

# Desarrollo de un programa para contabilidad y equivalencia de energía térmica en hornos y calderas

GLORIA Y. PALACIOS J.  
Ingeniera Química, UIS

EVER A. PALACIOS J.  
Ingeniero Químico, UIS

SONIA A. GIRALDO DE LEON\*  
Ingeniera Química, Msc., UIS

## RESUMEN

Con el propósito de implementar un software para hacer auditorías energéticas se desarrolló un programa en lenguaje BASIC. El programa calcula la eficiencia convencional, contabilidad térmica y equivalencia energética en hornos y calderas.

## INTRODUCCION

La industria Colombiana, se ha visto afectada por un incremento sistemático en el costo de la energía, obligándola a utilizar con más frecuencia, combustibles residuales o una mezcla de estos con otros combustibles. Por esta razón, el estudio de la combustión y sus elementos asociados: combustibles y equipos, se ha constituido en un factor primordial en el desarrollo de mecanismos para un aprovechamiento más racional de la energía, los cuales van asociados con un mejoramiento en la calidad del medio ambiente.

\* Profesora Asistente. Departamento Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Se requiere por lo tanto del planteamiento de una metodología para la evaluación energética de los equipos de uso industrial, tales como hornos calderas, intercambiadores de calor, sistemas de iluminación, bombas, compresores etc., mediante un análisis sistematizado, en el cual se contemple el comportamiento de estos y pueda simularse el proceso, al cambiar las variables involucradas.

En Colombia, los programas en auditoría energética son recientes encontrándose aún en su etapa de planeación y coordinación. En ello se encuentran comprometidos el Ministerio de Minas y Energía, y algunas empresas como ECOPETROL, por intermedio del Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), quienes han iniciado algunas actividades orientadas hacia la concientización del sector industrial en la necesidad de ahorrar y optimizar el consumo de energía.

En este trabajo se desarrolla una metodología para hacer auditorías en hornos y calderas mediante procedimientos de contabilidad y equivalencia de energía térmica. Se amplía también el método desarrollado, para el análisis de la sustitución de combustibles, con el fin de dar una mejor y mayor utilización a nuestros recursos naturales.

Este estudio se aplica concretamente a hornos y calderas pues son equipos comunes en la industria colombiana, son fuente de grandes pérdidas de energía y a su vez dan la posibilidad de ser optimizados con facilidad, sirviendo como patrón para el estudio en otros equipos.

El programa desarrollado está escrito en BASIC y consta esencialmente de los siguientes módulos:

1. Cálculo de la eficiencia. En esta primera fase se realizan los balances de masa y energía para evaluar la eficiencia convencional de hornos y calderas. Esta indica en forma general el comportamiento del equipo.
2. Contabilidad térmica. Se hace un análisis vía perfil de temperatura, disponiendo de la temperatura de la llama, de la cámara, del recuperador y de la chimenea. Así se separa claramente el desempeño de cada parte del equipo, facilitando la identificación de las fallas.

3. Equivalencia energética. Si se quiere analizar la sustitución del combustible con el cual se está operando el equipo, se desarrollan criterios de comparación y algunas pautas para hacer auditorías, cuando el equipo se opera a condiciones diferentes a las diseñadas.

Dentro del programa se crearon archivos aleatorios para procesar, almacenar, presentar y escribir datos generados por él, (véase diagrama de flujo en la Figura 2).

### METODO DESARROLLADO PARA EL ANALISIS DE UN HORNO O CALDERA

#### Eficiencia

Para el cálculo de la eficiencia se requiere conocer la composición y masa de los gases de chimenea. Esta se calcula mediante balances de masa a partir del conocimiento de las características del combustible. Si es un combustible simple, una mezcla de combustibles y si están en estado sólido o líquido se debe conocer su composición másica (análisis último); el programa la transforma a la composición de un combustible que se denomina genérico. Si el combustible es un gas, existe la posibilidad de que la información se suministre en términos de 25 componentes básicos a partir de la cual se calcula la composición del combustible genérico (véase Tabla 1). De la corriente de aire se requiere su humedad (véase la Figura 1).

Los balances de masa se realizan a partir del conocimiento de la fracción de oxígeno en los gases de chimenea para el caso de combustión completa o fracción de oxígeno y monóxido de carbono para combustión incompleta.

