.

A mi familia por su total e incondicional apoyo  
en todos los pasos decisivos de mi vida.  
A Robert por ser una fuente constante de  
motivación y apoyo.  
Al 11 mm por haber llegado a mi vida.  
A mis amigos.

Al MC Fernando Barragán Aroche por su  
orientación.  
Al Ing. José Antonio Ortiz Ramírez por  
proporcionarme los datos para la validación  
del programa.  
Al Ing. Celestino Montiel por  
proporcionarme los programas.  
A papá por su valiosa guía.

# Índice

<b>Resumen</b>	1
<b>Introducción</b>	2
<b>Objetivos</b>	3
<b>1. Hornos y Eficiencia</b>	
1.1 Hornos	4
1.2 Combustibles	10
1.3 Factores que afectan la eficiencia del horno	17
<b>2. Cálculos</b>	
2.1 Introducción	24
2.2 Balance de materia	24
2.3 Balance de calor	33
2.4 Temperatura de flama adiabática	36
2.5 Eficiencia	38
2.6 Temperatura de rocío del SO <sub>3</sub>	39
2.7 Precalentamiento de aire	41
2.8 Humedad	44
2.9 Atomización	45
<b>3. Estructura del programa</b>	
3.1 Introducción	46
3.2 Manejo de combustibles	47
3.3 Datos	48
3.3.1 Combustibles	48
3.3.2 Aire	55

#### **4 Validación del programa**

4.1	Introducción	57
4.2	Datos	57
4.3	Resultados del programa	61
4.4	Conclusiones	67

***Anexo I "Diagramas de flujo"***

***Anexo II "Manual del usuario"***

***Referencias***

***Bibliografía***

# Programa para el cálculo de eficiencia térmica para hornos

Mayra Adriana Tamayo Cantón

**Resumen:** Dentro de la industria química existe una gran cantidad de procesos en los que se emplean hornos como en los casos de servicios de vaporización, calentamiento y tratamiento. En la refinación de petróleo son utilizados también como parte principal del proceso de tal modo se encuentran en el proceso de la descomposición térmica, la destilación atmosférica y de vacío del crudo y en el proceso de gas a alta temperatura. Debido al amplio uso de los hornos dentro de la industria química se propone un programa como soporte para el diseño y la óptima operación de hornos industriales. Con este programa es posible el cálculo de la eficiencia del horno a partir de distintos datos, ya sean datos que definan la composición de los combustibles o que definan la composición de los gases de chimenea. En el caso de que sea definida la composición del combustible es posible alimentar datos para combustibles líquidos o gaseosos. La parte de los combustibles gaseosos cuenta con una base de datos donde se encuentra n datos fisicoquímicos de los componentes más comunes en estos. Para los combustibles líquidos la composición se define a partir la relación másica carbón / hidrógeno y el porcentaje en peso de azufre lo que hace posible el cálculo de la eficiencia sin tener la composición específica del combustible, que en el caso de los combustibles líquidos resulta complicada de obtener. Además del cálculo de la eficiencia del horno, el programa realiza el cálculo de la temperatura de rocío del  $\text{SO}_3$  lo cual resulta de gran utilidad para evitar corrosión en la chimenea o en su caso, en el precalentador de aire. Otro cálculo útil es el de la temperatura de flama adiabática el cual puede ser utilizado durante el diseño del horno. De igual manera es posible calcular la cantidad requerida de un determinado combustible a partir de la cantidad de calor requerida para la corriente de proceso. La validación del programa se hizo comparando datos de diseño para la planta de Cadereita de Pemex Refinería.

**Palabras clave:** Eficiencia térmica, Hornos, Simulación, Combustión, Temperatura de flama adiabática, Temperatura de rocío  $\text{SO}_3$ .

## Introducción

Los hornos son ampliamente utilizados dentro de la industria. A excepción de la industria petroquímica básica y metalúrgica, los hornos son por lo general equipos auxiliares de proceso lo que implica que sea un equipo altamente utilizado dentro de la industria química en general. La operación eficiente de los hornos puede ser un beneficio económico y ambiental.

En este trabajo se desarrollo un programa donde se lleva acabo el cálculo de la eficiencia de hornos industriales alimentados con combustible líquidos o gaseosos.

A continuación, se plantean los objetivos del presente trabajo.

En el primer capítulo, se pretende dar las bases teóricas de los cálculos realizados dentro del programa, describiendo consideraciones importantes para la selección de los hornos, partes del horno que intervienen para obtener una buena eficiencia como el aislamiento térmico, superficies dentro del horno entre otros. Se da una descripción de los combustibles más comúnmente utilizados dentro de hornos industriales y algunas propiedades de estos. De igual manera se describen factores que afectan la eficiencia del horno como el tiempo de combustión, la provisión de aire, aire en exceso, turbulencia, temperatura, pérdidas de calor y calentamiento del horno. Por último se dan algunas reglas prácticas para evitar pérdidas de calor en el horno.

El segundo capítulo expone los cálculos utilizados dentro del programa, dando una descripción específica de los balances de materia de las distintas subrutinas dentro del programa. Se presentan las ecuaciones utilizadas para el balance de calor con y sin precalentador de aire, incluyendo pérdidas por vapor o aire de aspersion. De igual forma se exponen los cálculos para la temperatura de rocío del  $\text{SO}_3$ .

En el tercer capítulos se describen la estructura del programa, la unión de Fortran con Visual Basic y las distintas subrutinas que conforman el programa. Se presenta la estructura de la introducción de datos y las unidades de estos.

En el cuarto capítulo se pueden encontrar los resultados del programa al alimentar los datos de validación. Se hace una comparación de los resultados obtenidos con programa usando las distintas subrutinas de este con los datos de validación. Finalmente en este capítulo se presentan las conclusiones incluyendo recomendaciones de mejora para el programa.

## Objetivos

El presente trabajo se dirige a proponer un programa para la realización de cálculos de eficiencia térmica en hornos industriales. Por lo anterior, se presentan como objetivos específicos:

- Elaborar un programa para el cálculo de la eficiencia en un horno continuo a partir de la temperatura adiabática.
- Realizar el cálculo de temperatura de rocío en presencia de  $\text{SO}_3$  para evitar corrosión del equipo.
- Aportar una herramienta de cálculo que sea fácil de usar y brinde apoyo para el ahorro de energía y la disminución de la contaminación.
- Proporcionar un programa flexible que permita la obtención del cálculo de eficiencia a partir de los diferentes datos que pueden ser medidos en el proceso.

## *Capítulo 1*

### **Hornos y Eficiencia**

#### **1.1 Hornos**

##### *1.1.1 Selección de los hornos*

Para seleccionar un horno es de primordial importancia el conocimiento del propósito para el que es requerido y el consumo aproximado de combustible. Su capacidad estará estrechamente relacionada con la producción aproximada, puesto que una de las fuentes de ineficiencias térmicas es cuando un equipo no opera a su capacidad de diseño. (1)

También es importante considerar las siguientes recomendaciones (1):

1. **Robustez de la estructura del horno.** Además de una armadura mecánicamente estable son esenciales el empleo de un refractario de buena calidad y la disposición eficaz de los ladrillos.
2. **Facilidad de control.** Todas las válvulas, controles de regulador y demás aparatos han de situarse en una posición conveniente para facilitar el acceso a la misma. El control automático es un instrumento eficaz.
3. **Facilidad de mantenimiento.** Esto implica el empleo de partes reemplazables, particularmente de aquellas que se suponga que pueden afectarse por el calor o el desgaste, y facilidad para inspección y limpieza.
4. **Aislamiento térmico.** Resulta esencial para una buena eficiencia en el horno.
5. **Provisión de un tiro adecuado.** Una chimenea no es necesariamente el medio más eficaz para la provisión de un tiro. En caso de utilizar ventiladores se les debe proporcionar una velocidad adecuada. Los conductos de humos, reguladores y mirillas deben disponerse y construirse en forma que se reduzca al mínimo la posibilidad de infiltración de aire.
6. **Atmósfera del horno.** En caso de hornos en los que el material que desea calentarse se encuentra en contacto directo con la flama, por ejemplo en la industria metalúrgica.
7. **Recuperación de calor.** Uso de precalentadores de aire.

Los hornos pueden dividirse en dos tipos generales (1):

1. Hornos de calentamiento indirecto. En estos hornos el calor se produce en conductos o en una cámara de combustión separada y ha de pasar a través del refractario u otro material que aisle al material de la cámara de combustión, donde se encuentra el material a calentar. Los productos de la combustión no se ponen en contacto con éste.

2. Hornos de calentamiento directo (por ejemplo los utilizados en la industria metalúrgica). En estos hornos la llama ha de producirse dentro de la cámara en que se sitúa el material o en una cámara separada, pero en todo caso los productos de combustión se ponen en contacto con el material.

En el primer tipo de horno el material ha de calentarse hasta una temperatura determinada, y de acuerdo con ésta hay que regular los conductos de humos por la cantidad total de combustible quemado. El objetivo debe ser evidentemente quemar el material con la eficiencia máxima y pasar la máxima cantidad de calor generado a través del material que separe a la cámara de combustión del material a calentar. El calor se transmite al material por dos mecanismos que son convección y radiación.

La recuperación de calor se consigue cuando el aire de combustión; y en algunos casos también el combustible, se precalientan aprovechando el calor sensible de los gases de chimenea que abandonan el equipo por la chimenea. El precalentamiento de aire y de gas aumentan la temperatura de flama considerablemente.

### *1.1.2 Hornos usados en la refinación del petróleo*

En la destilación atmosférica y de vacío del crudo, descomposición térmica, y en el proceso de gas a alta temperatura, los hornos tubulares a fuego directo son la unidad principal en una refinería. Los hornos también se emplean en servicios de vaporización, calentamiento y tratamiento. En una refinería se requieren varios tipos de hornos en los que se puedan manejar fluidos a temperaturas tan altas como 1500°F y combinaciones de temperatura y presión tan severas como 1100°F y 1600 psig.

En estos hornos se usa exclusivamente combustibles líquidos o gaseosos. En general las eficiencias térmicas de los hornos de refinación son menores que las de los calentadores, ya que en algunos

casos el costo del combustible no es significativo en relación con el costo total del proceso de refinación. Sin embargo la contaminación se ha vuelto un factor importante y en la medida en la que se tenga una mejor eficiencia en el uso de los combustibles podremos disminuir la contaminación que estos producen y al mismo tiempo implica un ahorro de combustible.

Ocasionalmente para hornos de baja capacidad con intercambios de 5000000 BTU/h se utiliza solamente el calor por radiación (2). Los precalentadores de aire han sido utilizados para disminuir el gasto de combustible.

En la figura 1.1 se muestra un esquema que describe los elementos fundamentales de horno simple con una zona de convección en la parte superior y por encima de esta la chimenea, y en la parte inferior se encuentra la sección de radiación. Los tubos se encuentran localizados alrededor de la pared del horno en la sección de radiación y a lo largo de todo la zona de convección.

El material entra por la parte superior de la zona de convección y posteriormente pasa a la sección de radiación donde se encuentran los quemadores.

Los gases de combustión pasan por la zona de convección intercambiando calor con el material antes de salir a través de la chimenea.

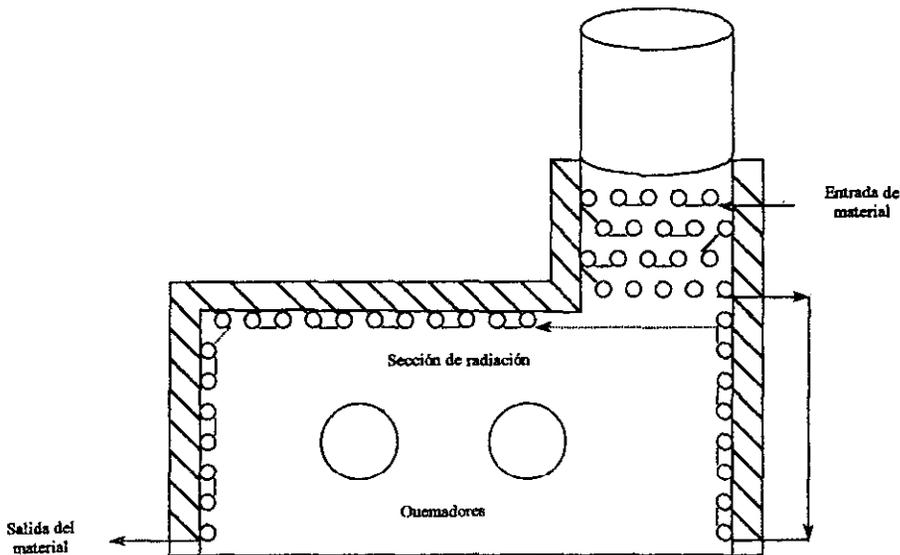
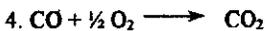
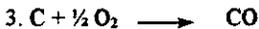
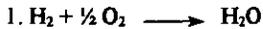


Figura 1.1 Horno con zona de convección en la parte superior  
(Process Heat Transfer, Kern D., 1950, McGraw Hill, p.618, fig. 19.6.)

En general un horno consiste en un receptor de calor, una fuente de calor y las superficies que intervienen en la transferencia de calor entre ambos.

### **1.1.3 Reacciones de combustión**

Los combustibles utilizados para la combustión se componen de una serie de hidrocarburos. Tanto los combustibles líquidos como los gaseosos contienen una mezcla de hidrocarburos. Los combustibles gaseosos contienen en su mayor parte hidrocarburos ligeros como el metano, etano, propano, etc. En algunas ocasiones contienen hidrógeno. Los combustibles líquidos contienen hidrocarburos más pesados. A pesar de la gran variedad de componentes que pueden ser encontrados en los distintos combustibles se puede decir que todos ellos están compuestos por tres elementos principales: hidrógeno, carbono y azufre. De esta forma las reacciones de combustión se pueden simplificar de la siguiente manera:



### **1.1.4 Receptor de calor**

El receptor de calor más común dentro de los hornos industriales se compone de un conjunto de tubos que se localizan alrededor de las paredes, en la parte inferior y superior del horno o en un lugar más centrado dentro de la caja donde se quema el combustible. El caso más común es aquel en el que el arreglo de los tubos se encuentra en una sola línea enfrente de la pared de ladrillo refractario.

### **1.1.5 Fuente de calor**

La fuente de calor primordial en un horno proviene de las reacciones de combustión y de la fuente de calor de los gases de combustión en el caso de que exista un precalentador de aire. Los

combustibles gaseosos, generalmente producen flamas no luminosas. Los combustibles líquidos pueden producir flamas con grados de luminosidad variables, dependiendo del diseño de los quemadores, sin tomar en cuenta la atomización y el porcentaje de aire en exceso utilizado. Los quemadores de carbón pulverizado producen flama que contiene partículas sólidas incandescentes y un alto grado de luminosidad. (2)

### *1.1.6 Superficies*

Resultan de suma importancia las superficies que intervienen en la transferencia de calor entre la fuente de calor y el receptor de calor.

Dentro de estas superficies se encuentra el ladrillo refractario, los tubos que contienen el material, etc.

El material de los tubos debe ser resistente a las altas temperaturas a las que el horno trabaja, también debe ser un buen conductor de calor y resistente al tipo de material que se lleva dentro de él.

### *1.1.7 Aislamiento Térmico*

La pared del horno tiene una función triple: como medio refractario para resistir el efecto de la llama y la acción escoriificante del polvo de la atmósfera del horno, como aislamiento térmico y en algunos procesos, como medio de provisión de calor a la carga por radiación.

Generalmente no es posible obtener una combinación de estas tres propiedades en un mismo material. De acuerdo con esto ha de emplearse una pared compuesta de ladrillo refractario y ladrillo aislante. La efectividad de los materiales aislantes depende del tamaño y la distribución uniforme de las celdas presentes en el material, cuya conductividad térmica es extremadamente baja.

Es aconsejable aislar los basamentos y particularmente alrededor de los conductos de humo.

### *1.1.8 Quemadores de aceite*

Para la combustión de los aceites combustibles se emplean quemadores atomizantes. De estos hay varios tipos pero pueden clasificarse en su mayor parte por:

1. Quemadores de inyección a presión, que se emplean principalmente para las calderas de vapor. El aceite se fuerza a presión elevada a través de un atomizador mecánico, dándole un

movimiento rotacional. El aceite sale así de la boquilla en fina lluvia, que toma la forma de cono hueco.

2. Inyector de vapor. Este tipo se emplea también en la producción de vapor, y el principio es casi idéntico al quemador de aire a alta presión.
3. Quemadores de inyección de aire, que son los más aplicados a los hornos industriales. La atomización se efectúa por medio de aire a una presión que puede oscilar entre 0.02 y 7 kg/cm<sup>2</sup>. Los quemadores de alta presión trabajan sobre 0.4 kg/cm<sup>2</sup>, y los de baja presión, por debajo de 0.1 kg/cm<sup>2</sup>.  
El inyector de vapor necesita de 0.5 a 0.85 kg de vapor por cada kg de aceite. El vapor reduce la temperatura de la flama pero puede ayudar a la subsecuente transferencia de calor. El desgaste que siempre tiene lugar en las boquillas de salida de vapor puede originar un aumento sensible del consumo, cuando no se inspeccionan y prueba en intervalos regulares. (1)

### *1.1.9 Temperatura de flama adiabática*

La expresión temperatura de flama adiabática o temperatura teórica de flama es la temperatura obtenida si el combustible es quemado con la cantidad teórica de aire a presión constante en un proceso adiabático, es decir, que no transfiere calor.

Cuando se quema una mezcla de combustibles, la temperatura de flama adiabática puede ser tomada como un promedio de las temperaturas de flama adiabática de cada uno de los combustibles.

Para combustibles de un tipo específico, con diferencias relativamente grandes en la composición, la temperatura de flama adiabática no tiene variaciones importantes debido a que el combustible más ligero produce una menor cantidad de productos de combustión de lo que produce el de mayor peso.

Cada vez que una carga es quemada dentro de un horno, los productos de combustión, durante la combustión, aumentan el calor requerido. Como resultado, la temperatura de flama adiabática real es aproximadamente un 70% de la teórica, aunque este valor fluctúa desde un 50% hasta un 90%. Esto significa que a una temperatura muy alta de flama adiabática puede ser obtenida si el paso de los productos de combustión es rápido, si no es así la temperatura de flama adiabática disminuye. En la mayoría de los casos la combustión ocurre con una deficiencia o un exceso de aire.

## 1.2 Combustibles

Existen diversos combustibles que son utilizados en los hornos. Estos son elegidos tomando como criterio sus propiedades, disposición y costo, principalmente. (3)

Los siguientes combustibles son los más utilizados en hornos industriales:

- I. Combustibles gaseosos
  - A. Gases pesados como gas natural, gas de refinería, gas de coque, gas manufacturado, gas de agua, butano y propano.
  - B. Gases ligeros como gasógeno (crudo o tratado), gas de inyección, gas mezclado.
- II. Combustibles líquidos. Aceites combustibles desde los más ligeros como la gasolina, hasta los más pesados como aceites residuales, alquitrán.
- III. Combustibles sólidos. Carbón y coque, carbón pulverizado, coque de petróleo.

En la Tabla I se muestran algunas propiedades importantes de combustibles usados en hornos. Estos datos son de combustibles típicos que fueron procesados por Pemex en la refinería de Minatitlán y Cd. Madero.

**TABLA I**  
Propiedades de los combustibles  
**REFINERÍA DE MINATITLÁN.**

**Gas**

Fuente de suministro	Pemex	Pemex
Tipo:	Gas de Refinería	Gas Natural
Peso Molecular		
Presión kg/cm <sup>2</sup> man.	3.5	3.5
Temperatura, °C	ambiente	ambiente
Gravedad Específica (Aire = 1.0).	0.657	0.62
Poder Calorífico inferior, BTU/mpc	1000	1135
Disponibilidad m <sup>3</sup> /h.	la requerida	la requerida

COMPOSICION (% mol )	Gas de Refinería	Gas Natural % Vol.
H <sub>2</sub>	41.0	
H <sub>2</sub> S	0.1	
C <sub>1</sub>	46.8	73.23
C <sub>2</sub>	9.4	14.22
C <sub>3</sub>	1.7	7.20
C <sub>4</sub>	0.4	1.93
iC <sub>4</sub>	0.4	0.87
iC <sub>5</sub>	0.1	0.41
C <sub>5</sub>	0.1	0.45
C <sub>6</sub>		0.29
N <sub>2</sub>		1.39
CO <sub>2</sub>		0.1
TOTAL	100.0	100.0

### ESPECIFICACIONES

Licuable	L / m <sup>3</sup>	0.059
N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub>	% Vol.	3.0
H <sub>2</sub> S	ppm	4.4
S <sub>2</sub>	ppm	200
Humedad	mg/m <sup>3</sup>	112
Temperatura	°C	Ambiente

#### 6.2 Líquido

Fuente de suministro	Por Pemex
Tipo	Combustóleo
Presión, kg/cm <sup>2</sup> man.	3.5
Temperatura, °C	85.0
°API	10.0
Poder calorífico inferior, kcal/kg	9,900
Disponibilidad	La requerida
Azufre, % en peso	4
Vanadio, ppm en peso	274

#### REFINERÍA DE Cd. MADERO.

##### Gas

Fuente de suministro	Por Pemex
Tipo	Gas
Presión kg/cm <sup>2</sup> man.	4.5
Temperatura, °C	25.0
Gravedad específica (Aire = 1.0).	0.709
Peso molecular	20.54
Poder calorífico inferior, kcal/m <sup>3</sup> std.	8905
Disponibilidad m <sup>3</sup> /h.	La requerida

COMPOSICIÓN (% mol).	
H <sub>2</sub>	15.8
C1	59.1
C2	7.5
C3	2.8
C4	0.8
C2 =	1.8
C3 =	1.7
C4 =	0.3
iC4	0.6
iC5	1.9
C5	2.3
C6	0.6
Inertes	4.1
CO2	0.2
H2S	0.5
TOTAL	100.0

### Líquido

Estas características son a la llegada a tanques de almacenamiento.