El programa presenta dos opciones de cálculo, dependiendo de el conocimiento del flujo de combustible a quemar o del flujo de fluido a calentar (véase Figura 2).

Calculadas la **composición** y flujo de los gases de chimenea y el exceso de aire, se continúa con el cálculo de la eficiencia. Para el cálculo de la eficiencia de hornos y calderas se utilizó el método ENTRADA-PERDIDA por su simplicidad.

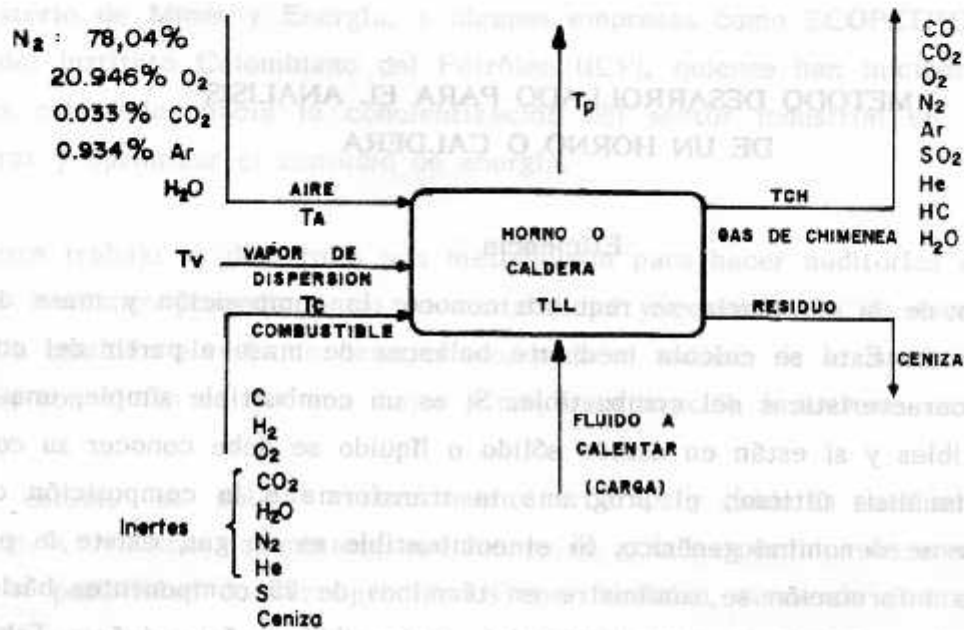


FIGURA 1 ESQUEMA DE LAS CORRIENTES EN UN HORNO O CALDERA

**TABLA 1.- Generalización de los componentes presentes en los diferentes combustibles**

No.	Combustible Gaseoso	Combustible Sólido, líquido	Composición combustible genérico
1	CH <sub>4</sub>	C	C
2	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
3	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	S	O <sub>2</sub>
4	N-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	N <sub>2</sub>	S
5	I-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	O <sub>2</sub>	Inertes
6	N-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	H <sub>2</sub> O	Ceniza
7	I-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	Ceniza	
8	N-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>		
9	N-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>		
10	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		
11	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>		
12	N-C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		
13	I-C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>		
14	I-C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>		
15	C-C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>		
16	T-C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>		
17	N-C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>		
18	CO		
19	CO <sub>2</sub>		
20	H <sub>2</sub>		
21	H <sub>2</sub> S		
22	N <sub>2</sub>		
23	He		
24	O <sub>2</sub>		
25	H <sub>2</sub> O		

$$EFF = 100 (1 - Q_{\text{perdido}}/Q_{\text{disponible}} \text{ o } \text{Créditos})$$

**CREDITOS DE CALOR O CALOR DISPONIBLE (QD).** Es la suma de toda la energía química y térmica almacenada en los reactantes de la combustión. Se calculan por el aporte de las siguientes partes teniendo como temperatura de referencia 25°C.

- Calor total de combustión (QT)
- Calor sensible del combustible (QSC)
- Calor sensible del aire seco (QSA)
- Calor sensible de aire seco (QSA)
- Calor sensible del vapor de dispersión (QSV)

$$\text{CREDITOS} = QT + QSC + QSA + QSV$$

**CALOR PERDIDO (QP).** Aunque la norma ASME contempla diez clases de pérdidas de calor, se consideran ocho de éstas, debido a que las pérdidas de calor por radiación son generalmente pequeñas. Para las pérdidas de calor por otras razones (fugas, accesorios deteriorados, etc.) no se puede generalizar su cuantificación, por lo tanto el auditor debe analizar específicamente estas pérdidas de calor en el equipo analizado. El calor perdido comprende:

- Calor perdido con los gases de chimenea secos

$$QP (1) = 100 \times FGASS \times CPCHS \times (TCH - TAIRE)/QD$$

**CPCHS** = Calor específico del gas de chimenea, se calcula en una subrutina del programa a partir del calor específico y fracción de cada uno de los componentes de la mezcla evaluados a la temperatura promedio entre la del gas de chimenea (TCH) y la del aire (TAIRE).

**FGASS** = Flujo del gas de chimenea seco

- Calor perdido por la humedad del combustible, como resultado de la evaporación del agua.

$$QP(2) = 100 \times XH_2O \times (HH_2O_v - HH_2O_l)/QD$$

$XH_2O$  = Fracción de agua en el combustible

$HH_2O_v$  = Entalpia del vapor de agua

$HH_2O_l$  = Entalpia del agua líquida

- Calor perdido con el agua formada por la combustión del hidrógeno

$$QP (3) = 100 \times 18/2 \times XHT \times (HH_2O_v - HH_2O_l)/QD$$

$XHT$  = Fracción de hidrógeno en el combustible

- Calor perdido en el residuo. Existe para combustibles sólidos y líquidos

$$QP (4) = 100 \times \text{RESIDUO SECO} \times \text{CALOR EN RESIDUO}/QD$$

- Calor perdido en la humedad del aire

$$QP (5) = 100 \times CPH_2O \times XHUM \times AIRER \times (TCH - TAIRE)/QD$$

$CPH_2O$  = Calor específico del vapor de agua

$XHUM$  = Humedad absoluta del aire

$AIRER$  = Aire suministrado

- Calor perdido por el monóxido de carbono

$$QP(6) = 100 \times GASS \times QCO \times YCHS(1)/QD$$

$QCO$  = Calor total del CO a condiciones normales

$YCHS(1)$  = Fracción molar de CO en los gases de chimenea

- Calor perdido por hidrocarburos no quemados

$$QP(7) = 100 \times FGASS \times QHC \times YCHS(9)/(PECH \times QD)$$

- QHC = Calor total del hidrocarburo no quemado  
 YCHS(9) = Fracción molar de hidrocarburo en el gas de chimenea  
 PECH = Densidad del gas de chimenea seco a condiciones normales

$$QP(8) = 100 \times FGASS \times QH_2 \times YCHS(8) / (PECH \times QD0)$$

- QH<sub>2</sub> = Calor total del H<sub>2</sub>  
 YCHS(8) = Fracción molar de hidrógeno en el gas de chimenea

El cálculo de la eficiencia entonces será:

$$EFF = 100 - QP(1) - QP(2) - QP(3) - QP(4) - QP(5) - QP(6) - QP(7) - QP(8)$$

En uno de los archivos se encuentran almacenados diferentes combustibles de uso industrial con sus características físico-químicas e información generada en el primer módulo del programa, para condiciones de combustión recomendadas o encontradas en la práctica industrial.

### CONTABILIDAD TERMICA

En la evaluación de hornos y calderas operando continuamente se necesita definir un estado de referencia con el cual pueda compararse el desempeño del equipo. Una referencia adecuada es el aprovechamiento térmico previsto en el proyecto.

Se define entonces: aprovechamiento térmico (AT), como la fracción total teóricamente disponible del combustible a 25°C en condiciones específicas de quema, que realmente se aprovecha en el proceso receptor de calor.

$$AT = \frac{TLL - TCH}{TA - 25}$$

La temperatura adiabática de llama (TA) se calcula de la siguiente forma:

$$TA = QD / \sum (M \times Cp)_i + 25$$



$(M \times Cp)_i$  = Es el producto de la masa por el calor específico de cada uno de los componentes del gas de chimenea ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ) con base en combustión completa.