Fuente de suministro	Por Pemex
Tipo	Combustóleo 4% S
Presión, kg/cm <sup>2</sup> man.	3.0
Temperatura, °C	60.0
°API	12.361
Poder calorífico inferior, kcal/kg	9445
Disponibilidad	La requerida

### 1.2.1 Combustibles Gaseosos

Estos combustibles ofrecen el mayor número de ventajas. No hace falta calentarlos para transportarlos como en el caso de algunos combustibles líquidos con alta viscosidad. Debido a esto es posible transportarlos y distribuirlos fácilmente a un gran número de hornos. No hay muchos gases que sean procesados ya que comúnmente se utiliza el gas natural que es el único gas que se puede usar en las condiciones en que se extrae de su yacimiento sin necesidad de tratamiento.

Los gases se pueden mezclar con aire en proporciones adecuadas sin preparación previa; su flujo puede ser controlado adecuadamente; al igual que su temperatura en la atmósfera del horno y la distribución de esta.

## Gas Natural

Los principales componentes del gas natural son el metano, etano, propano e hidrocarburos parafínicos de mayor peso molecular presentes en diferentes concentraciones. El gas natural también contiene componentes no combustibles como dióxido de carbono, nitrógeno y azufre. El gas "seco" contiene una pequeña cantidad de hidrocarburos más pesados que el etano. El volumen de aire requerido para su combustión es aproximadamente proporcional al valor calorífico del gas, los requerimientos de aire para el gas natural varían en un amplio rango.

Debido a que el gas natural está compuesto, casi por completo, por hidrocarburos produce una flama luminosa, en caso de que se requiera luminosidad. El alto contenido de hidrocarburos limita su precalentamiento en regeneradores o recuperadores, debido a que los hidrocarburos se rompen a altas temperaturas y obstruyen las tuberías con hollín. Generalmente el gas natural no es precalentado ya que su peso es muy pequeño, sin embargo cuando se mezcla con una gran cantidad de gas combustible puede ser calentado sin que se forme hollín, ya que el carbón liberado se combina con el CO<sub>2</sub>.

## Gas de coque

Este gas es producido de la destilación del carbón bituminoso. Este combustible se limita al uso en trabajos de acero.

Su composición varía considerablemente con los tipos de hidrocarburos que contiene, con la temperatura a la que se produce, la infiltración de aire, la cantidad de aceites con los que se mezcla y otros factores por lo que resulta muy difícil obtener un análisis que aplique a todas las condiciones.

## Gas de agua

Se genera cuando una corriente de vapor pasa a través de carbón incandescente. A bajas temperaturas (alrededor de 930°F) se forma bióxido de carbono e hidrógeno, mientras que a altas temperaturas (mayores a 1600°F) se forma monóxido de carbono e hidrógeno. El proceso extrae el calor de la cama de combustible lo que produce una disminución de su temperatura. Si la temperatura baja demasiado, pasa una cantidad excesiva de vapor de agua dentro del gas de agua.

Como regla el gas de agua se limpia antes de entrar al horno. Contiene una gran cantidad de monóxido de carbono por lo cual resulta tóxico. Al quemarse produce una flama azul. El término

gas de agua azul se refiere al gas de agua carburado, el cual se elabora por vaporización y descomposición de gasóleo en una atmósfera de gas de agua azul caliente, y el cual se quema con una flama luminosa.

El gas de agua tiene la temperatura de flama adiabática más alta de todos los gases industriales utilizados.

#### Gas de ciudad

En las ciudades donde no se dispone de gas natural, se usa gas artificial para los hornos industriales. Este gas, generalmente conocido como gas de ciudad o gas manufacturado es una combinación de gases, entre ellos: gas de carbón, gas de agua y gas de aceite. La combinación puede ser una mezcla de dos o más componentes.

El gas de carbón se hace por medio de una carbonización de carbón en hornos calentados externamente.

El gas producido requiere purificación, por lo que se pasa a través de filtros para eliminar cualquier material sólido que pueda estar presente y también los compuestos de azufre.

#### Gas de refinería

En el proceso de descomposición del petróleo, el coque y el gas de refinería son subproductos. El gas contiene hidrógeno e hidrocarburos de diferentes composiciones. Su poder calorífico varía entre 1300 y 2000 BTU/ft<sup>3</sup>.

#### Gasógeno

Se obtiene a partir de una mezcla de vapor y aire que pasa a través de una cama de carbón o coque. Si se pasa aire puro a través de la cama, se hace gas de aire. Variaciones en la relación de aire y vapor produce variaciones en la composición del gas. La composición del gas también varía con el tipo de combustible que es gasificado, por que la producción del gas involucra tres etapas, secado (donde se elimina el vapor de agua), destilación de material volátil y gasificación del carbón.

#### Gas crudo

Este gas proviene directamente del productor. Generalmente se quema sin ningún tipo de enfriamiento o tratamiento.

### Gas de altos hornos

Este gas se usa en altos hornos y en la industria metalúrgica. Generalmente se usa mezclado con subproductos del gas de coque. A esta mezcla se le llama gas mezclado.

El gas de altos hornos es extremadamente tóxico. Su capacidad calorífica es tan baja que no solamente el aire es precalentado sino también el combustible es precalentado si la temperatura del horno es de 2200 °F o mayor.

### Gas Licuado del Petróleo (LPG)

Estos combustibles son hidrocarburos entre el propano y el butano. Son gases o vapores a temperatura ambiente y a presión atmosférica, pero son líquidos a temperatura ambiente y alta presión. Se comprimen, se enfrían y se ponen en contenedores a alta presión. Los gases de LP comercial se extraen de gas de refinería. Son mezclas de gases con diferentes composiciones.

El LPG es utilizado en periodos en los que el gas natural escasea. El propano es popular para este uso. El gas es mezclado usualmente con una pequeña cantidad de aire lo que hace que su capacidad calorífica sea menor a la del gas natural y lo adapta a los requerimientos de aire de combustión del gas natural.

### Gasolina Natural

Antes de que el gas natural sea cargado al sistema de distribución, se comprime y se enfría. Los condensados se llaman gasolina. Este combustible es un buen sustituto del gas natural pero hay muy poco.

### Gas reformado

El gas natural y el gas de refinería se reforman para reducir su capacidad calorífica para poderlos alimentar a quemadores diseñados para gas de ciudad. Para este fin, los gases son mezclados con aire o son parcialmente quemados en una atmósfera de aire y vapor. El uso de estos gases en hornos es muy poco común.

### ***1.2.2 Combustibles líquidos***

Los combustibles líquidos que son usualmente utilizados en hornos industriales son fuel-oil y alquitrán.

La gasolina, el keroseno y el alcohol son muy caros para ser considerados como combustibles para procesos de calentamiento, excepto para hornos muy pequeños o para ser usados como combustibles de emergencia en caso de que exista escasez de otros combustibles.

Algunos de estos combustibles no necesitan precalentamiento. Los combustibles líquidos presentan menores pérdidas por almacenamiento que en el caso de los gases.

#### **Fuel-Oil**

Está formado, dentro del proceso de refinación del petróleo, por los hidrocarburos restantes de la destilación de gasolina, nafta y keroseno. Por lo tanto la combustión de cualquier fuel-oil denota que este contienen productos más pesados que el keroseno.

La mayoría del fuel-oil proviene de los residuos de procesos destilación o de descomposición.

#### **Aceite alquitranado**

Se obtiene a bajas temperaturas de la destilación del carbón. Es el punto de partida de muchos líquidos ligeros tales como el benzol, toluol entre otros. Puede ser usado como combustible en hornos industriales.

### ***1.2.3 Combustibles Sólidos***

Algunos de los más usados son: carbón, coque y madera. Los combustibles sólidos, a menos que se usen en polvo, causan algunos inconvenientes en su transportación a los hornos y la desventaja de que dejan cenizas que hay que remover constantemente. La combustión de los sólidos no puede ser tan bien controlada como la de los líquidos o los gases.

### 1.3 Factores que afectan la eficiencia del horno

#### 1.3.1 *Combustión*

La condición fundamental para la combustión completa es que el aire y el combustible se pongan en contacto en las proporciones y condiciones debidas. La función del tiro es llevar el aire en contacto con el combustible. Un exceso de aire superior al necesario para la combustión completa no hace más que producir pérdidas de calor.

Las condiciones necesarias para una combustión completa pueden resumirse de la siguiente manera: La entrada del aire debe situarse de manera que permita una mezcla adecuada aire-gas. También es importante turbulencia para la mezcla rápida de aire-gas dentro de la cámara de combustión y la temperatura de esta para lograr una combustión completa dentro del tiempo y espacio destinados a ella.

#### 1.3.2 *Provisión de aire*

Es necesario poner el aire en contacto con el combustible y separar los productos de combustión una vez formados. Para lograr esto ha de existir una corriente gaseosa a través del sistema. El aire entra en el sistema y pasa a través del horno donde se calienta por las reacciones de combustión en que toma parte. Los gases formados en el horno pasan a través del resto de la instalación, cediendo la mayor parte de su calor y finalmente salen por la chimenea.

El movimiento de los gases, una vez admitido el aire en el horno, puede efectuarse en diferentes formas:

1. El aire puede ser aspirado por el tiro natural ejercido por una chimenea.
2. Por un ventilador situado en la base de la chimenea.
3. Puede introducirse el aire a presión por medio de un ventilador.
4. El paso del aire puede forzarse por inducción de un chorro de vapor.
5. Tiro compensado, en este se sacan los gases de combustión con un ventilador extractor al mismo tiempo que se introduce el aire con un ventilador impulsor.

### **1.3.3 Tiro**

Los rendimientos bajos en la combustión se deben frecuentemente a una insuficiencia del tiro para quemar la cantidad de combustible empleado.

El tiro natural depende de la altura de la chimenea y la temperatura media de los gases dentro de la misma. El tiro aumenta proporcionalmente con la temperatura de los gases de chimenea y con la altura de esta.

### **1.3.4 Aire en exceso**

Las reacciones de combustión no se llevan a cabo a menos de que exista un exceso de oxígeno o aire presente durante la combustión. En hornos comerciales el exceso de aire es pequeño debido a la formación de CO, H<sub>2</sub> y humo.

La cantidad de oxígeno en exceso utilizado es entre un 10% y un 75%.

Debe evitarse la presencia de monóxido de carbono en los gases de combustión, pues constituye una pérdida de calor.

La cantidad de aire en exceso necesaria para la combustión completa depende de la temperatura de la cámara de combustión. Como regla general puede decirse que cuando hay más de 14% de CO<sub>2</sub>, es probable que la combustión sea incompleta y se encuentren CO y H<sub>2</sub> en los gases de chimenea, lo que constituye una pérdida de rendimiento que no puede compensarse por el menor volumen de aire en exceso.

Por otro lado, el calor arrastrado por los gases usados depende del volumen, los calores específicos de los componentes y de la temperatura.

Al aumentar el volumen de los gases usados aumentan las pérdidas de calor en los gases de chimenea.

Por estas razones es necesario que el aire en exceso sea justamente el necesario para lograr la combustión completa y evitar las pérdidas de calor que se den por falta o exceso de este.

### **1.3.5 El factor tiempo en la combustión**

Una vez introducida en el horno la cantidad adecuada de aire, entran en consideración los factores tiempo, temperatura y turbulencia.

Todas las reacciones químicas requieren un tiempo determinado para completarse, lo que es debido a la naturaleza de la reacción o a la dificultad de poner rápidamente en contacto las sustancias que reaccionan.

En el caso de alimentar combustibles sólidos, un lecho demasiado delgado facilita el paso del aire sin llegar a consumirse, por falta del contacto adecuado entre el combustible y el aire.

En la combustión gaseosa hay que ajustar el volumen del espacio de combustión a las condiciones dadas. Para que la combustión sea rápida hay que mezclar el aire y el gas tal íntimamente como se pueda inmediatamente después de la entrada en el horno. Si no se hace así la llama será muy larga y se extenderá hasta la salida de humos.

### ***1.3.6 Turbulencia***

El movimiento turbulento permite una mezcla rápida de gas y aire. El movimiento laminar hace que la combustión sea lenta. Sin embargo en el movimiento turbulento el aire y el gas se mezclan en un pequeño volumen, aumentando la probabilidad de ponerse en contacto el gas con el oxígeno.

### ***1.3.7 Temperatura***

La combustión no tiene lugar hasta que la temperatura es suficientemente elevada.

Cuando hay superficies frías cerca de la cámara de combustión debe mezclarse aire y de ser posible, precalentado.

La velocidad de reacción se duplica o triplica por cada 10°C de aumento en la temperatura. Las temperaturas elevadas, que pueden obtenerse por precalentamiento de aire, favorecen la combustión rápida.

Aunque las flamas tienen temperaturas superiores a 1100°C, son función de la temperatura del lecho combustible y la distancia al mismo, el metal de una caldera, por ejemplo, tiene una temperatura no superior a la del vapor saturante, de unos 230°C. La carga de los hornos suele también añadirse fría. Si tocan las llamas estas superficies frías se interrumpe la combustión, pasando el CO y al H<sub>2</sub> a los gases de chimenea. En condiciones extremas se queda también sin quemar el carbono, dando lugar a la formación de humo.

El enfriamiento de la llama puede provenir de:

1. Cargas grandes y poco frecuentes.
2. Entrada excesiva de aire, por ejemplo la apertura prolongada de las portezuelas de la cámara de combustión.
3. Una flama larga que toca el metal, por ejemplo, la llama de combustibles muy ricos en volátiles.
4. Condiciones térmicas que prolongan a los gases que arden en intimo contacto con metales fríos.
5. La forma de la instalación.

### ***1.3.8 Pérdidas de calor inevitables***

- a) Siempre se presenta una pérdida inevitable de calor en los gases de chimenea. También se pierde el calor latente y el calor sensible del vapor de agua procedente de la combustión y el desprendido del material, cuando éste entra al horno húmedo.
- b) Por muy bueno que sea el aislamiento del horno siempre hay un pequeño escape de calor a la atmósfera a través de sus paredes. El calor atraviesa las paredes por conducción, escapándose a la superficie externa por convección y radiación.

### ***1.3.9 Gasto de combustible en el calentamiento del horno***

Es importante tomar en cuenta el calor necesario para calentar el horno en la primera operación el cual no es muy grande.

En un horno continuo es muy pequeña la relación entre el calor empleado para el calentamiento inicial y el calor total suministrado al horno en un año.

### ***1.3.10 Pérdidas por radiación a través de aberturas***

Suponiendo que tenemos una abertura de  $1 \text{ dm}^2$  tendríamos una pérdida de calor de 3000 kcal/h, suponiendo que la pared del horno es muy delgada, sin embargo este cálculo es menor que el real debido a que los lados de la abertura se calientan por el calor radiado por el interior del horno, volviendo a emitir al exterior parte de esta radiación.

Si en un horno que trabaja a 1200°C abrimos una puerta de 14.5\*1.2 m, se pierde una cantidad de calor de 367000 kcal/h (1). En una puerta que se abre continuamente hay una pérdida continua de calor; pero el revestimiento de la puerta y los lados de la abertura se recalientan periódicamente hasta la temperatura interna. Así, cuando se abre la puerta, junto con la pérdida por radiación de la puerta hay una pérdida por el enfriamiento de los lados de la abertura.

### ***1.3.11 Pérdidas de calor por salida de la llama al exterior del horno***

A fin de evitar la oxidación de la carga en un horno que debe operar en atmósfera reductora hay que trabajar con una ligera sobre-presión. Se considera que una pequeña pérdida por salida de los gases al exterior es menos perjudicial que la oxidación por entrada de aire. Sin embargo, si la puerta del horno no cierra bien, el volumen de llama que sale al exterior puede ser considerable. El marco de la puerta se recalienta y corroerá, empeorando las condiciones.

La estimación de las pérdidas debidas a esta causa es difícil; pero evidentemente conduce a una pérdida de calor a la que ha de concederse gran atención. Dos de los medios para que sean mínimas estas pérdidas son la conservación de la estructura del horno y la disposición correcta de los registros y tapas, junto con el ajuste de una ligera sobre-presión lo más pequeña posible en el interior del horno.

Una pérdida análoga puede tener lugar cuando las llamas del interior de la estructura no quedan limitadas a la cámara del horno. Si la combustión está mal ajustada sucede a menudo que pasa la llama a través del horno, continuando la combustión en los recuperadores, regeneradores o calderas de gases usados. En este caso la pérdida no es tan seria en caso de que haya recuperación de calor. Sin embargo cuando no hay recuperación de calor la pérdida resulta muy elevada.

Finalmente, con los hornos que operan con una ligera sobre-presión se origina una pérdida de gases a través de los agujeros de la mirilla o en las rendijas, ardiendo en el aire exterior.

### ***1.3.12 Pérdidas de calor por combustión incompleta***

En muchos hornos industriales hay paso de combustible que no se consumió. La combustión completa del combustible no se da a menos que el aire y el combustible se mezclen adecuadamente. Aún cuando hay aire en exceso, se encuentran trazas de combustible en los gases de chimenea. La cantidad de calor perdido en estos casos depende no sólo del diseño de los quemadores y del horno, sino también de los requerimientos de operación.

La mayoría de los combustibles contienen hidrocarburos. En las etapas iniciales de la combustión se forman componentes tales como  $\text{CH}_n\text{OH}$ . Con exceso de aire estos componentes son oxidados hasta  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Si la alimentación de aire es insuficiente, los productos de chimenea son  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  y metano.

Muchos experimentos (4) han demostrado que, cuando el  $\text{CO}$  se presenta, viene acompañado por  $\text{H}_2$  en una proporción aproximadamente igual, o con  $\text{H}_2$  y metano. El metano aparece en hornos a bajas temperaturas y cuando hay mucho  $\text{H}_2$  presente.

### *1.3.13 Reglas prácticas para evitar pérdidas de eficiencia en el horno (1)*

Hornos de gas y carbón pulverizado:

1. Los quemadores han de conservarse limpios y en buen estado. Todas las partes ajustables han de poder moverse libremente. Los controles de aire de los inyectores suelen atrancarse a menudo, bien por la corrosión, el polvo o alguna falla mecánica.
2. Los reguladores han de estar libres, en buenas condiciones de trabajo y no sujetos a infiltraciones de aire.
3. La cantidad correcta de aire puede deducirse de la inspección de la llama, aunque las indicaciones difieren para distintos tipos de quemador. Puede obtenerse una guía más exacta para determinar la cantidad necesaria de aire por medio del análisis de gases de la chimenea.
4. En los quemadores insufiantes que trabajan normalmente con llama no luminosa, una llama larga y lenta indica un exceso de gas. La combustión correcta se obtiene acortando la llama hasta el momento en el que desaparece la tonalidad amarillenta. Esto se logra disminuyendo el paso del gas o aumentando el del aire. El ruido del mechero es máximo en ese momento.
5. En otros tipos de quemador, en que se retarda la mezcla de gas y de aire, un color amarillo brillante es indicador de una buena combustión, tanto mejor mientras más brillante sea la llama.
6. Cuando sea necesario ajustar la entrada de aire sólo se hará empleando la válvula principal. Hay que evitar infiltraciones de aire por las puertas del horno, mirillas o defectos de ladrillo.
7. Para obtener un tiro compensado ha de usarse el regulador de tiro. Su posición correcta se encontrará quemando una pequeña llama o soplando humo en uno de los orificios de la mirilla, ajustando el regulador hasta que la llama vacile o el humo tienda a ser arrastrado al interior del horno.

8. Han de ajustarse los reguladores y las válvulas de aire para corresponder al paso del gas.  
Siempre que se altere la cantidad de gas suministrada al horno hay que ajustar el regulador para restablecer las condiciones originales de presión en la cámara de combustión del horno.

Hornos alimentados por aceite:

1. En el punto de empleo, el combustible líquido ha de tener la viscosidad debida para que los quemadores funcionen *adecuadamente*.
2. Los quemadores han de desarmarse y limpiarse con mucha frecuencia.
3. Los quemadores debe de proveerse con válvulas graduadas que permitan una indicación visual de la cantidad de aceite que se emplea en cada momento.
4. Hay que separar el agua del combustible para evitar que entorpezca la combustión y produzca humo espeso.

## Capítulo 2

### Descripción de los algoritmos de cálculo

#### 2.1 Introducción

En el presente capítulo se expone el procedimiento de cálculo cada una de las subrutinas que conforman al programa de cómputo desarrollado en este trabajo. Cabe mencionar que algunas subrutinas comparten algoritmos semejantes, y para evitar repeticiones únicamente se escribieron los cálculos una vez.

Los diagramas de flujo de las rutinas pueden encontrarse en el Anexo II.

#### 2.2 Balance de materia

##### 2.2.1 Combustibles definidos

Existen diversos combustibles que por su disponibilidad, costo y características son convenientes para su uso dentro de hornos industriales. Estos combustibles difieren en características físicas y químicas provocando diferencias en el transporte e introducción de estos al horno así como la obtención de datos que los caracterizan. Esto repercute directamente en los cálculos a realizar para la obtención de la eficiencia. En otras palabras no se cuenta con los mismos datos para todos los combustibles debido a la composición y el estado físico de los mismos. En el desarrollo de los algoritmos de este trabajo se toma en cuenta esta premisa.

Para el caso de combustibles gaseosos por lo general cuenta con la composición del combustible. En el caso de combustibles líquidos la composición del combustible se define como una relación másica carbón/hidrógeno, por esta razón los cálculos de balance de materia para combustibles líquidos y gaseosos deben considerar estas diferencias.

El calor generado dentro de los hornos es producido por las reacciones de combustión de los combustibles. Los combustibles usados generalmente en hornos industriales se componen de distintas combinaciones de tres principales componentes: carbón, hidrogeno y azufre. En este trabajo se define la siguiente reacción de combustión generalizada:



Esta reacción general puede ser separada en tres reacciones individuales:



A partir de estas reacciones es posible desarrollar las siguientes ecuaciones para el cálculo del balance de materia:



$$iCO_2 - C_i - iO_2 = 0 \quad (4)$$

$$\text{Balance para el C: } N^*_C = N^{\circ}_C - i E_1 \quad (5)$$

$$\text{Balance para el CO}_2: N^*_{CO_2} = N^{\circ}_{CO_2} + i E_1 \quad (6)$$

$$\text{Balance para el O}_2: N^*_{O_2} = N^{\circ}_{O_2} - i E_1 \quad (7)$$

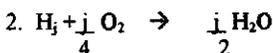
Considerando que la reacción es completa  $N^*_C = 0$  y que el  $O_2$  a la entrada es el estequiométrico tenemos:

$$E_1 = \frac{N^{\circ}_C}{i} \quad (8)$$

$$N^*_{CO_2} = N^{\circ}_{CO_2} + N^{\circ}_C \quad (9)$$

$$N^*_{O_2} = 0 \quad (10)$$

$$N^{\circ}_{O_2} = N^{\circ}_C \quad (11)$$



$$\frac{j}{2} H_2O - \frac{j}{4} O_2 - j H = 0 \quad (12)$$

$$\text{Balance para el H: } N^*_H = N^{\circ}_H - j E_2 \quad (13)$$

$$\text{Balance para el H}_2\text{O: } N^*_{H_2O} = N^{\circ}_{H_2O} + \frac{j}{4} E_2 \quad (14)$$

$$\text{Balance para el O}_2: N^*_{O_2} = N^{\circ}_{O_2} - \frac{j}{2} E_2 \quad (15)$$

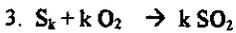
De igual manera que en la reacción anterior donde se considera  $N_H^* = 0$  y que el  $O_2$  a la entrada es el estequiométrico tenemos :

$$E_2 = \frac{N_{-H}^o}{j} \quad (16)$$

$$N_{H_2O}^* = N_{H_2O}^o + \frac{N_{-H}^o}{2} \quad (17)$$

$$N_{O_2}^* = 0 \quad (18)$$

$$N_{O_2}^o = \frac{N_{-H}^o}{4} \quad (19)$$



$$kSO_2 - S_k - kO_2 = 0 \quad (20)$$

$$\text{Balance para el S : } N_S^* = N_S^o - k E_3 \quad (21)$$

$$\text{Balance para el } SO_2 : N_{SO_2}^* = N_{SO_2}^o + k E_3 \quad (22)$$

$$\text{Balance para el } O_2 : N_{O_2}^* = N_{O_2}^o - k E_2 \quad (23)$$

De igual manera que en las reacciones anteriores  $N_S^* = 0$  y el  $O_2$  a la entrada es el estequiométrico tenemos :

$$E_3 = \frac{N_S^o}{k} \quad (24)$$

$$N_{SO_2}^* = N_{SO_2}^o + N_S^o \quad (25)$$

$$N_{O_2}^* = 0 \quad (26)$$

$$N_{O_2}^o = N_S^o \quad (27)$$

Donde:

$N^*$ : Moles a la salida (kmol)

$N^o$ : Moles a la entrada (kmol)

E: Avance de reacción (kmol)

i: Número de átomos de carbón

j: Número de átomos de hidrógeno

k: Número de átomos de azufre

Generalmente los combustibles están formados por más de un componente, de manera que el balance de materia anterior se considera para un componente. En el caso de combustibles líquidos se tienen como punto de partida datos de caracterización, esto es, la relación másica carbón/hidrógeno, la composición de azufre en el combustible y el flujo de combustible. En este caso, para la realización de los cálculos, se considera que el combustible contiene un componente. El balance de materia para el líquido se define de la siguiente forma:

$$\text{Flujo(kg)} = C \text{ (kg)} + H \text{ (kg)} + S \text{ (kg)} \quad (28)$$

Como se mencionó en el capítulo anterior los combustibles líquidos se definen por la relación másica carbón / hidrógeno.

$$ch = \text{masa C} / \text{masa H}_2 \quad (29)$$

El azufre está dado como un porcentaje en peso dentro del combustible de manera que:

$$100\% - \% \text{ azufre} = \% \text{ de carbono e hidrógeno dentro del combustible (\%c-h)} \quad (30)$$

Los inertes son considerados nulos ya que la proporción en la que se encuentran en el combustible es muy pequeña y no afectan de manera considerable el cálculo de la eficiencia.

A partir de la relación  $ch$  es posible determinar el porcentaje de carbón e hidrógeno dentro del combustible de la siguiente manera:

$$C = ch \quad (31)$$

$$H_2 = 1 \quad (32)$$

$$\text{Masa CH} = ch + 1$$

$$y_C = C / \text{Masa CH} \quad (33)$$

$$y_H = H_2 / \text{Masa CH} \quad (34)$$

Donde  $y_C$  y  $y_H$  son las fracciones másicas de carbón e hidrógeno respectivamente considerando exclusivamente una mezcla de carbón e hidrógeno. Para determinar la fracción molar de cada uno de los componentes del combustible se usan las siguientes ecuaciones:

$$x_C = y_C * \%c-h / 12 \quad (35)$$

$$x_H = y_H * \%c-h / 2 \quad (36)$$

$$x_S = \% \text{ peso azufre} / 32 \quad (37)$$

$$pm = 12 * x_C + 2 * x_H + 32 * x_S \quad (38)$$

$$N^{\circ}_H = \text{Flujo} * x_H / pm \quad (39)$$

$$N^{\circ}_C = \text{Flujo} * x_C / pm \quad (40)$$

$$N^{\circ}_S = \text{Flujo} * x_S / pm \quad (41)$$

En el caso del gas considerando un combustible formado por diferentes componentes el balance quedaria:

$$N^{\circ}_C = \text{Flujo} * x * i \quad (42)$$

$$N^{\circ}_H = \text{Flujo} * x * j \quad (43)$$

$$N^{\circ}_S = \text{Flujo} * x * k \quad (44)$$

A partir de aqui el procedimiento para el cálculo del balance de materia para liquido y para gas es identico.

Utilizando las ecuaciones 9, 17 y 25 se obtienen las moles producidas de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y SO<sub>2</sub>.

$$N^{\circ}_{CO_2} = N^{\circ}_{CO_2} + N^{\circ}_C \quad (45)$$

$$N^{\circ}_{H_2O} = N^{\circ}_{H_2O} + \frac{N^{\circ}_H}{2} \quad (46)$$

$$N^{\circ}_{SO_2} = N^{\circ}_{SO_2} + N^{\circ}_S \quad (47)$$

El oxígeno estequiométrico requerido para las tres reacciones estaria dado por :

$$O_{2es} = N^{\circ}_C + \frac{N^{\circ}_H}{4} + N^{\circ}_S \quad (48)$$

Donde:

Flujo: Flujo de combustible (kmol)

i: Número de átomos de carbón

j: Número de átomos de hidrógeno

k: Número de átomos de azufre

x : Fracción molar del componente en el combustible

O<sub>2es</sub>: Oxígeno estequiométrico para la combustión del componente en el combustible (kmol)

La siguiente parte a considerar es el balance para el aire en exceso, para este cálculo se requiere como dato el porcentaje de exceso de aire.

$$O_{2ex} = O_{2es} * \frac{\% ex}{100} \quad (49)$$

$$\text{Aire estequiométrico} = \frac{O_{2es}}{0.21} \quad (50)$$

$$\text{Aire en exceso} = \frac{O_{2ex}}{0.21} \quad (51)$$

$$\text{Aire total} = \text{Aire estequiométrico} + \text{Aire en exceso} \quad (52)$$

$$N_2 = \text{Aire total} * 0.79 \quad (53)$$

Para obtener la cantidad de agua que entra en el aire es necesario calcular la humedad del aire ( $y_{H_2O}$ ), este procedimiento de calculo se presentará más adelante.

$$H_2O_{\text{air}} = \text{Aire total} * y_{H_2O} \quad (54)$$

### 2.1.2 *Análisis Orsat y flujo de combustible*

Es posible analizar la composición de los gases de chimenea por medio del aparato de Orsat. El aparato consiste de tres tubos, uno contiene una solución de hidróxido de potasio para la determinación del  $CO_2$ , el siguiente contiene una solución alcalina de pirogalloí para la determinación del  $O_2$  y el último contiene una solución amoniacal de cloruro cuproso con el que se determina la concentración del CO. El análisis Orsat determina la composición de los gases de chimenea midiendo la disminución de volumen de la solución en cada uno de los tubos al dejar entrar en estos una muestra de los gases de chimenea (5). En algunos casos se reporta la medición del  $SO_2$  por lo cual se incluye en este procedimiento el balance para esta sustancia como se describe a continuación.

Datos :

Flujo de gases de combustible alimentado al horno

Composición de gases de chimenea base seca

Se suponen 100 mol de gases de chimenea base seca

$$N_{CO_2} = 100 * x_{CO_2} \quad (55)$$

$$N_{SO_2} = 100 * x_{SO_2} \quad (56)$$

El oxígeno en exceso es aquel que no reacciona con los combustibles y a partir de este es posible calcular el aire en exceso alimentado:

$$N_{OEX} = 100 * x_{OEX} \quad (57)$$

$$N_{N2} = 100 * x_{N2} \quad (58)$$

$$N_{OT} = N_{N2} (21/79) \quad (59)$$

$$N_{OES} = N_{OT} - N_{OEX} \quad (60)$$

La cantidad de agua es posible calcularla a partir de el oxígeno estequiométrico menos la cantidad de oxígeno utilizada para formar  $CO_2$  y  $SO_2$ .

$$N_{H2O} = (N_{OES} - N_{CO2} - N_{SO2}) * 2 \quad (61)$$

A partir los resultados obtenidos y los pesos moleculares de los componentes alimentados al horno, es posible obtener un flujo másico de combustible y con este se calcula un factor para corregir los valores anteriormente calculados:

$$\text{Flujo de combustible} = N_{H2O} * 2 + N_{CO2} * 12 + N_{SO2} * 32 \quad (62)$$

$$\text{Factor} = \text{Flujo de combustible (dato)} / \text{Flujo de combustible calculado} \quad (63)$$

$$N_{CO2} = N_{CO2} * \text{Factor} \quad (64)$$

$$N_{SO2} = N_{SO2} * \text{Factor} \quad (65)$$

$$N_{OEX} = N_{OEX} * \text{Factor} \quad (66)$$

$$N_{N2} = N_{N2} * \text{Factor} \quad (67)$$

$$N_{H2O} = N_{H2O} * \text{Factor} \quad (68)$$

$$AT = \frac{N_{N2}}{0.79} \quad (69)$$

$$Aex = Oex / 0.21 \quad (70)$$

$$Aes = At - Aex \quad (71)$$

Donde:

x : Fracción molar

N : moles

AT : Aire total

Aex : Aire en exceso

Aes : Aire estequiométrico

- O<sub>ex</sub> : O<sub>2</sub> en exceso
- O<sub>es</sub> : O<sub>2</sub> estequiométrico
- N<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> a la salida de los gases de chimenea
- CO<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> a la salida de los gases de chimenea
- SO<sub>2</sub> : SO<sub>2</sub> a la salida de los gases de chimenea
- H<sub>2</sub>O : H<sub>2</sub>O formada de la reacción de combustión

### 2.1.3 *Análisis Orsat y flujo de gases de chimenea*

En este caso los cálculos se basan también en al análisis Orsat sin embargo a diferencia del anterior el flujo utilizado para el balance de materia es el flujo de gases de combustión.

Los cálculos son muy similares al caso anterior a diferencia de que el factor se calcula en base al flujo de los gases de chimenea.

Datos :

Flujo de gases de chimenea base húmeda

Composición de gases de chimenea base seca

Se suponen 100 mol de gases de chimenea base seca

$$N_{CO_2} = 100 * x_{CO_2} \tag{72}$$

$$N_{SO_2} = 100 * x_{SO_2} \tag{73}$$

$$N_{OEX} = 100 * x_{OEX} \tag{74}$$

$$N_{N_2} = 100 * x_{N_2} \tag{75}$$

$$N_{OT} = N_{N_2} (21/79) \tag{76}$$

$$N_{OES} = N_{OT} - N_{OEX} \tag{77}$$

$$N_{H_2O} = 2 * (N_{OES} - N_{CO_2} - N_{SO_2}) \tag{78}$$

$$\text{Flujo gases de chimenea} = N_{H_2O} + N_{OEX} + N_S + N_{N_2} \tag{79}$$

$$\text{Factor} = \text{Flujo gases de chimenea (dato)} / \text{Flujo gases de chimenea (calculado)} \tag{80}$$

$$N_{CO_2} = N_{O_2} * \text{Factor} \tag{81}$$

$$N_{SO_2} = N_{SO_2} * \text{Factor} \tag{82}$$

$$N_{OEX} = N_{OEX} * \text{Factor} \tag{83}$$

$$N_{N_2} = N_{N_2} * \text{Factor} \tag{84}$$

$$N_{H_2O} = N_{H_2O} * \text{Factor} \tag{85}$$

$$AT = \frac{N_{N_2}}{0.79} \quad (86)$$

$$Aex = Oex / 0.21 \quad (87)$$

$$Aes = At - Aex \quad (88)$$

Donde:

x : Fracción molar

N : moles

AT : Aire total

Aex : Aire en exceso

Aes : Aire estequiométrico

Oex : O<sub>2</sub> en exceso

Oes : O<sub>2</sub> estequiométrico

N<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> a la salida de los gases de chimenea

CO<sub>2</sub> : CO<sub>2</sub> a la salida de los gases de chimenea

SO<sub>2</sub> : SO<sub>2</sub> a la salida de los gases de chimenea

H<sub>2</sub>O : H<sub>2</sub>O formada de la reacción de combustión

#### 2.1.4 *Análisis Orsat y calor que se lleva la corriente de proceso*

En esta subrutina se supone un flujo de combustible y se realizan los cálculos al igual que en la subrutina basada en el análisis Orsat y el flujo de combustible. Gracias a la suposición del flujo de combustible es posible calcular el calor que se lleva la corriente de proceso y este se compara con el calor introducido por el usuario y se calcula un nuevo flujo de combustible con el que se realiza los cálculos nuevamente.

Flujo de combustible supuesto = 1 kg mol

$$\text{Flujo} = \text{Calor de corriente de proceso (dato)} / \text{Calor de corriente de proceso (calculado)} \quad (89)$$

En este caso el cálculo de la eficiencia no cambia con el flujo de combustible, sin embargo es posible determinar el flujo de combustible requerido para obtener una cierta cantidad de calor en la corriente de proceso, lo que puede ser de gran utilidad.

## 2.3 Balance de calor

### 2.3.1 Calor sensible vapor de atomización

El vapor o aire de atomización es utilizado en algunos casos para esparcir el combustible dentro del horno y hacer la combustión más eficiente ya que el combustible se dispersa mezclándose mejor con el aire lo que aumenta la combustión del mismo. Debido a que, dependiendo de las prácticas operativas y del combustible, no en todos los quemadores se utiliza vapor o aire de atomización o simplemente no se conoce la relación combustible/ vapor, este es un cálculo opcional dentro del programa.

El balance de calor para el vapor/aire de atomización realiza el cálculo requerido para obtener el calor sensible transferido desde, o hacia, el vapor.

Según la ecuación de la entalpía a presión constante:

$$dH = C_p dT \quad (90)$$

y para un cambio finito de T de referencia ( $T_r$ ) a T de entrada del vapor de atomización ( $T_{ev}$ ):

$$DH = C_p dT \quad (91)$$

Las ecuaciones de  $C_p$  utilizadas son de la forma:

$$C_p = A*T + B*T^2 + C*T^3 + D*T^4 \quad (92)$$

Sustituyendo (92) en la ecuación (91):

$$DH = A (T_r - T_{ev}) + \frac{B}{2} (T_r^2 - T_{ev}^2) + \frac{C}{3} (T_r^3 - T_{ev}^3) + \frac{D}{4} (T_r^4 - T_{ev}^4) \quad (93)$$

El cálculo es el siguiente:

$$DH_{H_2O} = A_{H_2O} (T_r - T_{ev}) + \frac{B_{H_2O}}{2} (T_r^2 - T_{ev}^2) + \frac{C_{H_2O}}{3} (T_r^3 - T_{ev}^3) + \frac{D_{H_2O}}{4} (T_r^4 - T_{ev}^4) \quad (94)$$

$$DH_{O_2} = A_{O_2} (Tr - Tev) + \frac{B_{O_2}}{2} (Tr^2 - Tev^2) + \frac{C_{O_2}}{3} (Tr^3 - Tev^3) + \frac{D_{O_2}}{4} (Tr^4 - Tev^4) \quad (95)$$

$$DH_{N_2} = A_{N_2} (Tr - Tev) + \frac{B_{N_2}}{2} (Tr^2 - Tev^2) + \frac{C_{N_2}}{3} (Tr^3 - Tev^3) + \frac{D_{N_2}}{4} (Tr^4 - Tev^4) \quad (96)$$

$$DH_{\text{seco}} = (DH_{O_2} * 0.21 + DH_{N_2} * 0.79) * (Vap - H_2O_{\text{Asp}}) \quad (97)$$

$$DH_{\text{húmedo}} = DH_{H_2O} * H_2O_{\text{Asp}} \quad (98)$$

$$DH_1 = DH_{\text{seco}} + DH_{\text{húmedo}} \quad (99)$$

Donde:

Cp: Capacidad calorífica. (kJ/kmol)

A, B, C y D: Coeficientes para el cálculo de la capacidad calorífica (kJ/ kmol K).

Tr: Temperatura de referencia (K)

Tev: Temperatura de entrada del vapor de atomización. (K)

Vap: Vapor o aire de atomización que entra. (kmol)

H<sub>2</sub>O<sub>Asp</sub>: Agua que entra con el vapor de atomización. (kmol)

DH<sub>seco</sub>: Calor sensible del aire contenido en el vapor de atomización de Tev hasta Tr (kJ).

DH<sub>húmedo</sub>: Calor sensible del agua en el vapor de atomización de Tev hasta Tr (kJ).

DH<sub>1</sub>: Calor sensible del vapor de atomización de Tev hasta Tr. (kJ)

### 2.3.2 Calor sensible aire

A continuación se presenta el balance de calor sensible del aire antes de la reacción de combustión.

$$DH_{H_2O} = A_{H_2O} (Tr - Tea) + \frac{B_{H_2O}}{2} (Tr^2 - Tea^2) + \frac{C_{H_2O}}{3} (Tr^3 - Tea^3) + \frac{D_{H_2O}}{4} (Tr^4 - Tea^4) \quad (100)$$

$$DH_{O_2} = A_{O_2} (Tr - Tea) + \frac{B_{O_2}}{2} (Tr^2 - Tea^2) + \frac{C_{O_2}}{3} (Tr^3 - Tea^3) + \frac{D_{O_2}}{4} (Tr^4 - Tea^4) \quad (101)$$

$$DH_{N_2} = A_{N_2} (Tr - Tea) + \frac{B_{N_2}}{2} (Tr^2 - Tea^2) + \frac{C_{N_2}}{3} (Tr^3 - Tea^3) + \frac{D_{N_2}}{4} (Tr^4 - Tea^4) \quad (102)$$

$$DH_{seco} = (DH_{O_2} * 0.21 + DH_{N_2} * 0.79) * (\text{Aire total}) \quad (103)$$

$$DH_{hmedo} = DH_{p_{H_2O}} * H_{2O_{aire}} \quad (104)$$

$$DH_2 = DH_{seco} + DH_{hmedo} \quad (105)$$

Donde:

Cp: Capacidad calorífica (kJ/kmol).

A,B,C y D: Coeficientes para el cálculo de la capacidad calorífica (kJ/ kmol K).

Tr: Temperatura de referencia (K)

Tev: Temperatura de entrada del aire. (K)

Aire total: Aire a la entrada. (kmol)

H<sub>2</sub>O<sub>aire</sub>: Agua que entra con el aire. (kmol)

DH<sub>2</sub>: Calor sensible del combustible de Tea hasta Tr. (kJ)

### 2.3.3 Calor sensible combustible

Generalmente los combustibles son alimentados a temperatura ambiente, sin embargo existen algunas excepciones como el combustoleo el cual requiere calentamiento para bombearlo adecuadamente debido a su alta viscosidad.

En caso que se cuente con los coeficientes de los componentes individuales del combustible:

$$A_{comb} = \sum x_i A_i \quad (106)$$

$$B_{comb} = \sum x_i B_i \quad (107)$$

$$C_{comb} = \sum x_i C_i \quad (108)$$

$$D_{comb} = \sum x_i D_i \quad (109)$$

$$DH_{comb} = Cp_{comb} * \Delta T * \text{Flujo de combustible} \quad (110)$$

$$DH_3 = DH_{comb} * \text{Base} \quad (111)$$

Donde:

A,B,C y D: Coeficientes para el cálculo de la capacidad calorífica (kJ/ kmol K).

Tr:	Temperatura de referencia (K)
Tec:	Temperatura de entrada del combustible. (K)
Base:	Base de combustible (kmol).
DH <sub>3</sub> :	Calor sensible del combustible de Tec hasta Tr. (kJ)

### 2.3.4 Calor de reacción

Si tiene lugar una reacción química en un sistema, generalmente la temperatura del sistema antes y después de la reacción es distinta. Si el sistema aumenta la temperatura después de la reacción se dice que la reacción es exotérmica, en otras palabras, la reacción produjo calor. Por otro lado, cuando el sistema disminuye la temperatura después de la reacción se dice que la reacción es endotérmica, la reacción requirió calor del entorno para llevarse a cabo. (6)

En el caso de las reacciones de combustión todas ellas son exotérmicas y producen grandes cantidades de calor, que en el caso específico de hornos industriales, es aprovechado para calentar una corriente de proceso.