El programa puede comparar el aprovechamiento térmico obtenido, quemando diferentes combustibles, ya que para cada caso la temperatura de llama (TLL) observada, la temperatura adiabática de llama, y la temperatura de los gases de chimenea (TCH) son diferentes.

Si los valores del aprovechamiento térmico observados realmente caen por debajo de los valores calculados para diferentes combustible, se debe encontrar la causa, la cual puede ser: condiciones operacionales o el procedimiento contable. Por tal motivo es necesario detallar los procedimientos de contabilidad térmica de tal forma que el auditor pueda llegar a una evaluación justa para cada horno o caldera.

El programa reporta el aprovechamiento térmico y la eficiencia de quema (EQ).

$$EQ = \frac{TLL - 25}{TA - 25}$$

En la evaluación convencional de la eficiencia, apenas se mide la temperatura de los humos en la chimenea y suponiendo que la llama llega a su temperatura adiabática, se determina una eficiencia para el conjunto quemador-cámara-recuperador; ahora se presenta el análisis vía perfil de temperatura, en el cual se separan claramente estas tres eficiencias, facilitando así su análisis y por consiguiente la identificación de fallas.

La relación entre el calor aprovechado y el generado depende del potencial de temperatura existente entre los gases y el proceso receptor de calor. La variación de este potencial en función del combustible utilizado y de las condiciones de combustión, no es posible cuantificarlo por la inexistencia de criterios bien definidos para la evaluación de los procesos que se propongan para modificar la situación o proyecto inicial. En un intento de suplir estos criterios, se propone un procedimiento de contabilidad térmica, basado en el perfil de temperatura de los humos que permite una evaluación justa del desempeño de los equipos.

**ANALISIS VIA PERFIL DE TEMPERATURA.** Los hornos y calderas están conformados de la siguientes partes que son analizados independientemente: el quemador o la parrilla, la cámara de transferencia de calor que sirve al proceso primario (calentar un fluido o evaporar agua), el recuperador que sirve a un proceso secundario y la chimenea; los procesos primario y secundario se refieren a la forma de aprovechar el calor desprendido durante el proceso de combustión.

Si el combustible o los productos de la combustión pasan por las cuatro partes, la eficiencia de cada una, así como la del horno en general, se determina a partir del conocimiento de la temperatura de los humos, en cada una de estas secciones.

$$FQ = (TA - TLL)/(TA - 25)$$

$$FC = (TLL - TSC)/(TA - 25)$$

$$FR = (TSC - TSR)/(TA - 25)$$

$$FCH = (TSC - 25)/(TA - 25)$$

Donde:

FQ, FC, FR, FCH: Fracciones de calor disponible que se disipan en el quemador, la cámara, el recuperador y la chimenea respectivamente.

TSC, TSR: Temperaturas de salida de la cámara y del recuperador, respectivamente.

El balance de energía es el producto de la contabilidad térmica y muestra la situación global del equipo estudiado, los resultados se obtienen del perfil de temperatura del lado de los humos y de las medidas de calor del proceso.

En todos los casos, el perfil de temperatura de los humos y las medidas del lado del proceso, son herramientas básicas del análisis. El total teórico del calor sensible de los humos se disipa en las varias partes del horno o de la caldera; el procedimiento contable vía perfil de temperatura acompaña estas disipaciones, evaluando en forma justa cada parte del equipo.

La identificación de las condiciones operacionales por la contabilidad térmica, suministra suficientes detalles para que el auditor o el operador puedan identificar la raíz del problema.

El análisis muestra los débitos de calor sólo en la masa de humos y provienen del análisis vía perfil de temperatura así:

- Ineficiencia de la quema = FQ x QD
- Calor transferido en la cámara = FC x QD
- Calor transferido en el recuperador = FR x QD
- Dispensa operacional de la chimenea = FCH x QD

$$\text{DEBITOS} = \text{QD} \times (\text{FQ} + \text{FC} + \text{FR} + \text{FCH})$$

El análisis vía perfil de temperatura muestra la cantidad exacta de energía usada para operar la chimenea, la cual no se considera como pérdida de calor; estos cálculos dependen de la temperatura adiabática de llama, y se evalúan mediante un balance de energía.