A continuación se presentan los cálculos del calor de reacción:

$$\text{DHR} = \text{Flujo} * \text{Poder calorífico} \quad (112)$$

Donde:

Flujo:	Flujo de entrada del combustible (kmol)
Poder calorífico:	Poder calorífico del combustible (kJ/kmol)
DHR:	Calor de reacción. (kJ)

### 2.3.5 Calor total

$$Q_{\text{max}} = \text{DH}_1 + \text{DH}_2 + \text{DH}_3 + \text{DHR} \quad (113)$$

## 2.4 Temperatura de flama adiabática

La temperatura de flama adiabática normalmente es muy alta, entre 1000 y 3000 K por lo que es muy importante utilizar capacidades caloríficas adecuados para estas temperaturas. Los valores de

capacidad calorífica utilizadas dentro del programa fueron proporcionados por el profesor Fernando Barragán Aroche del departamento de termodinámica aplicada del conjunto E de la Facultad de Química de la UNAM.

Para el cálculo de la entalpía fueron utilizados los siguientes valores de capacidad calorífica en kJ/gmol:

CPA1(1)=7.69*4.184/(1000)	(114)
CPA1(2)=6.8937*4.184/(1000)	(115)
CPA1(3)=6.0756*4.184/(1000)	(116)
CPA1(4)=5.3082*4.184/(1000)	(117)
CPB1(1)=0.0004586*4.184/(1000)	(118)
CPB1(2)=0.0003747*4.184/(1000)	(119)
CPB1(3)=0.0036529*4.184/(1000)	(120)
CPB1(4)=0.0142654*4.184/(1000)	(121)
CPC1(1)=0.0000025175*4.184/(1000)	(122)
CPC1(2)=0.0000019274*4.184/(1000)	(123)
CPC1(3)=0.0000017065*4.184/(1000)	(124)
CPC1(4)=0.0000083499*4.184/(1000)	(125)
CPD1(1)=0.0000000008575*4.184/(1000)	(126)
CPD1(2)=0.00000000068522*4.184/(1000)	(127)
CPD1(3)=0.0000000003129*4.184/(1000)	(128)
CPD1(4)=0.00000000178137*4.184/(1000)	(129)

1. H<sub>2</sub>O, 2. N<sub>2</sub>, 3. O<sub>2</sub>, 4. CO<sub>2</sub>

Para el cálculo de las fracciones mol de los componentes de gases de chimenea:

$$GCh = N_{H_2O}^* + N_{CO_2}^* + N_{SO_2}^* + N_{N_2}^* + O_{ex} + CO \quad (130)$$

$$x_{H_2O} = N_{H_2O}^* / GCh \quad (131)$$

$$x_{CO_2} = N_{CO}^* / GCh \quad (132)$$

$$x_{SO_2} = N_{SO_2}^* / GCh \quad (133)$$

$$x_{N_2} = N_{N_2}^* / GCh \quad (134)$$

$$x_{O_2} = O_{ex} / GCh \quad (135)$$

$$x_{CO} = CO / GCh \quad (136)$$

$$A_{Ch} = \sum x_i A_i \quad (137)$$

$$B_{Ch} = \sum x_i B_i \quad (138)$$

$$C_{Ch} = \sum x_i C_i \quad (139)$$

$$D_{Ch} = \sum x_i D_i$$

Para el cálculo de la temperatura de flama adiabática se itera la siguiente ecuación:

$$Q_{max} = A_{Ch} (T_{ad} - T_r) + \frac{B_{Ch}}{2} (T_{ad}^2 - T_r^2) + \frac{C_{Ch}}{3} (T_{ad}^3 - T_r^3) + \frac{D_{Ch}}{4} (T_{ad}^4 - T_r^4) \quad (140)$$

La iteración termina cuando:

$$|T(I+1) - T(I)| < 0.001$$

Donde:

GCh: Flujo de gases de chimenea (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>) (kmol)

x<sub>i</sub>: Fracción mol de los gases de chimenea.

A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, C<sub>i</sub> y D<sub>i</sub>: Coeficientes de capacidad calorífica de los componentes de los gases de chimenea (kJ/kmol K)

T: Temperatura de flama adiabática (K)

Q<sub>max</sub>: Calor máximo obtenido de la reacción mas el calor del combustible, del aire y del vapor o aire de atomización. (kJ)

## 2.5 Eficiencia

$$Q = [A_{Ch} (T_r - T_s) + \frac{B_{Ch}}{2} (T_r^2 - T_s^2) + \frac{C_{Ch}}{3} (T_r^3 - T_s^3) + \frac{D_{Ch}}{4} (T_r^4 - T_s^4)] - Q_{max} \quad (141)$$

$$EF = [ |Q| / |Q_{max}| ] * 100 \quad (142)$$

$$PE = 100 - EF \quad (143)$$

Donde:

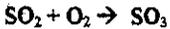
Q: Calor de los gases de chimenea (kJ)

EF: Eficiencia del horno (%)

PE: Pérdidas de calor (%)

## 2.6 Temperatura de rocío del SO<sub>3</sub>

El rocío ácido se da cuando la temperatura de los gases de chimenea se reduce hasta o por debajo de la temperatura de rocío del SO<sub>3</sub>. (7) Debido a la presencia de SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> hay formación de SO<sub>3</sub>. La cantidad formada es muy pequeña, sin embargo el SO<sub>3</sub> puede ocasionar problemas de corrosión en el precalentador de aire. Para evitar estos problemas de corrosión, dentro del programa se hace el cálculo de temperatura de rocío de SO<sub>3</sub>. Para obtener la temperatura de rocío es importante calcular la constante de equilibrio de reacción. La reacción es :



Constante de equilibrio:

$$A = \text{ASO}_3 - \text{ASO}_2 - 0.5 * \text{AO}_2 \quad (144)$$

$$B = \text{BSO}_3 - \text{BSO}_2 - 0.5 * \text{BO}_2 \quad (145)$$

$$C = \text{CSO}_3 - \text{CSO}_2 - 0.5 * \text{CO}_2 \quad (146)$$

$$D = \text{DSO}_3 - \text{DSO}_2 - 0.5 * \text{DO}_2 \quad (147)$$

$$\text{DH}_o = \text{DH}_{298} + A (T - T_o) + B/2 * (T^2 - T_o^2) + \dots \quad (148)$$

$$\text{DS}_o = \text{DS}_{298} + A * \ln (T/T_o) + B * (T - T_o) + C/2 * (T^2 - T_o^2) + \dots \quad (149)$$

$$\text{DG}_o = \text{DH}_o - T * \text{DS}_o \quad (150)$$

$$K = \exp (-\text{DG}_o/RT) \quad (151)$$

Donde:

A, B, C y D : Coeficientes de capacidad calorífica de los componentes involucrados en la reacción. (kJ / kmol K)

DH<sub>o</sub> : Entalpía de la mezcla de los componentes a la temperatura a la que se lleva acabo la reacción. (kJ / mol)

DS<sub>o</sub> : Entropía de la mezcla de componentes a la temperatura a la que se lleva acabo la reacción. (kJ / kmol K)

DG<sub>o</sub> : Energía libre de Gibbs de la mezcla de los componentes a la temperatura a la que se lleva acabo la reacción. (kJ / kmol)

K : Constante de equilibrio

T : Temperatura a la que se lleva acabo la reacción (K)

To : Temperatura de referencia (K)

Se supuso una temperatura para la reacción de 1000 K (referencia).

El cálculo de las moles producidas de SO<sub>3</sub> se realiza por medio de iteraciones :

$$FT(I) = 4 * MSO_3(I) * (1 - K * P) + P * K * O_{ex} + SO_2 * P * K - SO_2 - O_{EX} * 4 * MSO_3(I)^2 - (4 * SO_2 * O_{ex} + SO_2^2) * P * K * MSO_3(I) + K * P * O_{ex} * SO_2 \quad (152)$$

$$DFT(I) = 10 * MSO_3(I)^2 * (1 - K * P) + P * (K * O_{ex}) + SO_2 * P * K - SO_2 - 8 * MSO_3(I) * O_{ex} - P * K * (4 * SO_2 * O_{ex} + SO_2^2) \quad (153)$$

$$MSO_3(I+1) = MSO_3(I) - FT(I) / DFT(I) \quad (154)$$

La iteración termina cuando :

$$|MSO_3(I+1) - MSO_3(I)| < 0.001$$

Las moles restantes de SO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> :

$$MSO_2 = SO_2 - MSO_3 \quad (155)$$

$$O_2 = O_{ex} - \frac{MSO_3}{2} \quad (156)$$

$$H_2O = H_2OF + H_2O_{Amp} + AH_2O \quad (157)$$

Las moles de gases de chimenea son:

$$Tot = CO_2 + CO + O_2 + MSO_2 + MSO_3 + H_2O \quad (158)$$

La fracción mol de agua y SO<sub>3</sub> :

$$x_{H_2O} = \frac{H_2O}{Tot} \quad (159)$$

$$x_{SO_3} = \frac{SO_3}{Tot} \quad (160)$$

La temperatura de rocío se calcula :

$$TR_o = 203.25 + 27.6 * \ln(P * x_{H_2O}) + 10.83 * \ln(P * x_{SO_3}) + 1.06 * (\ln(P * x_{SO_3}) + 8)^{2.19}$$

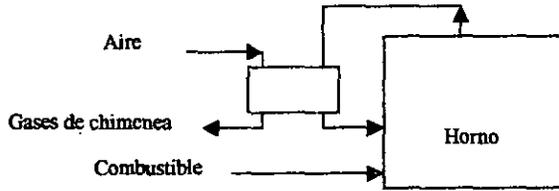
(7) Okkes, G. Get acid dew point of flue gas, Hydrocarbon Processing, July 1987.

Donde:

Tro : Temperatura de rocío del SO<sub>3</sub> (°C)

P : Presión atmosférica (atm)

## 2.7 Pre calentamiento de aire



En algunas ocasiones se utilizan intercambiadores de calor para el pre calentamiento de aire. En estos casos existe un aumento en la eficiencia del horno debido a que las pérdidas de calor por gases de chimenea disminuyen. La recuperación de calor de los gases de chimenea depende de la escala de la operación. Para hornos pequeños generalmente no es recomendable debido a que solamente son tratados unos cuantos kilogramos. Suponiendo que el volumen de operación lo aconseje la recuperación de calor puede efectuarse pre calentamiento del aire y en algunas ocasiones también del combustible. Sin embargo dentro del programa desarrollado solamente se consideró el pre calentamiento de aire como recuperación de calor. El pre calentamiento de aire repercute en la llama que se obtiene durante la combustión. En caso de requerir una llama larga y lenta de baja temperatura el pre calentamiento de aire no es recomendado. Es importante no disminuir la temperatura de los gases de chimenea por debajo de 100 °C si han de servir para accionar la chimenea. (1)

Esta rutina presenta dos distintas opciones para realizar el balance en el pre calentador. El objetivo de esta rutina es calcular la temperatura de entrada del gas o la temperatura de salida del aire del pre calentador según lo requerido por el usuario.

Caso número uno:

Datos: temperatura de entrada y salida de los gases de chimenea y temperatura de entrada del aire.

$$DH = (GCh * (A_{Ca} (T_{sg} - T_{eg}) + \frac{B_{Ca}}{2} (T_{sg}^2 - T_{eg}^2) + \frac{C_{Ca}}{3} (T_{sg}^3 - T_{eg}^3) + \frac{D_{Ca}}{4} (T_{sg}^4 - T_{eg}^4)) \quad (161)$$

$$x_{O_2} = O_2 / AT \quad (162)$$

$$x_{N_2} = N_2 / AT \quad (163)$$

$$x_{H_2O} = H_2O / AT \quad (164)$$

$$A_{\text{aire}} = \sum x_i A_i \quad (165)$$

$$B_{\text{aire}} = \sum x_i B_i \quad (166)$$

$$C_{\text{aire}} = \sum x_i C_i \quad (167)$$

$$D_{\text{aire}} = \sum x_i D_i \quad (168)$$

Iteración :

$$FT(I) = (AT * (A_{\text{aire}} (T_{\text{ea}} - T_{\text{sa}}(I)) + B_{\text{aire}}/2 (T_{\text{ea}}^2 - T_{\text{sa}}(I)^2) + C_{\text{aire}}/3 (T_{\text{ea}}^3 - T_{\text{sa}}(I)^3) + D_{\text{aire}}/4 (T_{\text{ea}}^4 - T_{\text{sa}}(I)^4)) - |DH| \quad (169)$$

$$DFT(I) = AT * (A_{\text{aire}} + B_{\text{aire}} * T_{\text{sa}}(I) + C_{\text{aire}} * T_{\text{sa}}(I)^2 + D_{\text{aire}} * T_{\text{sa}}(I)^3) \quad (170)$$

$$T_{\text{sa}}(I+1) = T_{\text{sa}}(I) - \frac{FT(I)}{DFT(I)} \quad (171)$$

La iteración termina cuando:

$$|T_{\text{sa}}(I+1) - T_{\text{sa}}(I)| < 0.001$$

Caso número dos:

Datos: Temperatura de entrada y de salida de los gases de chimenea y temperatura de entrada

$$DH = AT * (A_{\text{aire}} (T_{\text{sa}} - T_{\text{eg}}) + \frac{B_{\text{aire}}}{2} (T_{\text{sa}}^2 - T_{\text{eg}}^2) + \frac{C_{\text{aire}}}{3} (T_{\text{sa}}^3 - T_{\text{eg}}^3) + \frac{D_{\text{aire}}}{4} (T_{\text{sa}}^4 - T_{\text{eg}}^4)) \quad (172)$$

Iteración :

$$FT(I) = (GCh * (A_{\text{ch}} (T_{\text{sg}} - T_{\text{eg}}(I)) + B_{\text{ch}}/2 (T_{\text{sg}}^2 - T_{\text{eg}}(I)^2) + C_{\text{ch}}/3 (T_{\text{sg}}^3 - T_{\text{eg}}(I)^3) + D_{\text{ch}}/4 (T_{\text{sg}}^4 - T_{\text{eg}}(I)^4)) - |DH| \quad (173)$$

$$DFT(I) = GCh (A_{\text{ch}} + B_{\text{ch}} * T_{\text{eg}}(I) + C_{\text{ch}} * T_{\text{eg}}(I)^2 + D_{\text{ch}} * T_{\text{eg}}(I)^3) \quad (174)$$

$$Teg(I+1) = Teg(I) - \frac{FT(I)}{DFT(I)} \quad (175)$$

La iteración termina cuando:

$$|Teg(I+1) - Teg(I)| < 0.001$$

Donde :

- Te : Temperatura de entrada de gases de chimenea (K)
- Tse : Temperatura de salida de gases de chimenea (K)
- Tea : Temperatura de entrada del aire (K)
- Tsa : Temperatura de salida del aire (K)
- $A_{Cb}$ ,  $B_{Cb}$ ,  $C_{Cb}$  y  $D_{Cb}$  : Coeficientes para calcular el PC de los gases de chimenea (kJ/mol K)
- $A_{Ai}$ ,  $B_{Ai}$ ,  $C_{Ai}$  y  $D_{Ai}$  : Coeficientes para calcular el Cp del aire (kJ/kmol K)
- DH : Calor cedido por los gases de chimenea al aire o viceversa según sea el caso (kJ)

## 2.8 Humedad

El cálculo de humedad es requerido en cálculo de la humedad del aire o del aire de atomización. La humedad del aire o del aire de atomización puede calcularse a teniendo como dato la humedad absoluta, la humedad relativa o de la temperatura de bulbo húmedo.

### Humedad Absoluta

$$\ln P_{\text{vap}} = A - \frac{B}{C+T_e} \quad (176)$$

$$A = 12.0484$$

$$B = 4030.182$$

$$C = -38.15$$

$$P_{\text{vap}} = \exp(\ln P_{\text{vap}}) \quad (177)$$

$$y_{\text{SAT}} = P_{\text{vap}} / (P - P_{\text{vap}}) \quad (178)$$

$$y_{\text{H}_2\text{O}} = y_{\text{SAT}} \quad (179)$$

Dónde :

- A, B y C: Ctes. de Antoine  
T<sub>e</sub>: Temperatura de entrada del aire o vapor (K)  
P<sub>vap</sub>: Presión de vapor (atm)  
P: Presión de entrada del aire o vapor (atm)  
y<sub>sat</sub>: Humedad de saturación

### Humedad Relativa:

La P<sub>sat</sub> se calcula nuevamente con la ecuación de Antoine como el caso de humedad absoluta.

$$P_{\text{vap}} = P_{\text{sat}} * \frac{HR}{100} \quad (180)$$

$$y_{\text{H}_2\text{O}} = P_{\text{vap}} / (P - P_{\text{vap}}) \quad (181)$$

Temperatura de bulbo húmedo (8) :

$$h_c (t - t_w) = k_g \lambda (p_s - p) \quad (182)$$

$$h_c/k_g = 0.294 (\mu/\rho D_v)^{0.56} \quad (183)$$

$h_c$  : coeficientes de transmisión de calor por convección BTU/(h ft<sup>2</sup> °F)

$k_g$  : coeficiente de transferencia de masa (lb/hr ft<sup>2</sup> atm)

$t$  : temperatura del aire (°F)

$t_w$  : temperatura de bulbo húmedo (°F)

$\lambda$  : calor latente de vaporización (BTU/lb)

$p$  : presión parcial del vapor de agua en el ambiente (atm)

$p_s$  : presión de vapor del agua a temperatura de bulbo húmedo (atm)

## 2.9 Atomización

$$\text{Vap} = \text{Rel} * \text{Base} \quad (184)$$

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{Aap}} = \text{Vap} * y_{\text{H}_2\text{O}} \quad (185)$$

Donde:

Rel : Relación de vapor o aire respecto al combustible (kmol vapor / kmol combustible)

Base: Combustible (kmol)

Vap : Vapor o aire de atomización (kmol)

H<sub>2</sub>O<sub>Aap</sub>: Agua que entra con el aire de atomización (kmol)

## Capítulo 3

### Estructura del programa

#### 3.1 Introducción

El programa fue elaborado para el cálculo de eficiencias en hornos industriales a partir de distintos tipos de datos alimentados en él. El programa consta de dos programas principales, uno realizado en Visual Basic como interfase con el usuario y el otro fue codificado en Visual Fortran para la realización de los cálculos.

La estructura general del programa se ilustra en el siguiente diagrama:

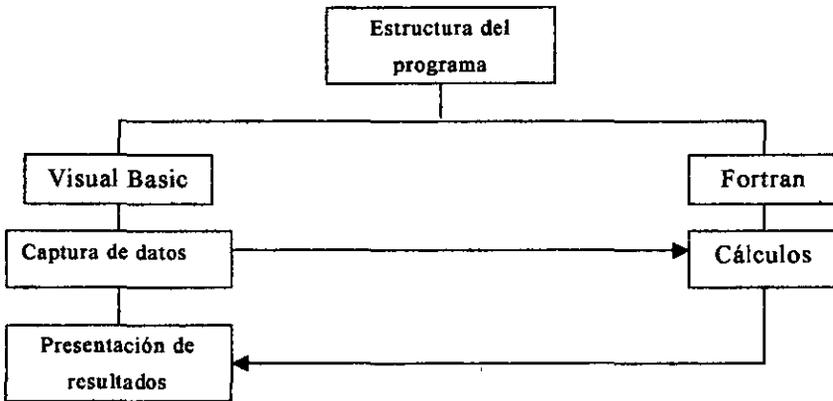


Diagrama 3.1

El usuario tiene contacto únicamente con Visual Basic lo que simplifica el uso del programa. La diferencia entre los cálculos se da a partir de la distinción del manejo de combustibles dependiendo de los datos de los que el usuario dispone.

A continuación se presentara mas detalladamente el manejo de los combustibles dentro del programa.

### 3.2 Manejo de combustibles

En los procesos industriales existen limitaciones para la obtención de datos requeridos para realizar cálculos. Por esta razón el programa fue elaborado de manera que se puedan realizar los cálculos a partir de las variables que normalmente se miden dentro del proceso.

El programa cuenta con cuatro principales subrutinas:

1. Combustible y su composición
2. Análisis Orsat y flujo de gases de chimenea
3. Análisis Orsat y flujo de combustible
4. Análisis Orsat y calor cedido a la corriente de proceso

El programa fue realizado en dos distintos lenguajes de programación; Visual Basic 4 y Visual Fortran 5. Visual Basic es un sistema de desarrollo diseñado especialmente para crear aplicaciones con interfaz gráfica. La interfaz gráfica es un mecanismo de comunicación entre el usuario y la aplicación que permite trabajar en un ambiente Windows haciendo el programa amigable y sencillo de usar.

Visual Basic fue utilizado en este programa para la captura de datos y la entrega de resultados al usuario, de manera que el usuario solo ve la aplicación Visual Basic.

La mayoría de los cálculos son realizados en Visual Fortran ya que es una herramienta mucho más poderosa que Visual Basic en cuanto a la realización de cálculos matemáticos, sin embargo Visual Fortran carece del ambiente amigable de Visual Basic. Algunos cálculos sencillos son realizados en Visual Basic como la transformación de las unidades de los datos introducidos por el usuario. Las unidades se cambian a las unidades en las tablas que están en negritas.

### 3.3 Datos

La introducción de datos se divide en dos partes, la primera abarca los datos de los combustibles y la segunda parte incluye los datos del aire. Primero se describirá la estructura de datos de combustibles seguida por la de los datos del aire.

#### 3.3.1 Combustibles

En el siguiente diagrama se simplifica la estructura del manejo de los datos de los combustibles.

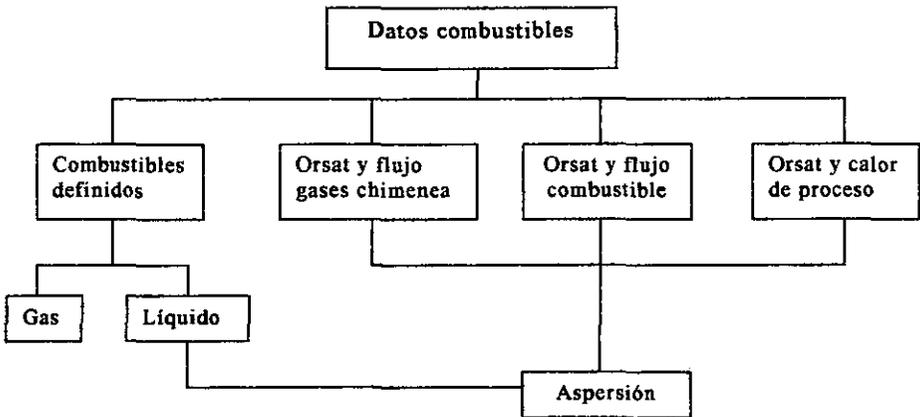


Diagrama 3.2

Como se puede apreciar existen cuatro distintas opciones para introducir los datos del combustible. En realidad los datos del análisis Orsat no son datos del combustible directamente sino de los gases de chimenea, sin embargo son llamados datos de combustible ya que de manera indirecta proporcionan datos de la composición del combustible.

La subrutina de combustibles definidos es aquella en la que los datos del combustible se proporcionan directamente y las características del combustible que

son posibles de medir varían dependiendo del estado físico de este, por lo que se proporciona la opción de introducir datos de combustibles líquidos o gaseosos. Se utiliza aspersión únicamente para combustibles líquidos por lo que se ve en el diagrama que este está excluida para gases.

A continuación se dará una descripción de los datos requeridos por cada una de las opciones utilizadas para captar los datos de los combustibles.

### 3.2.1.1 Combustibles Definidos

En la subrutina "Combustibles definidos" el cálculo de la eficiencia del horno se realiza a partir de los datos de composición de los combustibles utilizados. Esta subrutina permite realizar el cálculo de eficiencia en caso de que sean utilizados distintos combustibles dentro del horno, los combustibles pueden definirse en estado líquido o gaseoso. Se hace la distinción entre combustibles líquidos o gaseosos ya que la composición de ambos se define de manera distinta.

Normalmente para combustibles líquidos se cuenta con la relación molar o mástica carbono/hidrogeno y en el caso de combustibles gaseosos se dispone del porcentaje en volumen o en peso de cada uno de los componentes. La descripción detallada de los cálculos se describe en el capítulo siguiente y los diagramas de flujo del programa se encuentran en el Anexo I.

Los primeros datos requeridos en la subrutina "Combustibles definidos" son los siguientes:

Datos	Unidades
Número de combustibles	-----
% de aire en exceso	-----
Presión de operación del horno	<b>bar, atm, mmHg, kg/cm<sup>2</sup>, Pa, psi</b>

Tabla 3.1

Nota: Las unidades en negritas son las unidades en las que se realizan los cálculos dentro del programa.

Una vez introducidos estos datos se pasa a la ventana siguiente donde se pide especificar el estado de materia del combustible, ya sea líquido o gaseoso (Diagrama 3.2).

Una vez definido el estado de materia del combustible a definir se pasa a la siguiente ventana donde se introducen los datos del mismo. El programa permite la introducción de datos en distintas unidades. En caso de gases los datos requeridos son los siguientes:

Dato	Unidades
Flujo combustible	<b>kmol</b> , lbmol, kg, lb, g, m <sup>3</sup> , cm <sup>3</sup> , ft <sup>3</sup> , L
Densidad combustible	<b>Kg/cm<sup>3</sup></b> , g/cm <sup>3</sup> , lb/ft <sup>3</sup> , <b>kg/m<sup>3</sup></b>
Poder calorífico	<b>kJ/kmol</b> , kcal/kmol, BTU/lbmol, kJ/kg, BTU/lb, cal/g, cal/lb, kcal/kg, kJ/m <sup>3</sup> , BTU/ft <sup>3</sup> , cal/mL, kcal/m <sup>3</sup>
Temperatura de entrada	<b>K</b> , C, F

Tabla 3.2

Nota: Las unidades en negritas son las unidades en las que se realizan los cálculos dentro del programa.

El programa cuenta con una base de datos de los componentes más comunes dentro de los combustibles gaseosos (Tabla 3.3). El usuario elige los componentes del combustible e introduce la composición de estos dentro del combustible. La base de datos contiene datos de calor específico, peso molecular, densidad, número de átomos de carbón, hidrógenos y azufre. El peso molecular y el calor específico del combustible son calculados a partir de la base de datos, los componentes seleccionados y su composición.

La información contenida dentro de la base de datos es la siguiente:

$$C_p = A + \frac{B \cdot 10^{-3}}{2} T^2 + \frac{C \cdot 10^{-4}}{3} T^3 + \frac{D \cdot 10^{-8}}{4} T^4$$

Donde el  $C_p$  está en kJ/mol K

Componentes	PM	A	B	C	D
CH <sub>4</sub>	16	34.31	5.469	-0.0366	-9
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	49.37	13.92	-0.5816	0.728
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	68	22.59	-1.311	3.171
nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	92.3	27.88	-1.547	3.498
iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	89.46	30.13	-1.891	4.987
nC <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	114.8	34.09	-1.899	4.226
nC <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86	137.44	40.85	-2.392	5.766
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28	40.75	11.47	-6.891	1.766
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42	59.58	17.71	-1.017	2.46
iC <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56	82.88	25.64	-1.727	5.05
H <sub>2</sub>	2	22.71	3.39	-----	-----
S <sub>2</sub>	64	35.92	1.256	-----	-----

Tabla 3.3

A, B, C y D son los coeficientes de la capacidad calorífica en kJ/mol K. El CO<sub>2</sub> no está incluido dentro de la lista por que el CO<sub>2</sub> se introduce aparte para facilitar la programación de los cálculos. La composición de los componentes puede ser introducida en porcentaje mol, porcentaje volumen o porcentaje peso.

Una vez introducidos los datos y en caso de que exista otro combustible se regresa a la opción para definir el siguiente combustible ya sea en fase líquida o gaseosa. Es posible introducir hasta 10 combustibles, pero normalmente solo se utiliza uno o dos combustibles.

En el caso de que el combustible a definir sea un líquido los datos requeridos son los siguientes:

<b>Dato</b>	<b>Unidades</b>
Flujo de combustible	<b>kg, lb, g, m<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, ft<sup>3</sup>, L</b>
Relación C/H	<b>Moles C/moles H</b>
Poder calorífico	<b>kJ/kg, BTU/lb, cal/g, cal/lb, kcal/kg, kJ/m<sup>3</sup>, BTU/ft<sup>3</sup>, cal/mL, kcal/m<sup>3</sup></b>
Densidad	<b>kg/cm<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>, lb/ft<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup></b>
Concentración de azufre	<b>% peso, % volumen</b>
Calor específico	<b>kJ/kg K, BTU/lb °F, cal/g K, cal/lb K, kcal/kg K</b>
Temperatura de entrada	<b>K, °C, °F</b>

Tabla 3.4

Nota: Las unidades en negritas son las unidades en las que se realizan los cálculos dentro del programa.

### 2.3.1.2 Subrutinas basadas en el análisis Orsat

Estas subrutinas realizan el cálculo de la eficiencia a partir del análisis Orsat de los gases de chimenea y uno de los siguientes datos:

1. Flujo de gases de chimenea
2. Flujo de combustible
3. Calor que se lleva la corriente de proceso

En el caso del análisis Orsat no se hace la distinción entre el uso de combustibles líquidos o gaseosos, sin embargo se da la opción de introducir datos de vapor o aire de aspersión en caso de que el combustible utilizado se encuentre en fase líquida.

Las tres subrutinas que incluyen el análisis Orsat comparten los siguientes datos: El análisis Orsat en porcentaje mol, porcentaje peso o partes por millón (ppm) de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, además de los datos presentes en la siguiente tabla:

<b>Dato</b>	<b>Unidades</b>
Poder calorífico	<b>kJ/kmol</b> , kcal/kmol, BTU/lbmol, kJ/kg, BTU/lb, cal/g, cal/lb, kcal/kg, kJ/m <sup>3</sup> , BTU/ft <sup>3</sup> , cal/mL, kcal/m <sup>3</sup>
Densidad	<b>kg/cm<sup>3</sup></b> , g/cm <sup>3</sup> , lb/ft <sup>3</sup> , <b>kg/m<sup>3</sup></b>
Presión de operación	<b>bar</b> , atm, mmHg, kg/cm <sup>2</sup> , Pa, psi
Capacidad Calorífica	<b>kJ/kg K</b> , BTU/lb °F, cal/g K, cal/lb K, kcal/kg K
Temperatura de entrada	<b>K</b> , °C, °F

Tabla 3.5

Nota: Las unidades en negritas son las unidades en las que se realizan los cálculos dentro del programa.

En el caso de análisis Orsat y flujo de gases de chimenea se requiere el flujo de gases de chimenea en las siguientes unidades: **kmol**, lbmol, kg, lb, g, m<sup>3</sup>, cm<sup>3</sup>, ft<sup>3</sup>, L.

En el caso de análisis Orsat y flujo de combustible los dos datos extras son peso molecular del componente y el flujo de combustible con las mismas unidades que en el caso anterior.

La última subrutina se basa en el análisis Orsat y el calor que se lleva la corriente de proceso la cual incluye dos datos extras; el peso molecular y el calor que se lleva la corriente de proceso el cual es posible de introducir en las siguientes unidades: **kJ**, BTU, cal, kcal.

3.3.1.3 *Datos de vapor de aspersión*

En caso de que el combustible a definir sea líquido o en el caso de las subrutinas basadas en el análisis Orsat se presenta la opción de definir datos para el vapor o aire de atomización. Si no se define la existencia de vapor o aire de atomización el programa considera automáticamente que no fue utilizado vapor de atomización para la aspersión del combustible.

En caso de que se seleccione la existencia de vapor de atomización aparece una ventana que requiere la relación de flujo vapor de atomización/combustible. En el caso de aire de atomización además de pedir la relación aire/combustible se piden los siguientes datos para calcular la humedad del aire. Existen tres posibilidades para calcular la humedad del aire:

1. Humedad absoluta
2. Humedad relativa
3. Temperatura de bulbo húmedo

Los datos requeridos para cada una de las anteriores opciones son:

Humedad absoluta

Dato	Unidades
Presión de entrada del vapor	bar, atm, mmHg, kg/cm <sup>2</sup> , Pa, psi
Temperatura de entrada del vapor	K, °C, °F

Tabla 3.6

Humedad relativa

Dato	Unidades
Humedad relativa	%
Presión de entrada del vapor	bar, atm, mmHg, kg/cm <sup>2</sup> , Pa, psi
Presión de saturación del vapor	bar, atm, mmHg, kg/cm <sup>2</sup> , Pa, psi
Temperatura de entrada del vapor	K, °C, °F

Tabla 3.7

Temperatura de bulbo húmedo

Dato	Unidades
Temperatura de entrada del vapor	K, °C, °F
Temperatura de bulbo húmedo	K, °C, °F
Presión de saturación del vapor	<b>bar</b> , atm, mmHg, kg/cm <sup>2</sup> , Pa, psi
Calor latente de vaporización	<b>kJ</b> , J, BTU, kcal, cal

Tabla 3.8

Nota: Las unidades en negritas son las unidades en las que se realizan los cálculos dentro del programa.

3.3.2 Aire

En el siguiente diagrama se muestra la estructura del manejo de los datos del aire.

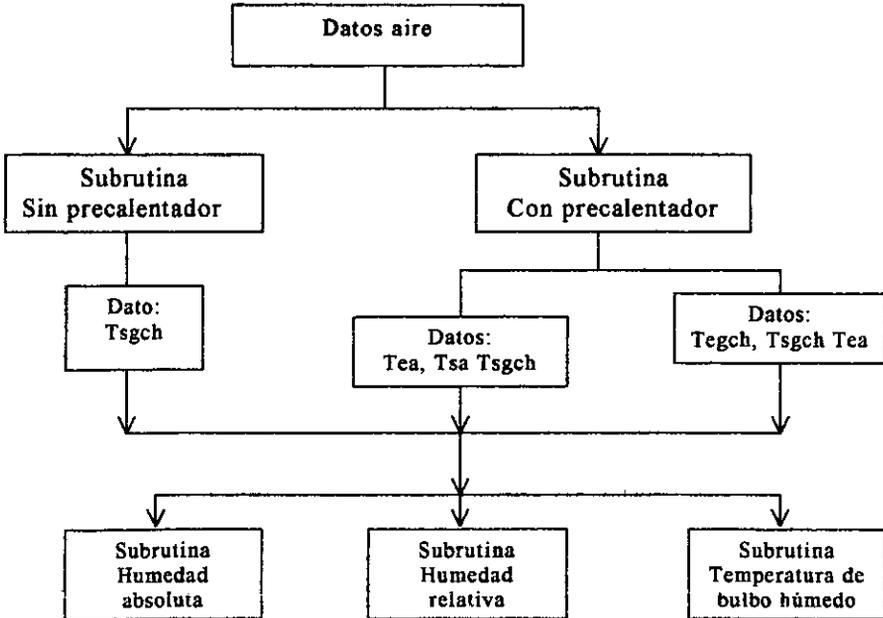


Diagrama 3.3

**Donde:**

**Tegch:** Temperatura de entrada de gases de chimenea al precalentador

**Tsgch:** Temperatura de salida de gases de chimenea del precalentador

**Tea:** Temperatura de entrada del aire al precalentador

**Tsa:** Temperatura de salida del aire del precalentador

En el diagrama anterior se muestran las opciones del uso o no de precalentamiento de aire. En el caso en el que no se usa precalentador de aire la única temperatura requerida es la de los gases de chimenea. En caso de usar precalentamiento de aire se tienen dos opciones, ya sea que se tengan ambas temperaturas del lado del aire y una del lado del gas o viceversa.

En ambos casos, con o sin precalentamiento de aire se requieren datos para el cálculo de la humedad de este.

Los datos requeridos para el cálculo de humedad son los mismos que en el caso de aire de aspersión.

## Capítulo 4

### Validación de los algoritmos

#### 4.1 Introducción

Validación se entiende como la comparación de resultados obtenidos por medio de cálculos teóricos con los datos medidos directamente en el proceso. También es posible hacer la comparación con resultados teóricos anteriormente validados. De esta manera es posible asegurar que el análisis teórico en el cual esta basado el programa describe de manera aceptable lo que sucede en realidad dentro del proceso.

En el caso del programa desarrollado en la presente tesis los datos de validación fueron proporcionados por el Ing. José Antonio Ortiz Ramírez, profesor en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los valores se refieren a hornos diseñados para la planta de Cadereita de Pemex Refinería.

Se tomaron datos de tres hornos, dos de ellos diseñados para quemar fuel oil y el tercero utiliza gas oil.

#### 4.2 Datos

##### 4.2.1 Fuel oil 1

A continuación se presentan los datos correspondientes al primer horno que trabaja con fuel oil. Los datos se presentan con y sin el uso de precalentador de aire.

Dato	Sin precalentador	Con precalentador
Exceso de aire (%)	20	10
Eficiencia térmica (%)	80.2	90.3
Temperatura gases de chimenea (°C)	390	191
Temp. de entrada del aire (°C)	13	
Altitud sobre el nivel del mar (m)	327	

Datos del combustible:

Poder calorífico (kcal/kg)	9583
Presión del quemador (kg/cm <sup>2</sup> g)	10
Temp. de entrada al quemador (C)	95
$\mu$ (55f) @ 50/100 C	524/33
Cp (cal/g C)	0.465
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.96

Datos de composición del combustible :

Composición (% peso)

Sulfuro	3.7
Ash	0.052
V(ppm)	370
Fe (ppm)	1.2
Ni (ppm)	102
Na (ppm)	0.75

Datos precalentador de aire

Aire:

Flujo (kg/h)	25 130
Te ( C)	52
Ts ( C)	300

Gas:

Flujo (kg/h)	27 098
Te ( C)	396
Ts ( C)	191

#### 4.2.2 Fuel oil 2

En la siguiente tabla se presentan los datos de diseño del segundo horno que opera con fuel oil.

Dato	Sin precalentador	Con precalentador
Exceso de aire (%)	20	10
Eficiencia térmica (%)	78.8	90.3
Temperatura gases de chimenea (C)	418	191
Temp. de entrada del aire ( C)	13	
Altitud sobre el nivel del mar (m)	327	

#### Datos del combustible

Poder calorífico (kcal/kg)	9583
Presión del quemador (kg/cm <sup>2</sup> g)	10
Temp. de entrada al quemador (C)	95
$\mu$ (55f) @ 50/100 C	524/33
Cp (cal/g C)	0.465
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.96

#### Composición del combustible:

(% peso)

Sulfuro	3.7
Ash	0.052
V(ppm)	370
Fe (ppm)	1.2
Ni (ppm)	102
Na (ppm)	0.75

### Datos precalentador de aire

Aire:

Flujo (kg/h)	25 823
Te ( C)	52
Ts ( C)	328

Gas:

Flujo (kg/h)	27 851
Te ( C)	418
Ts ( C)	191

### Datos de composición del combustible (9):

(% peso)

C	83.8
H	11.3
N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1.1
S	3.8

La relación carbón/hidrógeno fue calculada de la siguiente manera:

Suponiendo 100 kg

$$c/h = \frac{83.8/12}{11.3/1}$$

$$c/h = 0.618$$

#### 4.2.3 Fuel gas

A continuación se muestran los datos de diseño para el horno que utiliza gas oil como combustible. En este caso el horno fue diseñado únicamente para usarse sin precalentador de aire.

Dato	Sin precalentador
Exceso de aire (%)	15
Eficiencia térmica (%) (LHV)	89.3
Temperatura gases de chimenea (C)	201

### Datos del combustible

Poder calorífico (kcal/m <sup>3</sup> )	9000
Presión de operación (kg/cm <sup>2</sup> g)	4.5
Temp. de entrada al quemador (C)	Ambiente
Gravedad específica (aire = 1)	0.63

### Composición del combustible:

(% volumen)

CO <sub>2</sub>	0.2
H <sub>2</sub>	52.2
C <sub>1</sub>	22.6
C <sub>2</sub> =	4.7
C <sub>2</sub>	6.7
C <sub>3</sub> =	0.6
C <sub>3</sub>	4.9
iC <sub>4</sub>	1.4
nC <sub>4</sub>	2
iC <sub>5</sub>	1.1
nC <sub>5</sub>	0.5

Densidad gas = 0.8111 kg/m<sup>3</sup> (10)

### 4.3 Resultados del programa

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las cuatro distintas subrutinas aplicadas a cada uno de los casos anteriores. La composición de los gases de chimenea no fue un dato proporcionado, sino que al realizar los cálculos a partir de los combustibles definidos se obtuvo la composición de los gases de chimenea lo que fue alimentado como dato para las subrutinas basadas en el análisis Orsat. La composición de gases de chimenea dada por

el programa se encuentra en base húmeda y se calculo nuevamente en base seca para alimentar los datos a las subrutinas basadas en el análisis Orsat ya que este se da en base seca.

Los datos anteriormente presentados fueron alimentados a cada una de las subrutinas del programa. En la siguiente tabla es posible comparar los resultados obtenidos por las distintas subrutinas y a su vez es posible compararlos con los datos de validación.

La temperatura adiabática no es un cálculo presentado como dato de diseño. La temperatura adiabática de flama es un cálculo puramente teórico, no es posible medirla directamente del proceso.

La temperatura de rocío tampoco es un cálculo típico para el diseño de hornos.

#### 4.3.1 Fuel Oil 1

Sin precalentador

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos al introducir los datos para el primer horno que opera con fuel oil y no utiliza precalentador de aire. De los resultados obtenidos es posible únicamente comparar con datos de validación el cálculo de la eficiencia térmica del horno. Los resultados son aproximados al dato de validación.

	Combustibles definidos	Orsat y flujo gases chimenea	Orsat y flujo combustible	Orsat y calor de corriente de proceso	Datos de validación
T adiab.(K)	2120	2129	2129	2129	
Eficiencia (%)	80.3	80.5	80.5	80.5	80.2
T rocío SO <sub>3</sub> (K)	167	167	168	168	

**Composición gases de chimenea (%mol)**

La composición de los gases de chimenea en base húmeda se obtiene únicamente para el caso de la subrutina "Combustibles definidos". La composición en base seca se obtiene a partir de la que esta en base húmeda y esta composición en base seca es la alimentada a las subrutinas basadas en el análisis Orsat.

	Base húmeda	Base seca
H <sub>2</sub> O	10.58	-----
CO <sub>2</sub>	11.67	13.05
N <sub>2</sub>	74.27	83.57
O <sub>2</sub>	3.29	3.68
SO <sub>2</sub>	0.158	0.20
SO <sub>3</sub>	0.0312	0.04
Flujo (kmol)	60.8	

**Con precalentador**

En este caso se presentan los resultados para el mismo hornos pero usando precalentador de aire.

	Combustibles definidos	Orsat y flujo gases chimenea	Orsat y flujo combustible	Orsat y calor de corriente de proceso	Datos de validación
T adiab.(K)	2220	2268	2271	2271	
Eficiencia (%)	89.7	91.5	91.5	91.5	90.3
T rocío SO <sub>3</sub> (K)	174	167	169	169	
T entrada gas precal. (K)	694	693	693	693	669.15

### Composición gases de chimenea (%mol)

Se obtiene y se utiliza de la misma forma que en el caso anterior.