En esta parte el programa reporta la fracción de calor disipado en el quemador, la cámara, el recuperador y la chimenea; la fracción de aprovechamiento térmico y la eficiencia de quema.

### EQUIVALENCIA ENERGETICA

La gran cantidad de combustibles actuales y de los que en el futuro se dispongan para combustión como generadores de calor tienen una característica común: todos almacenan una cantidad conocida de energía química que al ser liberada se transformará total o parcialmente en energía térmica. La forma física de presentación de los combustibles es variada: gases, líquidos viscosos y no viscosos, sólidos pulverizados, peletizados, con ceniza o sin ceniza, húmedos o secos. Igualmente variada es la composición química y por tanto, la concentración energética de cada una de estas formas, el poder calorífico se especifica en unidades de energía por unidad de masa o por unidad de volumen. Esta situación indica la necesidad de algún tipo de patrón que pueda ofrecer al consumidor industrial un criterio para la escogencia de su combustible.

Se establecen criterios de comparación para combustibles sólidos, líquidos o gaseosos en diversas condiciones de combustión, cuando se escogen para una misma aplicación de generación de calor. Una equivalencia de combustibles no puede ser definida genéricamente. Ella depende de las condiciones físicas de la combustión y del nivel de temperatura que se necesita en la instalación o proceso receptor.

Se define el proyecto equivalente como aquel que conserva la capacidad de intercambio térmico y la temperatura de expulsión de los humos al cambiar el combustible.

En hornos o calderas operando en estado estable, el flujo de calor (Q) cedido por la fuente debe ser igual al flujo de calor transportado por el área de transferencia y al flujo de calor absorbido por el receptor. Quiere decir que en el proceso patrón.

$$Q_p = U_p \times A_p \times DT_p = F_p \times QA_p$$

Donde:

El calor aprovechado (QA) se calcula así:

$$QA = CSH \times (TLL - TCH)$$

CSH = Calor sensible de los humos, es la cantidad de calor que puede extraerse de los humos al enfriarse un grado por unidad de masa del combustible. El cual es igual al calor específico de los humos multiplicado por el flujo de humos con base en un kilogramo de combustible.

La temperatura de los gases de chimenea se calcula sumándole al nivel máximo de temperatura del proceso receptor (TP) la diferencia mínima entre los gases de chimenea y el proceso receptor, para este caso, arbitrariamente se fijó en 100°C. Como se observa este aprovechamiento máximo varía con el nivel de temperatura del proceso atendido, por consiguiente se considera este nivel de temperatura en los cálculos de equivalencia.

DT = El potencial de temperatura entre los humos y el proceso receptor. Es la medida logarítmica entre la diferencia de temperatura máxima y la diferencia

de temperatura mínima existente entre ellos.

$F_p$  = flujo másico del combustible patrón

$A_p$  = Superficie de intercambio en el proyecto patrón

$U_p$  = Coeficiente de transferencia de calor en el proyecto patrón

Si se sustituye el combustible, la superficie de intercambio, el potencial de temperatura y el calor aprovechado cambian. Por consiguiente para mantener la capacidad de intercambio térmico estos términos se deben multiplicar por factores de conversión que compensen estos cambios, tales factores son:

- Equivalencia de combustible (COMR). También llamado consumo relativo de combustible, representa la fracción de aumento del nuevo combustible necesario para atender la situación del caso patrón.

$$\text{COMR} = \frac{Q_{Ap}}{Q_{Ai}}$$

- Equivalencia de superficie (ESUP).

$$\text{ESUP} = \frac{U_i \times A_i}{U_p \times A_p} = \frac{A_i}{A_p}$$

Esta relación muestra si la superficie de intercambio de calor, del proyecto estudiado es menor o mayor que la del proyecto patrón. Se supone que los coeficientes de transferencia de calor son iguales para ambos casos.