	Base húmeda	Base seca
H <sub>2</sub> O	21.51	----
CO <sub>2</sub>	11.22	14.30
N <sub>2</sub>	65.50	83.44
O <sub>2</sub>	1.58	2.02
SO <sub>2</sub>	0.15	0.23
SO <sub>3</sub>	0.03	0.045
Flujo (kmol)	63.2	

#### 4.3.2 Fuel Oil 2

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el horno 2 que trabaja con fuel oil al igual que el anterior.

Sin precalentador

La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos por las distintas subrutinas para el horno dos cuando no se utiliza precalentamiento de aire.

	Combustibles definidos	Orsat y flujo gases chimenea	Orsat y flujo combustible	Orsat y calor de corriente de proceso	Datos de validación
T adiab.(K)	2120	2129	2129	2129	
Eficiencia (%)	78.9	79.1	79.1	79.1	78.8
T rocío SO <sub>3</sub> (K)	167	167	167	167	

Composición gases de chimenea (%mol)

	Base húmeda	Base seca
H <sub>2</sub> O	11	-----
CO <sub>2</sub>	11.6	13
N <sub>2</sub>	74.2	83.1
O <sub>2</sub>	3.3	3.7
SO <sub>2</sub>	0.16	0.2
SO <sub>3</sub>	0.03	0.04
Flujo (kmol)	61.1	

Con precalentador

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el mismo horno pero en esta ocasión usando precalentador de aire

	Combustibles definidos	Orsat y flujo gases chimenea	Orsat y flujo combustible	Orsat y calor de corriente de proceso	Datos de validación
T adiab.(K)	2241	2260	2260	2260	
Eficiencia (%)	89.7	91.6	91.6	91.6	90.3
T rocío SO <sub>3</sub> (K)	175	168	168	168	
T entrada gas precal. (K)	721	720	720	720	691.15

Composición gases de chimenea (%mol)

	Base húmeda	Base seca
H <sub>2</sub> O	21.51	----
CO <sub>2</sub>	11.22	14.30
N <sub>2</sub>	65.50	83.44
O <sub>2</sub>	1.58	2.02
SO <sub>2</sub>	0.15	0.23
SO <sub>3</sub>	0.03	0.045
Flujo (kmol)	63.2	

### 4.3.3 Fuel Gas

A continuación se presentan los resultados calculados para el horno que opera con gas oil. En este caso los datos de validación son únicamente para el caso que no se utiliza precalentamiento de aire.

	Combustibles definidos	Orsat y flujo gases chimenea	Orsat y flujo combustible	Orsat y calor de corriente de proceso	Datos de validación
T adiab.(K)	1730	1877	1877	1877	
Eficiencia (%)	89.3	90.3	90.3	90.3	89.3

#### Composición gases de chimenea (%mol)

	Base húmeda	Base seca
H <sub>2</sub> O	21.3	-----
CO <sub>2</sub>	6.8	8.7
N <sub>2</sub>	69.5	88.3
O <sub>2</sub>	2.4	3.1
Flujo (kmol)	90.8	

## 4.4 Conclusiones

El cálculo de eficiencias de hornos industriales es un cálculo sencillo, sin embargo consume tiempo. La intención del programa es proporcionar una herramienta de cálculo que sirva como apoyo para el diseño y el control de un horno industrial.

Los resultados del programa demuestran que el programa puede ser utilizado, el porcentaje de error en cada una de las rutinas es muy pequeño.

El programa se desarrolla en un ambiente Windows facilitando su uso. El cálculo es rápido y da resultados confiables.

El programa puede ser utilizado para el diseño de hornos al proporcionar la temperatura de flama adiabática que resulta indispensable para la elección del material, el espacio y dimensiones de los tubos que llevan la corriente de proceso. La temperatura de rocío de  $\text{SO}_3$  es un cálculo útil a partir del cual es posible determinar la eficiencia máxima que podrá tener el horno con un combustible determinado. También es útil para el diseño del precalentador de aire ya que los gases de chimenea no deberán estar por debajo de la temperatura de rocío del  $\text{SO}_3$  para evitar corrosión.

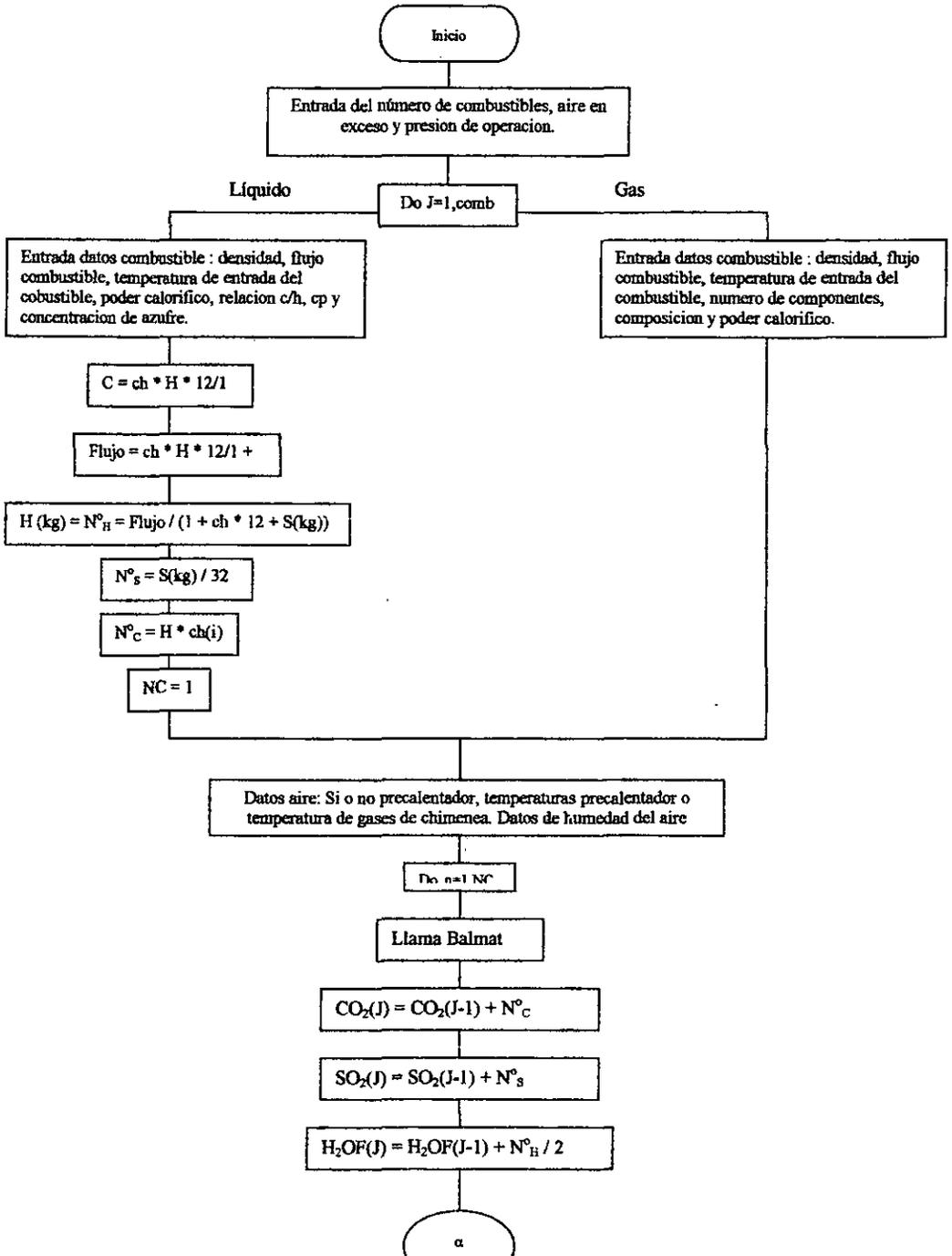
Las distintas subrutinas Orsat nos dan la posibilidad de establecer ciertos parámetros como son el flujo de combustible, el flujo de gases de chimenea o el calor que se desea producir que resulta de gran utilidad como simulación del proceso para el diseño del horno.

Algunas mejoras podrían ser añadidas al programa para hacerlo aun más amigable, como que fuera posible imprimir los resultados o guardar datos de hornos en la memoria, o añadir una opción en el menú para ayuda al usuario. El programa también podría ser integrado a un programa mayor de simulación de procesos.

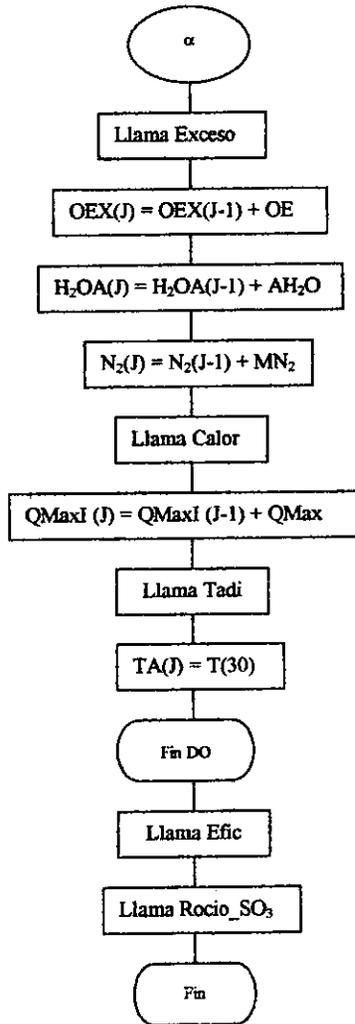
## *Anexo I*

### **Diagramas de flujo**

**Subrutina "Combustibles Definidos"**  
 Calcula temperatura adiabática, eficiencia del horno y temperatura de rocío de SO<sub>2</sub>

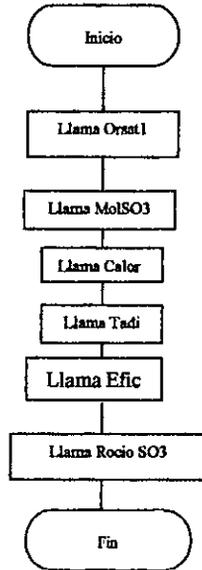


**"Combustibles Definidos"**  
Continuación



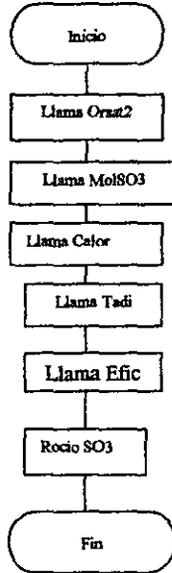
## Orsat y flujo de gases de chimenea

Datos: Poder calorífico, flujo de gases de chimenea y análisis Orsat.



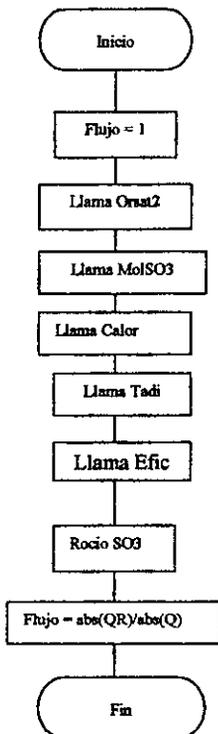
## Orsat y flujo de combustible

Datos: Análisis Orsat, flujo de combustible y poder calorífico

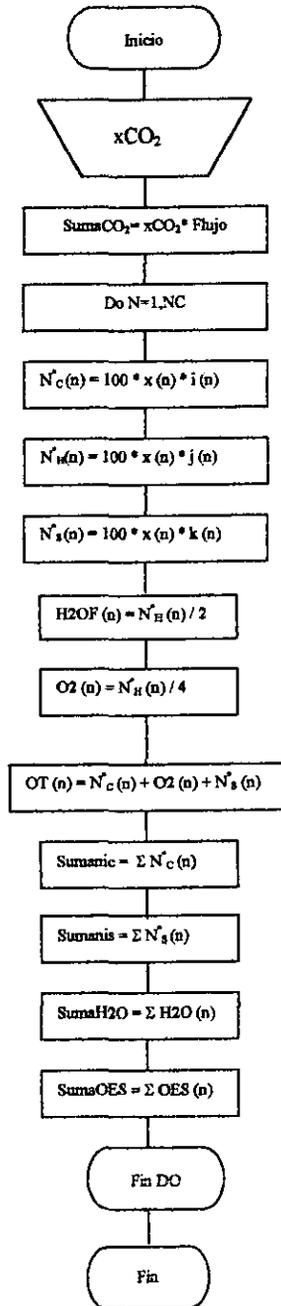


### Orsat y calor de proceso

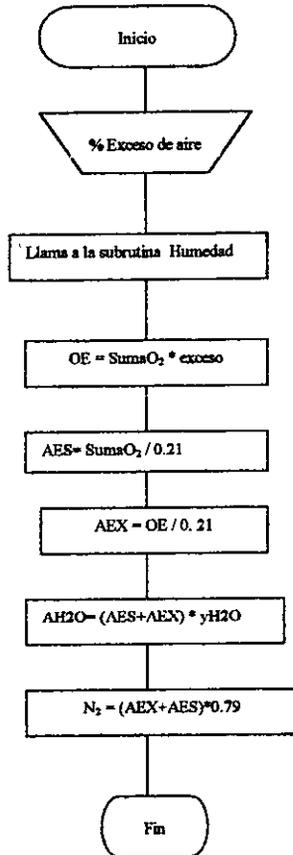
Datos: Análisis Orsat, poder calorífico y calor que se va en la corriente de proceso



**Subrutina Balmat**  
**Calcula el balance de materia**

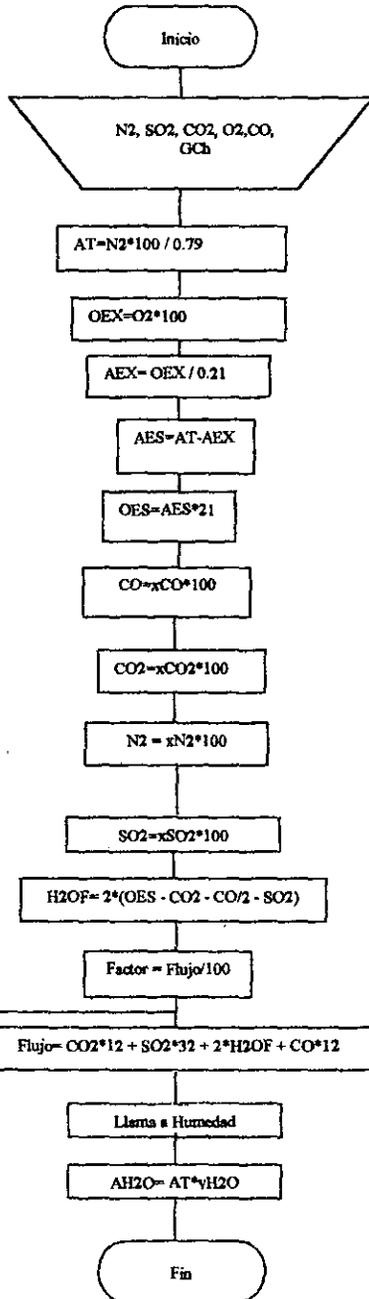


**Subrutina Exceso**  
**Calcula el aire en exceso**



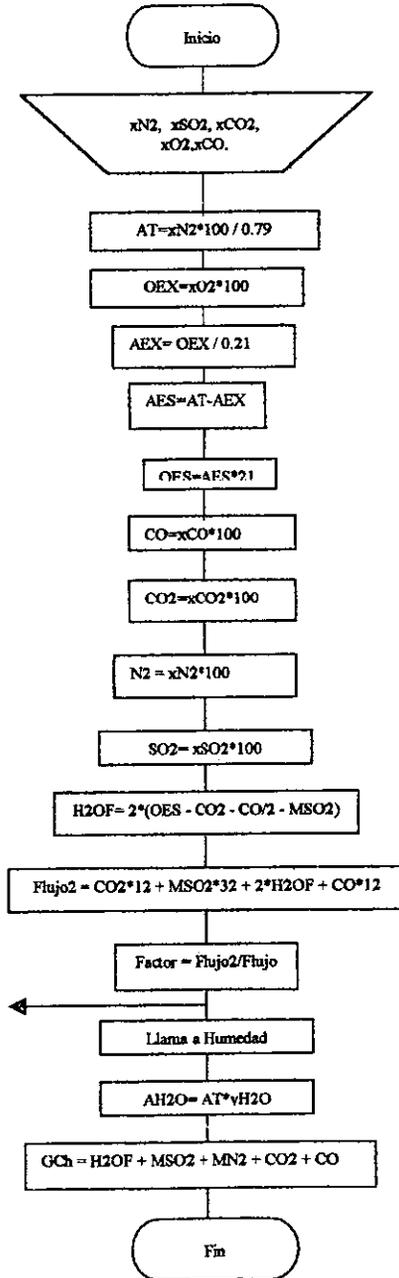
### Subrutina Orsat

Calcula el balance de materia a partir del análisis Orsat y el flujo de gases de chimenea.



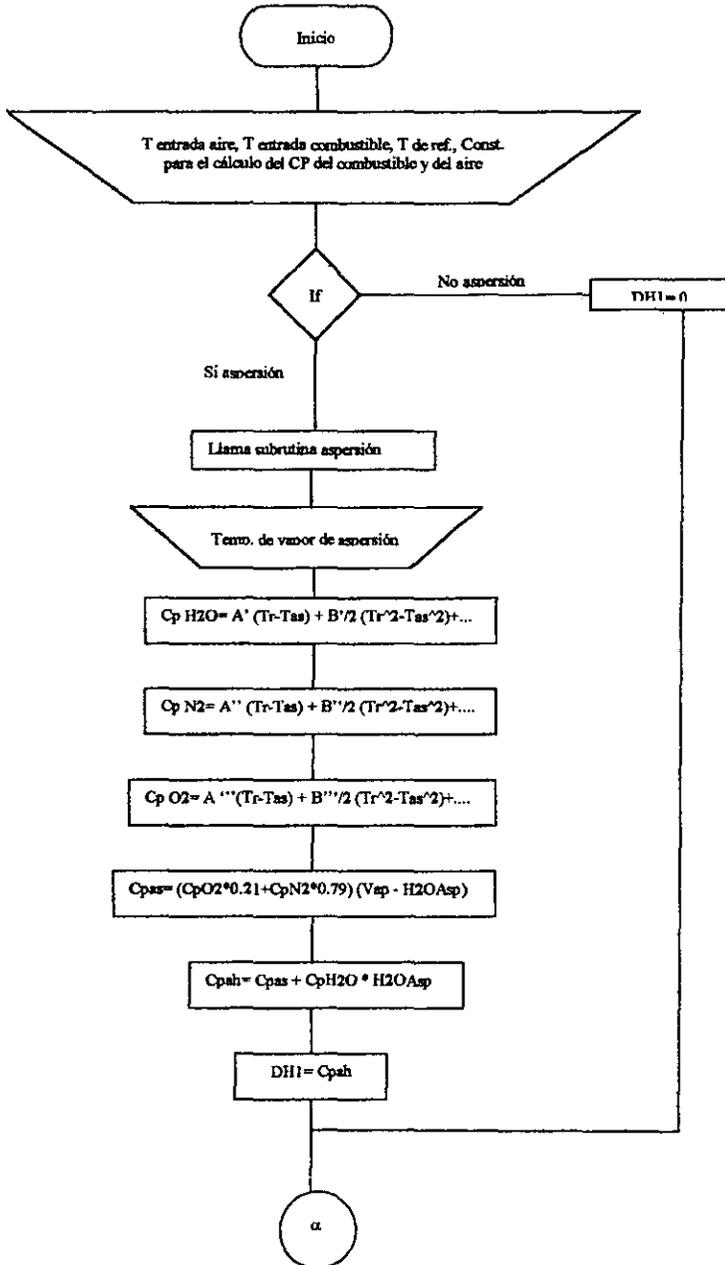
Con el factor se corrigen los valores anteriormente calculados.  
Ejemplo:  
 $N2 \text{ corregido} = \text{Factor} * N2$

**Subrutina Orsat 2**  
Calcula el balance de materia a partir del análisis Orsat 2

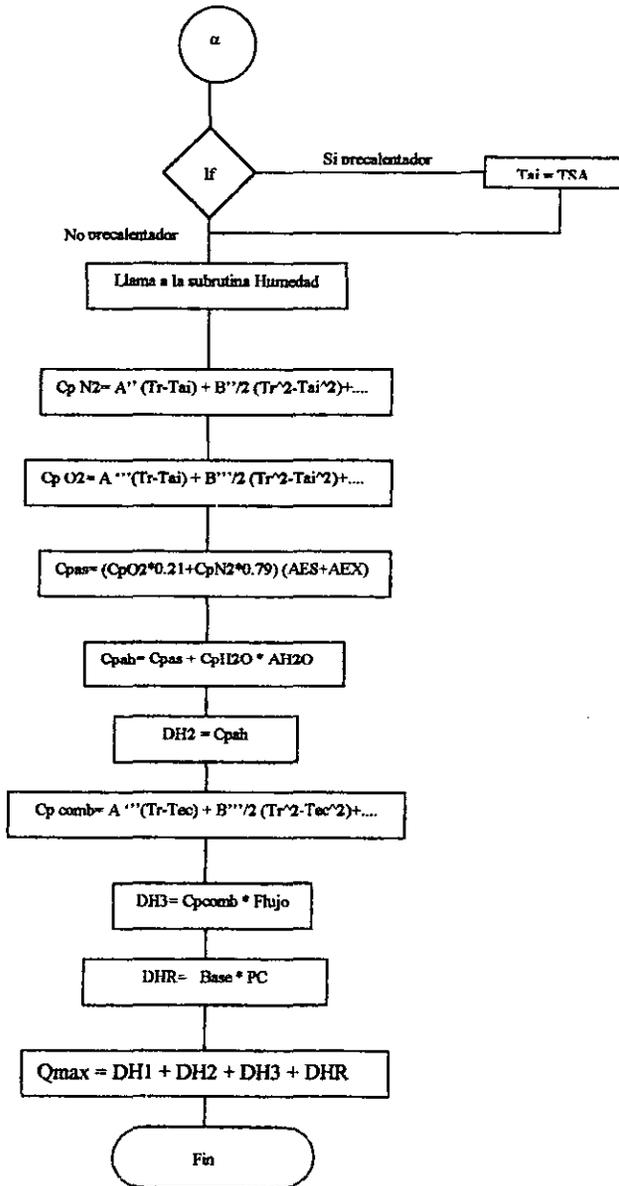


Con el factor se corrigen los valores anteriormente calculados.  
Ejemplo:  
N2 corregido = Factor \* N2