Si el caso estudiado es el proyecto equivalente, el flujo de transferencia de calor debe ser igual y la equivalencia de superficie es igual a la relación entre los potenciales de temperatura.

$$Q_i = Q_p$$

$$ESUPe = \frac{Ae}{Ap} = \frac{DTp}{DTe}$$

- Equivalencia de capacidad de expulsión de humos (ECAPE).

$$ECAPE = \frac{(ECOM \times EVACH) i}{(ECOM \times EVACH)p}$$

La capacidad de expulsión de humos es indicador de las modificaciones del proyecto. Dice cuales son las capacidades relativas de expulsión de humos que se deben proveer para los diferentes combustibles en condiciones de equivalencia.

Se calcula también el porcentaje de aprovechamiento térmico para cada uno de los combustibles.

$$\% AT = \frac{QAe}{QDe} \cdot 100$$

Con el propósito de generalizar y utilizar una base común de comparación se calcularon y almacenaron valores relativos o indicadores de consumo de combustible, superficie de intercambio, capacidad de evacuación de humos y calor aprovechado por el proyecto equivalente, utilizando arbitrariamente el combustible número uno (combustible tipo F dispersado con vapor) del archivo, como caso patrón, lo cual no afecta la evaluación de los combustibles. Cualquier combustible se puede comparar con cualquier otro por medio de los valores relativos sin necesidad de pasar por el caso patrón. El programa tiene almacenados, estos valores relativos para proyectos equivalentes de diferentes combustibles a varias temperaturas de proceso y también almacena información generada para nuevos combustibles.

Cuando al sustituir el combustible, la capacidad de intercambio térmico o la temperatura de expulsión de gases sean alteradas, el proyecto deja de ser equivalente convirtiéndose en proyecto no equivalente y el desempeño de la instalación es imprevisible. Una infinidad de situaciones pueden ocurrir en función de los criterios y de la habilidad del operador. El programa simula diferentes situaciones operacionales con la mis-

ma superficie de intercambio para proyectos no equivalentes. El usuario escogerá la situación más favorable.

Las variables a analizar en el funcionamiento del equipo son: Temperatura de los humos, capacidad de intercambio térmico, el calor aprovechado y la capacidad de evacuación de humos la cual permite analizar la holgura del sistema.

- Holgura de evacuación de humos (HOLG).

$$\text{HOLG} = (\text{ECAPE} - 1) \times 100$$

El esquema funciona, si en el proyecto original existe una holgura en el sistema de evacuación de humos, en caso contrario la capacidad no se puede mantener con el nuevo combustible cualquiera que sea su consumo.

En este orden de ideas el programa propone las siguientes opciones:

**1. Operar a capacidad del proyecto.** El combustible a utilizar proporciona la misma cantidad de calor que el combustible patrón, por tanto se hallan las condiciones a las cuales irá a operar el equipo con este nuevo combustible disponiendo de la misma superficie de intercambio. La igualdad de capacidad se consigue ajustando el potencial de temperatura así:

$$U_p \times A_p \times DT_p = U_i \times A_i \times DT_i$$

$$DT_p = DT_i$$

De aquí se halla la nueva temperatura de expulsión de humos y de una vez se calcula el calor aprovechado, el consumo adicional de combustible y la capacidad de expulsión de humos necesaria.

**2. Operar con el aprovechamiento térmico del proyecto equivalente.** Esto se consigue manteniendo la temperatura de expulsión de gases prevista en el proyecto original e implica una variación en el consumo del combustible y en la ca-

pacidad de la instalación, ya que la superficie de intercambio permanece constante, esta variación es igual a:

$$\frac{Q_i}{Q_p} = \frac{DT_i}{DT_p}$$

3. Operar con capacidad de expulsión de humos del proyecto original. Se conserva el área de intercambio, se halla el consumo relativo de combustible, la relación de capacidad de intercambio térmico y la temperatura de expulsión de humos.
4. Operar con consumo relativo de combustible del proyecto equivalente, conservando el área de intercambio. Se halla la nueva capacidad de intercambio térmico y la nueva temperatura de expulsión de humos.
5. Operar a diferentes capacidades. Para 70%, 75%, 80%, 90% y 110% de la capacidad del proyecto original.

## CONCLUSIONES

El programa desarrollado es una herramienta muy útil para el auditor por las siguientes razones:

Realiza los balances de masa y energía del proceso de combustión a las condiciones que ésta se realice, con base en el porcentaje de oxígeno y monóxido de carbono existentes en los gases de chimenea.

Calcula la eficiencia global y si se quiere, hace un procedimiento contable vía perfil de temperatura de los humos, el cual permite evaluar el desempeño del quemador, la cámara, el recuperador y la chimenea separadamente.

En caso que se quiera sustituir el combustible, el programa permite hacer el análisis en cuanto a: aprovechamiento térmico, consumo de combustible, área de transferencia, capacidad de expulsión de humos, con cualquier combustible para situaciones en las cuales la velocidad de transferencia de calor y la temperatura de expulsión de humos sean iguales a las de la situación original, es decir para proyectos equivalentes.



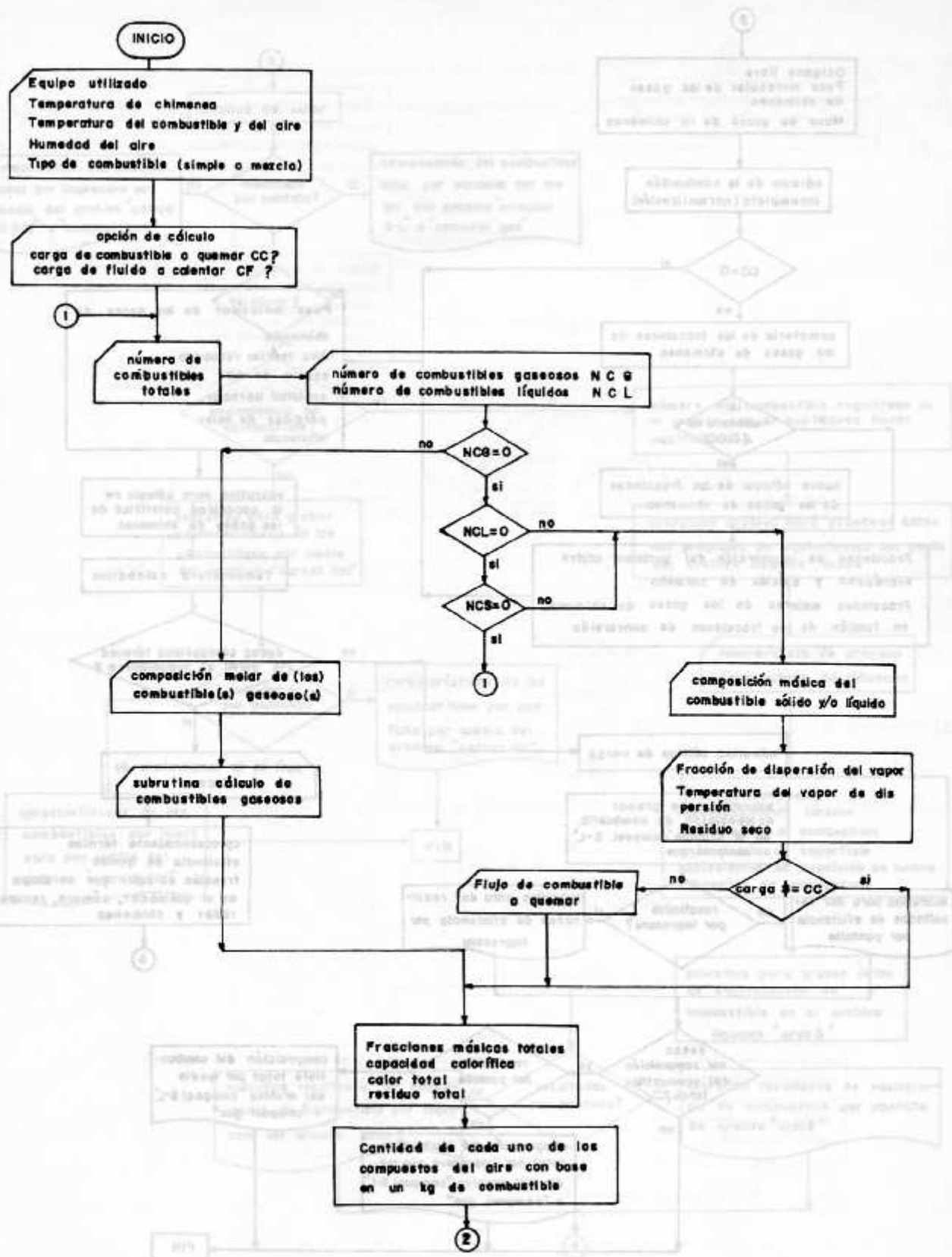


FIGURA 2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ANALISIS DE HORNOS Y CALDERAS