**Subrutina Calor**  
Calcula el balance de calor

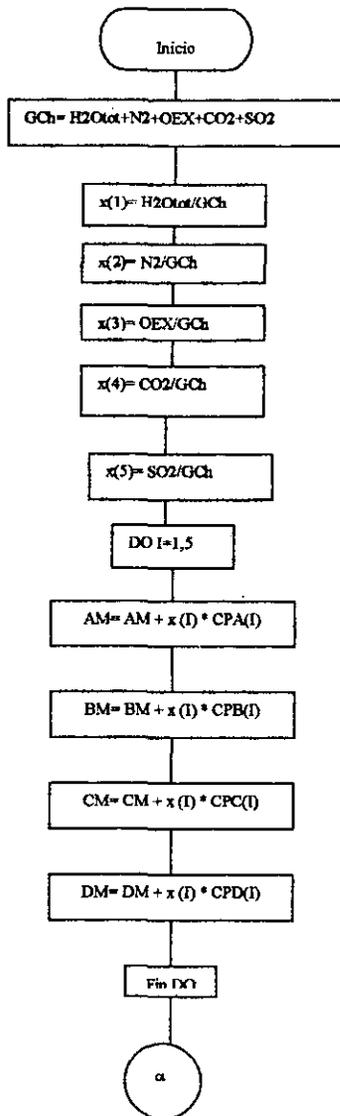


Subrutina Calor  
Continuación

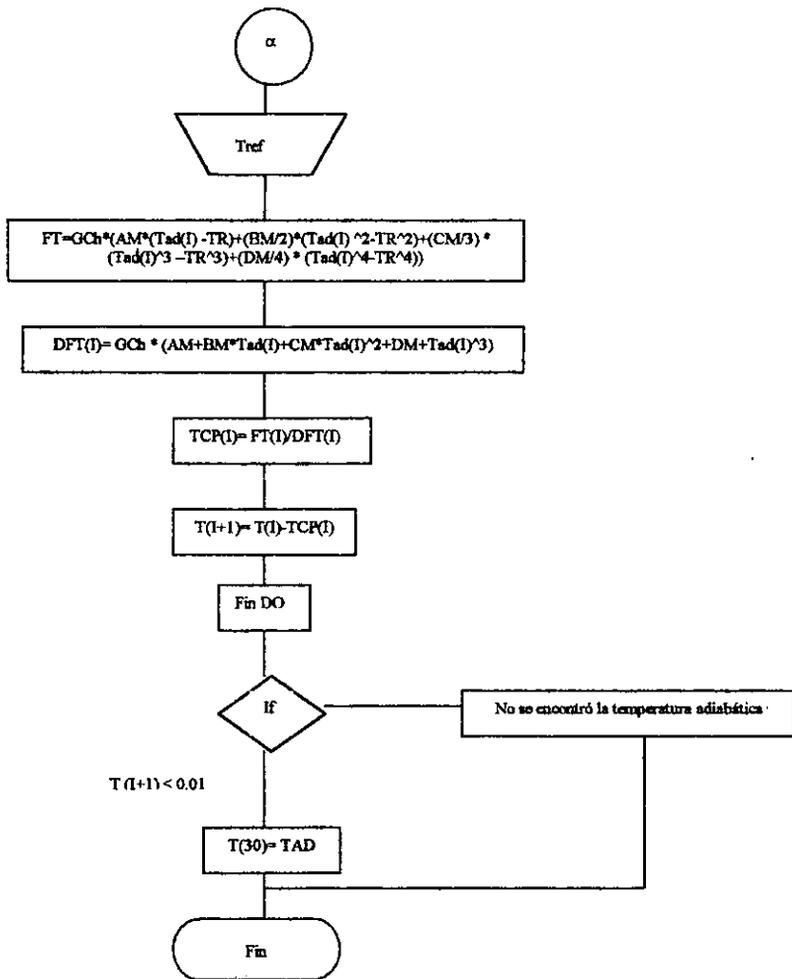


ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

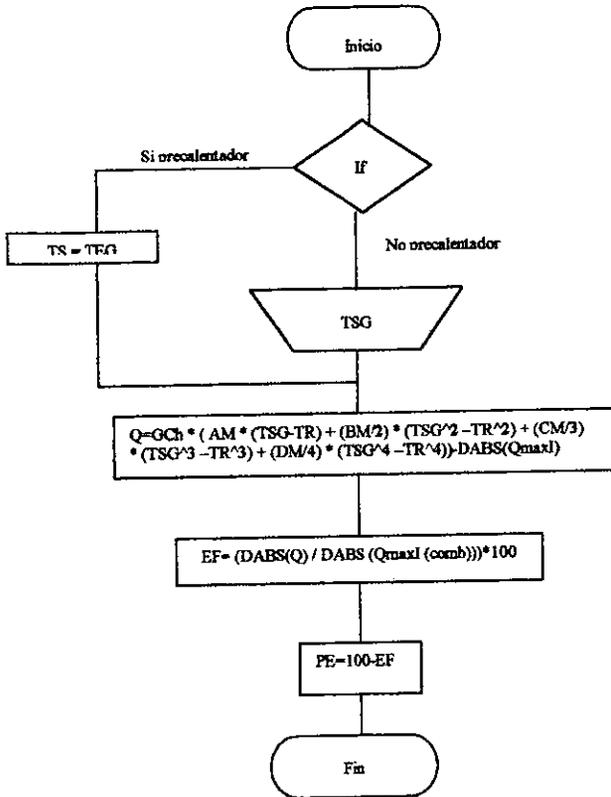
**Subrutina TADI**  
Calcula la temperatura de flama adiabática



**Subrutina TADI**  
Continuación:

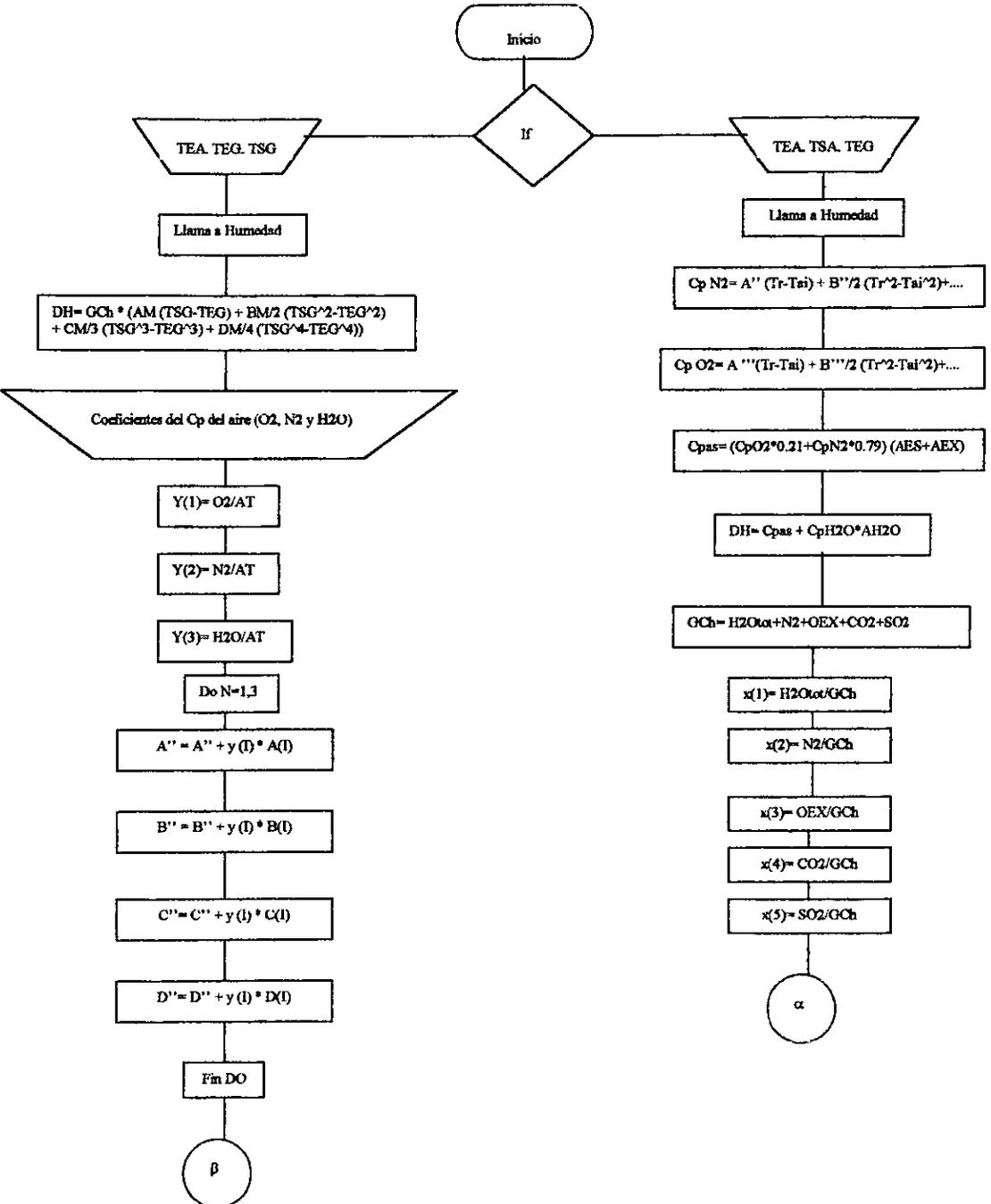


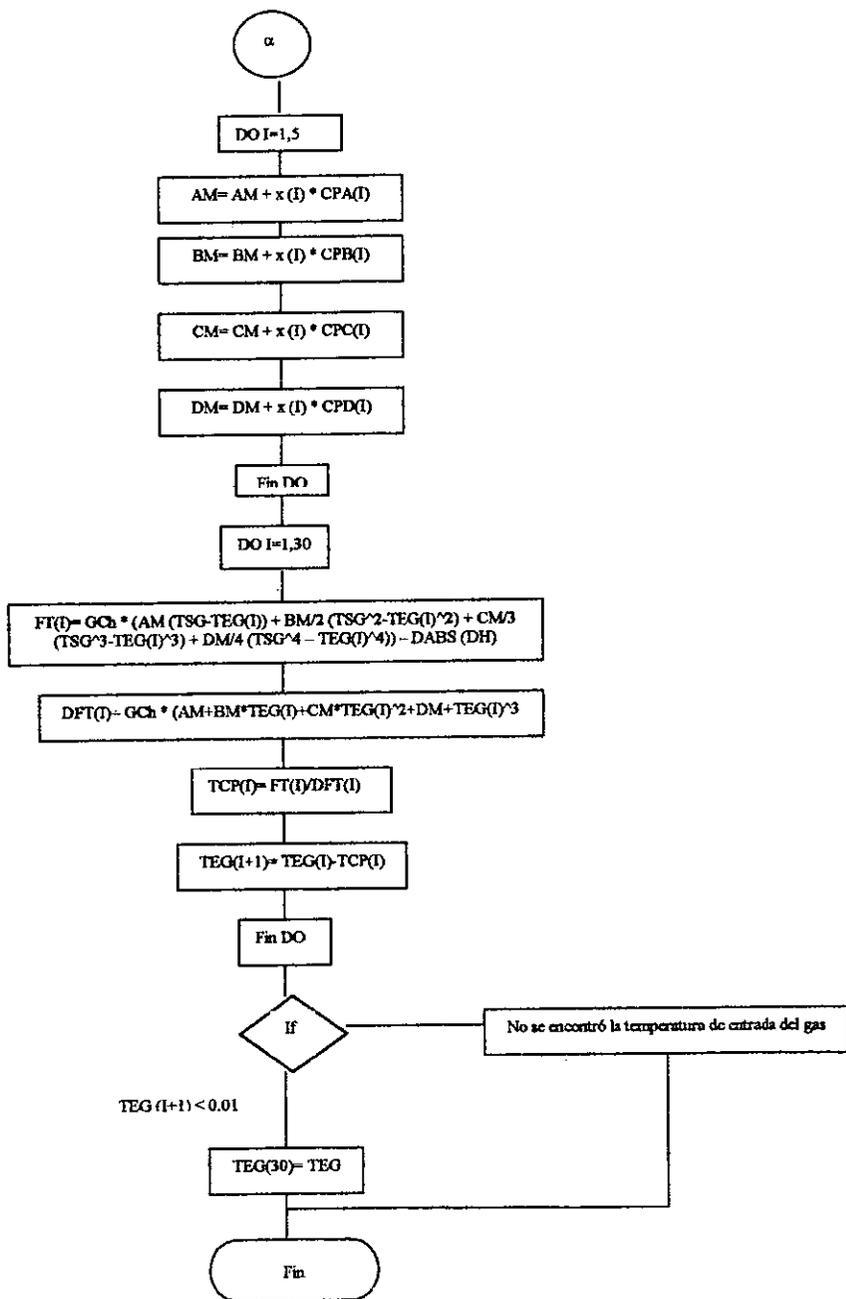
**Subrutina EFIC**  
Calcula la eficiencia del horno

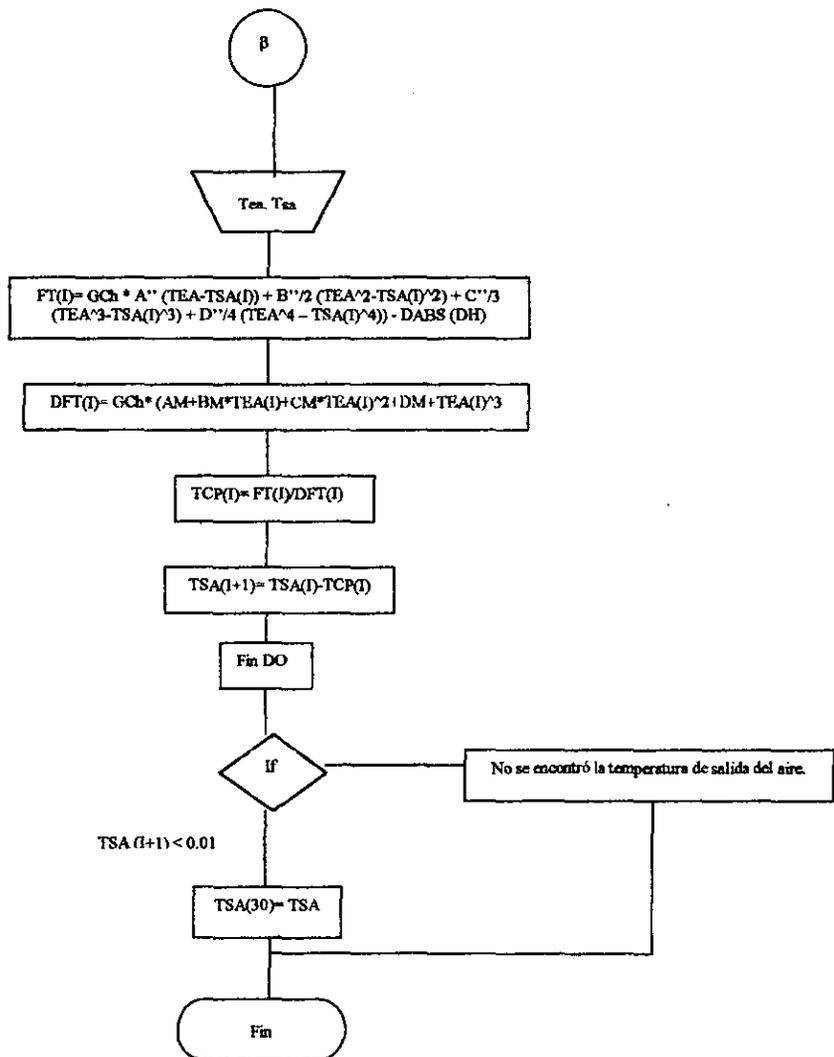


### SUBROUTINA PRECAL

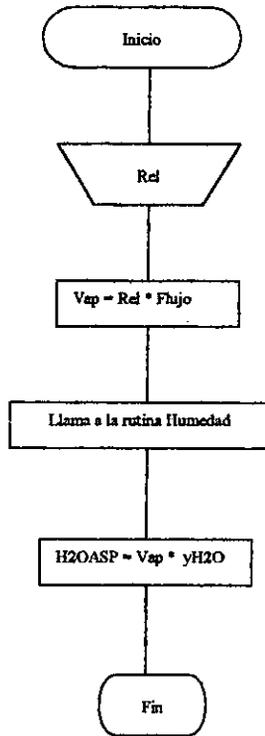
Calcula las temperaturas en caso de que haya precalentador de aire





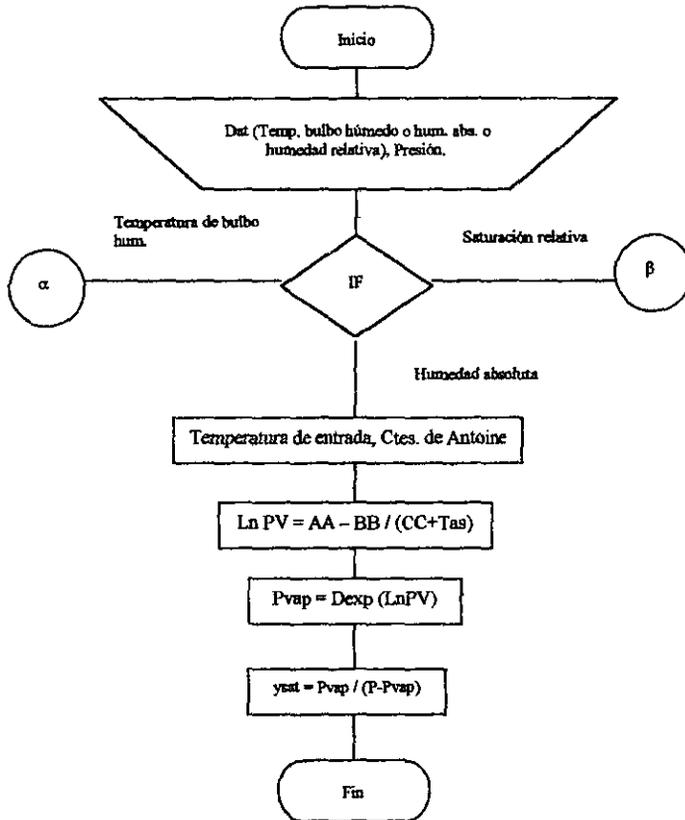


**Subrutina Aspersión**  
Calcula las moles de agua del aire de aspersión

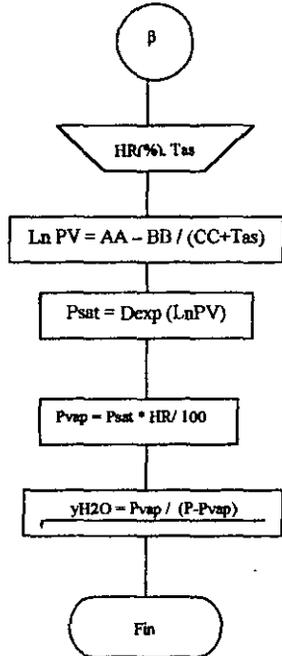
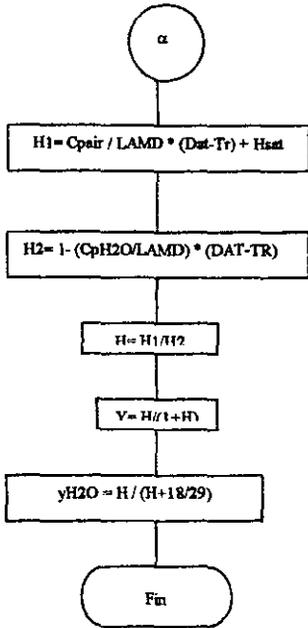


# Subrutina Humedad

Calcula la humedad del aire

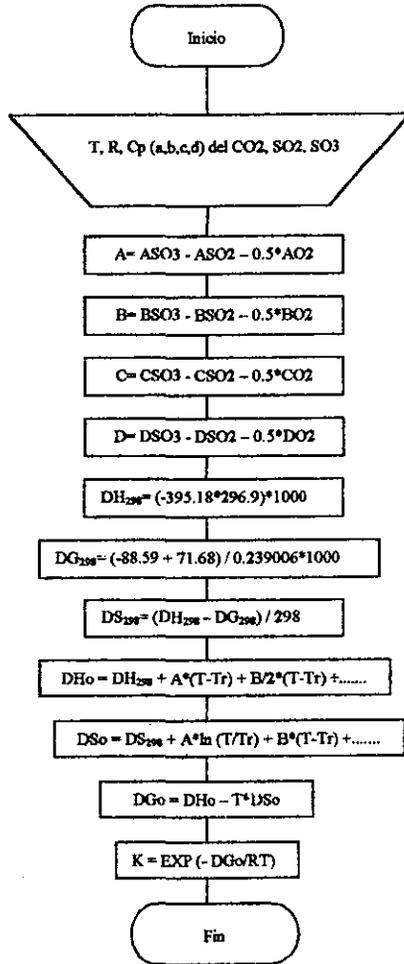


Subrutina Humedad  
Continuación

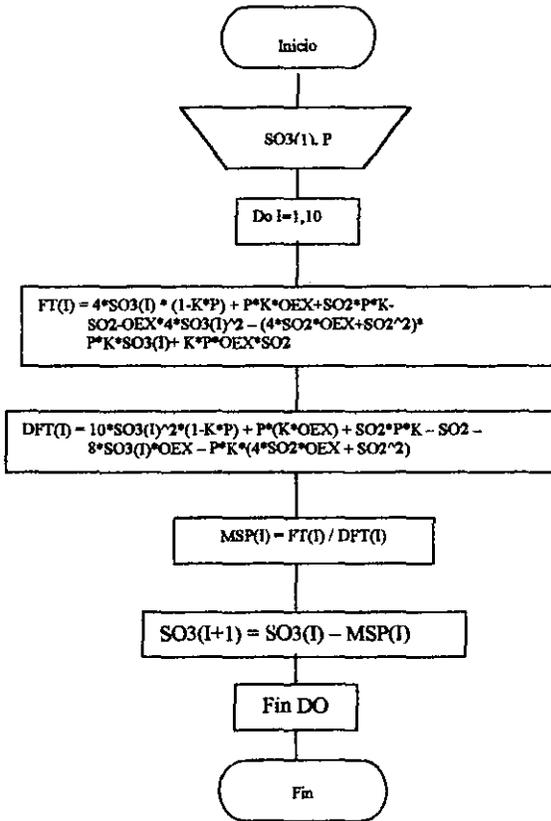


### Subrutina Equil. SO3

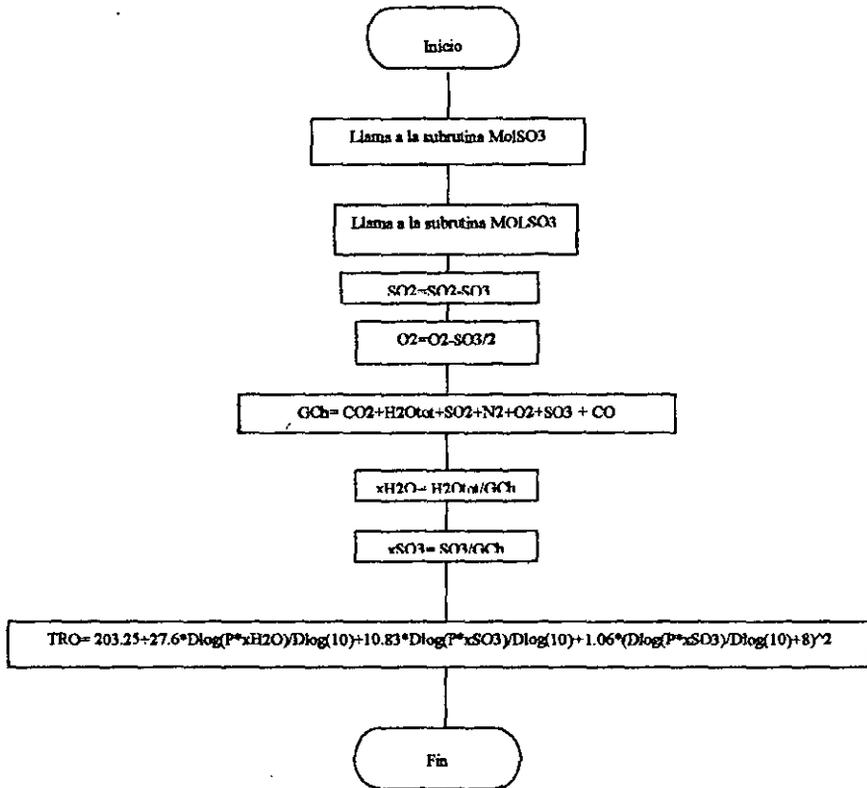
Calcula la constante de equilibrio para la reacción:  $\text{SO}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_3$



**Subrutina MOLS03**  
**Cálcula las moles de SO3 formadas**



**Subrutina ROCIO\_SO3**  
Calcula la producción SO3 por reacción de oxidación



## Nomenclatura de los diagramas de flujo:

A, B, C, D:	Coefficientes de capacidad calorífica
AA, BB, CC:	Ctes. de Antoine
AES:	Moles de aire estequiométrico
AEX:	Moles de aire en exceso
AH <sub>2</sub> O:	Moles de agua en el aire
AM, BM, CM, DM:	Coefficientes de capacidad calorífica de los gases de chimenea
AT:	Moles de aire total
C :	Masa de carbón en el combustible
CO:	Moles de CO que entran en el combustible
CO <sub>2</sub> :	Moles formadas de CO <sub>2</sub> en la combustión
comb:	Número de combustibles
C <sub>p</sub> :	Capacidad calorífica
ch:	Relación másica carbón/hidrógeno
DGo:	Energía libre de Gibbs de la mezcla de los componentes a la temperatura de reacción.
DH1:	Calor sensible del vapor o aire de atomización
DH2:	Calor sensible del aire
DH3:	Calor sensible del combustible
DHo:	Entalpía de la mezcla de componentes a la temperatura de reacción.
DHR:	Calor producido por la combustión
DSo:	Entropía de la mezcla de componentes a la temperatura de reacción.
exceso:	Exceso de aire
Factor:	Factor de corrección
Flujo:	Flujo de entrada de combustible
GCh:	Flujo de gases de chimenea
H:	Masa de hidrógeno en el combustible
H <sub>2</sub> O <sub>asp</sub> :	Moles de agua que entran con el aire de aspersión
H <sub>2</sub> O <sub>F</sub> :	Moles de agua formadas en la combustión
H <sub>2</sub> O <sub>tot</sub> :	Moles de agua en los gases de chimenea
i:	Número de átomos de carbón
j:	Número de átomos de hidrógeno

K:	Constante de equilibrio para el SO <sub>3</sub>
k:	Número de átomos de azufre
LAMD:	Calor latente de vaporización
Nº:	Moles de entrada
N <sub>2</sub> :	Moles de N <sub>2</sub> en los gases de chimenea
NC:	Número de componentes en un combustible
O <sub>2</sub> :	Moles de oxígeno estequiométrico
OE:	Moles de oxígeno estequiométrico
OEX:	Moles de oxígeno en exceso
P:	Presión atmosférica
PC:	Poder calorífico del combustible
Psat:	Presión de saturación
Pvap:	Presión de vapor
Qmax:	Calor máximo producido por la combustión
Rel:	Relación molar aire o vapor de atomización/ combustible
SO <sub>2</sub> :	Moles formadas de SO <sub>2</sub> en la combustión
SO <sub>3</sub> :	Moles de SO <sub>3</sub> a la salida de los gases de chimenea
T:	Temperatura a la que se lleva a cabo la reacción SO <sub>2</sub> → SO <sub>3</sub>
Tad:	Temperatura adiabática de flama
Tas:	Temperatura de entrada del vapor o aire de aspersión
TEA:	Temperatura de entrada de aire al precalentador
TEC:	Temperatura de entrada del combustible
TEG:	Temperatura de entrada de gases de chimenea al precalentador
Tr:	Temperatura de referencia
TRO:	Temperatura de rocío del SO <sub>3</sub>
TSA:	Temperatura de salida del aire del precalentador
TSG:	Temperatura de salida de gases de chimenea a la atmósfera
Vap:	Moles de vapor o aire de aspersión
x:	Fracción molar
yH <sub>2</sub> O:	Humedad del aire
ysat:	Humedad de saturación del aire

*Anexo II*

**Manual del usuario**

# Índice

1. Introducción
2. Instalación del programa
3. Alimentación de datos del combustible
  - 3.1 Combustibles definidos
  - 3.2 Análisis Orsat y flujo de gases de chimenea
  - 3.3 Análisis Orsat y flujo de combustible
  - 3.4 Análisis Orsat y calor de la corriente de proceso
4. Alimentación de datos del aire
5. Datos alimentados
6. Resultados

## **Introducción**

Este programa tiene como finalidad la realización de cálculos para obtener la eficiencia térmica, temperatura de flama adiabática y cálculos derivados para hornos utilizados dentro de la industria química.

La elaboración de este programa ha sido desarrollada en dos distintos lenguajes, Visual Basic 4.0 para la interfase con el usuario y Fortran 77 para la realización de los cálculos. Esta combinación ha hecho posible que el programa se desarrolle en un ambiente amigable para el usuario al mismo tiempo que realiza cálculos precisos.

Mayor información acerca de la elaboración de este programa y las ecuaciones utilizadas en él se puede encontrar en el proyecto de tesis “ Programa para el cálculo de eficiencia térmica en hornos” para obtener el título de Ingeniero Químico de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

## **Instalación del programa**

El programa será proporcionado en dos diskettes que contienen los archivos necesarios para el adecuado funcionamiento del programa. Para correr el programa es necesario contar con la versión 5 o 6 de “Visual Frotran”.

La instalación del programa se puede llevar acabo desde el programa “Windows Explorer”.

1. Inicie el programa “Windows Explorer” que se encuentra en el menú de programas de “Windows”
2. Introduzca el disquete numero 1 en el floppy disk.
3. En el menú “File” elija la opción 3 ½ floppy (A:)
4. En ventana aparecerá el folder “Hornos”, es necesario copiar el folder completo directamente a C:. Es muy importante la dirección de los archivos dentro del folder “Hornos” se encuentren en la dirección C:\Hornos\ por que de otra manera el programa no correrá.
5. Inserte el disquete 2 en el floppy disk.
6. Repita el paso numero 3.

7. En esta ocasión aparecerán dos folders, el primero "Programa ejecutable" que contiene un icono para entrar directamente al programa ejecutable. Este puede instalarse en C:\ o simplemente puede correrse desde A:\. El siguiente folder "Visual" contiene las rutinas de Visual Basic. De la misma manera que el folder "Programa Ejecutable", "Visual" puede ser instalado en C:\ o simplemente correr todo desde A:\.
8. Para iniciar el programa simplemente es necesario dar doble clic al icono "Acceso directo a test.exe" que se encuentra en el folder "Programa Ejecutable".

## **Datos del combustible**

El cálculo de la eficiencia del horno, la temperatura adiabática y cálculos relacionados puede hacerse a partir de distintos grupos de datos. En este programa existen cuatro distintas opciones de obtener los resultados deseados.

Estas opciones se encuentran en el menú principal del programa bajo el nombre de "Datos Combustible"

A continuación se describen las diferentes opciones.

### **2.1 Combustibles definidos**

La primera opción que aparece al elegir la opción del menú principal "**Datos del combustible**" es "**Combustibles definidos**". En esta opción es posible introducir datos desde uno hasta cinco combustibles definidos por composición, condiciones a la entrada de los quemadores y propiedades de estos. Los combustibles pueden estar en estado líquido y/o gaseoso.

Los datos a introducir son los siguientes:

- Número de combustibles
- Combustible líquido o gaseoso

### Combustibles gaseosos :

- Flujo
- Composición
- Densidad
- Temperatura y presión de entrada
- Poder calorífico

Los componentes del combustible deberán ser elegidos de la lista definida como “Componentes”, esta lista contiene los componentes más comunes en combustibles gaseosos.

Los datos pueden ser introducidos en distintas unidades, el programa presenta las unidades más comúnmente usadas para estos datos. Las distintas unidades aparecen en las listas desplegables. El programa no permitirá continuar en caso de que los datos indispensables para los cálculos no sean introducidos.

### Combustibles líquidos :

- Flujo
- Relación carbón / hidrógeno
- Azufre
- Densidad
- Temperatura y presión de entrada
- Poder calorífico
- Datos para el cálculo de humedad del vapor de atomización y relación de vapor respecto al combustible, en caso de existir (ver datos del aire).

Los datos serán introducidos automáticamente al darle clic a la tecla “*Aceptar*” y podrán ser verificados en la opción del menú principal “*Datos Alimentados*”. En caso de que sea

encontrado algún error en los datos introducidos es necesario volver a alimentar todos los datos que aparezcan en la ventana donde se encuentra el error.

## **2.2 Análisis Orsat y flujo de gases de chimenea**

Esta opción nos permite hacer el cálculo a partir de datos obtenidos por medio del análisis Orsat y el flujo de los gases de chimenea.

Los datos requeridos por esta opción son:

- Flujo de gases de chimenea
- Composición de los gases de chimenea ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{SO}_2$ )
- Temperatura entrada del combustible
- Presión de operación
- Poder calorífico del combustible
- Peso molecular y/o densidad en caso de que el poder calorífico se encuentre en unidades de masa y/o volumen.
- Datos para el cálculo de humedad del vapor de atomización y relación de vapor respecto al combustible, en caso de existir

Los datos serán introducidos automáticamente al darle clic a la tecla "**Aceptar**" y podrán ser verificados en la opción del menú principal "**Datos Alimentados**". En caso de que sea encontrado algún error en los datos introducidos es necesario volver a alimentar todos los datos que aparezcan en la ventana donde se encuentra el error.

## **2.3 Análisis Orsat y flujo de combustible**

Esta opción nos permite hacer el cálculo a partir de datos obtenidos por medio del análisis Orsat y el flujo del combustible.

Los datos requeridos por esta opción son:

- Flujo del combustible
- Composición de los gases de chimenea ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{SO}_2$ )
- Temperatura del combustible
- Presión de operación
- Poder calorífico del combustible
- Peso molecular y/o densidad en caso de que el poder calorífico se encuentre en unidades de masa y/o volumen.
- Datos para el cálculo de humedad del vapor de atomización y relación de vapor respecto al combustible, en caso de existir

Los datos serán introducidos automáticamente al darle clic a la tecla “Aceptar” y podrán ser verificados en la opción del menú principal “Datos Alimentados”. En caso de que sea encontrado algún error en los datos introducidos es necesario volver a alimentar todos los datos que aparezcan en la ventana donde se encuentra el error.

#### **2.4 Análisis Orsat y calor de proceso**

Esta opción nos permite hacer el cálculo a partir de datos obtenidos por medio del análisis Orsat y el calor que se lleva la corriente de proceso.

Los datos requeridos por esta opción son:

- Calor que se lleva la corriente de proceso
- Composición de los gases de chimenea ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{SO}_2$ )
- Temperatura de entrada del combustible
- Presión de operación
- Poder calorífico del combustible
- Peso molecular y/o densidad en caso de que el poder calorífico se encuentre en unidades de masa y/o volumen.

- Datos para el cálculo de humedad del vapor de atomización y relación de vapor respecto al combustible, en caso de existir

Los datos serán introducidos automáticamente al darle clic a la tecla "*Aceptar*" y podrán ser verificados en la opción del menú principal "*Datos Alimentados*". En caso de que sea encontrado algún error en los datos introducidos es necesario volver a alimentar todos los datos que aparezcan en la ventana donde se encuentra el error.

### **Datos del aire**

En algunas ocasiones estos hornos cuentan con un precalentador de aire donde se aprovecha el calor proveniente de los gases de chimenea. El programa presenta la opción de introducir un precalentador de aire. Esta opción se encuentra en el menú principal "*Datos aire*".

En caso de que se cuente con un precalentador de aire existen dos opciones para introducir los datos requeridos por el balance de materia.

En la primera opción se requieren la temperatura de entrada al precalentador del aire y de salida tanto del aire como de los gases de chimenea.

La segunda opción requiere las temperaturas de entrada al precalentador del aire y de los gases de chimenea así como la temperatura de salida del precalentador de los gases. Es necesario elegir las unidades de temperatura antes de introducir las temperaturas a definir para el precalentador. Las temperaturas introducidas deberán utilizarse en las mismas unidades.

Posteriormente son requeridos los datos para el cálculo de la humedad del aire. El cálculo de la humedad del aire puede hacerse de tres diferentes maneras:

1. Cálculo a partir de la humedad absoluta
2. Cálculo a partir de la humedad relativa
3. Cálculo a partir de la temperatura de bulbo húmedo

Para elegir una de las opciones anteriores es necesario darle clic al círculo que se encuentra del lado izquierdo del nombre de la opción y dar un clic a botón “*Aceptar*”

#### Calculo a partir de la humedad absoluta

En este caso el único dato a introducir es la presión a la que entra el aire ya que la temperatura de entrada del aire será definida para el cálculo en el precalentador del aire.

#### Calculo a partir de la humedad relativa

En este caso es necesarios introducir el porcentaje de humedad relativa, la presión de entrada del aire y la presión de saturación del aire.

#### Calculo a partir de la temperatura de bulbo húmedo

Aquí los datos requeridos son la temperatura de bulbo húmedo, la presión de saturación y el calor latente de vaporización.

El menú *Datos Aire* también incluye la opción para el caso en el que no exista precalentador de aire. Cuando es así la primer ventana que aparecerá será para introducir el valor de temperatura de salida de los gases de chimenea. Las unidades pueden elegirse en la ventana desplegable.

La siguiente ventana que aparecerá será para introducir los datos de humedad que contendrá las mismas opciones que en el caso en el que si existe precalentador de aire. Los datos requeridos son los mismos que en caso anterior con la diferencia de que es necesario, en este caso, introducir la temperatura de entrada del aire.

### **Datos Alimentados**

Dentro del programa es posible ver los datos alimentados en caso de que haya alguna duda de los datos introducidos. Dentro del menú los datos están separados la primera opción “*Datos del combustible*” es posible ver los datos introducidos para el combustible, numero de combustibles, composición, temperatura de entrada del combustible y las propiedades introducidas para el combustible. En la segunda opción “*Datos del aire*” es posible revisar

los datos introducidos para el aire, la humedad, los datos de precalentador en caso de existir y las temperatura de gases de chimenea y de alimentación del aire.

En ambas opciones al dar clic al botón "*Ver datos*" aparecerá una lista con los datos introducidos por el usuario.

Los datos se mostraran en las unidades con las que fueron introducidos originalmente, aunque dentro del programa los cálculos se hacen en unidades del sistema métrico decimal.

## **Resultados**

Los resultados del calculo de eficiencia se obtiene en el ultimo menú "*Resultados*". Es necesario pedir los resultados dependiendo de los datos de combustible que se alimento al programa, si se dieron "datos de combustibles definidos" es necesario dar clic en el menú de resultados referido a "*Combustibles definidos*", de igual manera cuando se introdujeron datos del análisis Orsat y el flujo de entrada de combustible y así sucesivamente. El programa marcara error en caso de que se elija ver resultados que difieren con los datos alimentados por el usuario ya que la forma y los datos requeridos por los distintos cálculos es distinta.

## **Terminar el programa**

Para terminar el programa es necesario ir al menú archivo y elegir "*Salir*".

## Referencias

- (1) Ministerio Británico de combustibles y energía, La utilización eficiente de los combustibles, 1949.
- (2) Kern D., Process Heat Transfer, 1950, McGraw Hill.
- (3) Trinks W., Industrial Furnaces, Vol. II, 3<sup>th</sup> Ed., 1955.
- (4) Trinks W., Industrial Furnaces, Vol. I, 5<sup>th</sup> Ed., 1961.
- (5) Treadwell F., Tratado de Química Analítica (Análisis Cuantitativo), Tomo II, 5<sup>a</sup> Ed., 1949.
- (6) Castellan G., Fisicoquímica, 2<sup>a</sup> Ed., 1987, Addison-Wesley Iberoamericana S.A.
- (7) Okkes A, Get acid dew point of fuel gas, Hydrocarbon Processing, July 1987, pp 53-55
- (8) Perry, Chemical Engineers Handbook, 4<sup>th</sup> edition, pp 15-2.
- (9) Speight, J. The chemistry and technology of Petroleum, 1980.
- (10) Rose J.W.(editors), Technical Data on Fuel, 7<sup>th</sup> edition, 1977, The British National Committee, World Energy Conference.

## **Bibliografía**

- **Atkins P. W.**, Principios de fisicoquímica, Addison-Wesley Iberoamericana, 1986.
- **Bazua Rueda E**, Notas del curso "Equilibrio Químico".
- **Ceballos, Francisco Javier**, Enciclopedia de Visual Basic 4, 1997, Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V.
- **Clive Davies**, Calculations in furnace technology, Pergamon Press, Oxford, 1966.
- **Eastop TD**, Applied thermodynamics for engineering technologists, Longman London, 1970.
- **Felder R**, Principios básicos de los procesos químicos, 1981, Ed. El Manual Moderno S.A. de C.V..
- **Foust A**, Principios de operaciones unitarias, 1987, Cia editorial continental.
- **García Merayo**, Programación en Fortran 77, 1997, Mc Graw-Hill.
- **Griswold J**, Fuel combustion and furnaces, Mc Graw Hill, 1946.
- **Gruse and Stevens**, Chemical Technology of Petroleum, 1942, Mc Graw-Hill.
- **Halvorson Michael**, Aprenda Visual Basic, 1997, Mc Graw-Hill.
- **Huntington R**, Natural gas and natural gasoline, 1950, Mc Graw-Hill.
- **Kern**, Process Heat Transfer, 1950, Mc Graw-Hill.
- **Manual del Usuario de Visual Basic**, Microsoft Office.
- **Nieves A.**, Métodos numéricos aplicados a la ingeniería, 1995, Compañía Editorial Continental.
- **Okkes A**, Get acid dew point of fuel gas, Hydrocarbon Processing, July 1987, pp 53-55.
- **Perry**, Manual del Ingeniero Químico, 1992, sexta edición, Editorial Paraninfo.
- **Popovich M**, Fuels and Lubricants, 1959.
- **Pratt Arthur D.**, Principles of combustion the steam boiler furnace, 1936, Babcock & Wilcox, LTD.

- **Rose J.W. (editors), Technical Data on Fuel, 7<sup>th</sup> edition, 1977, The British National Committee, World Energy Conference.**
- **Speight J, The chemistry and technology of petroleum, 1980, Marcel Dekker Inc.**
- **Spiers HM (editors), Technical Data on Fuel, 6<sup>th</sup> edition, The British national committee world power conference, 1961, London.**
- **Trinks, Industrial Furnaces, 1955 Vol. I y II.**
- **Walker W, Principles of chemical engineering, 1937, Mc Graw-Hill.**