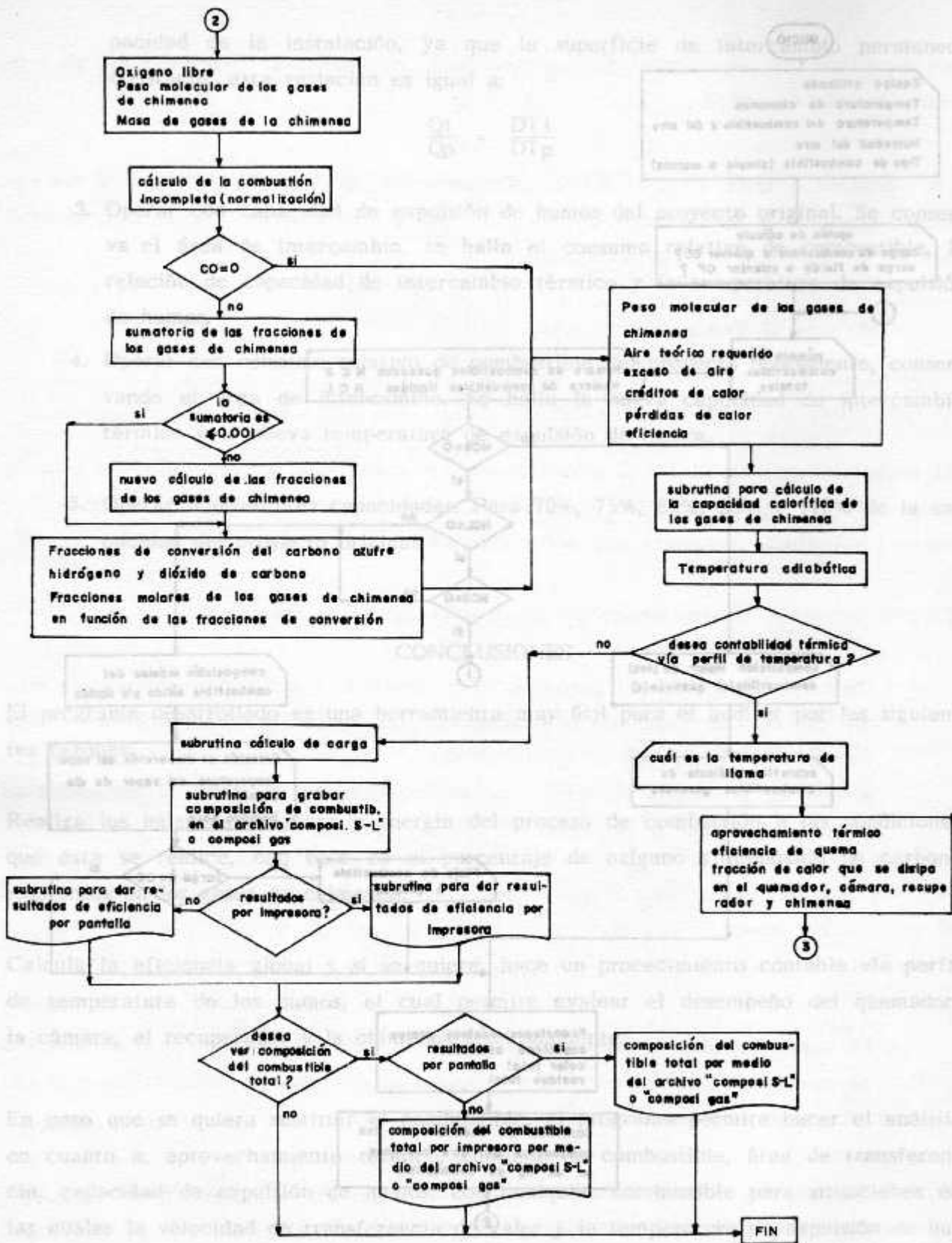


FIGURA 2 CONTINUACION

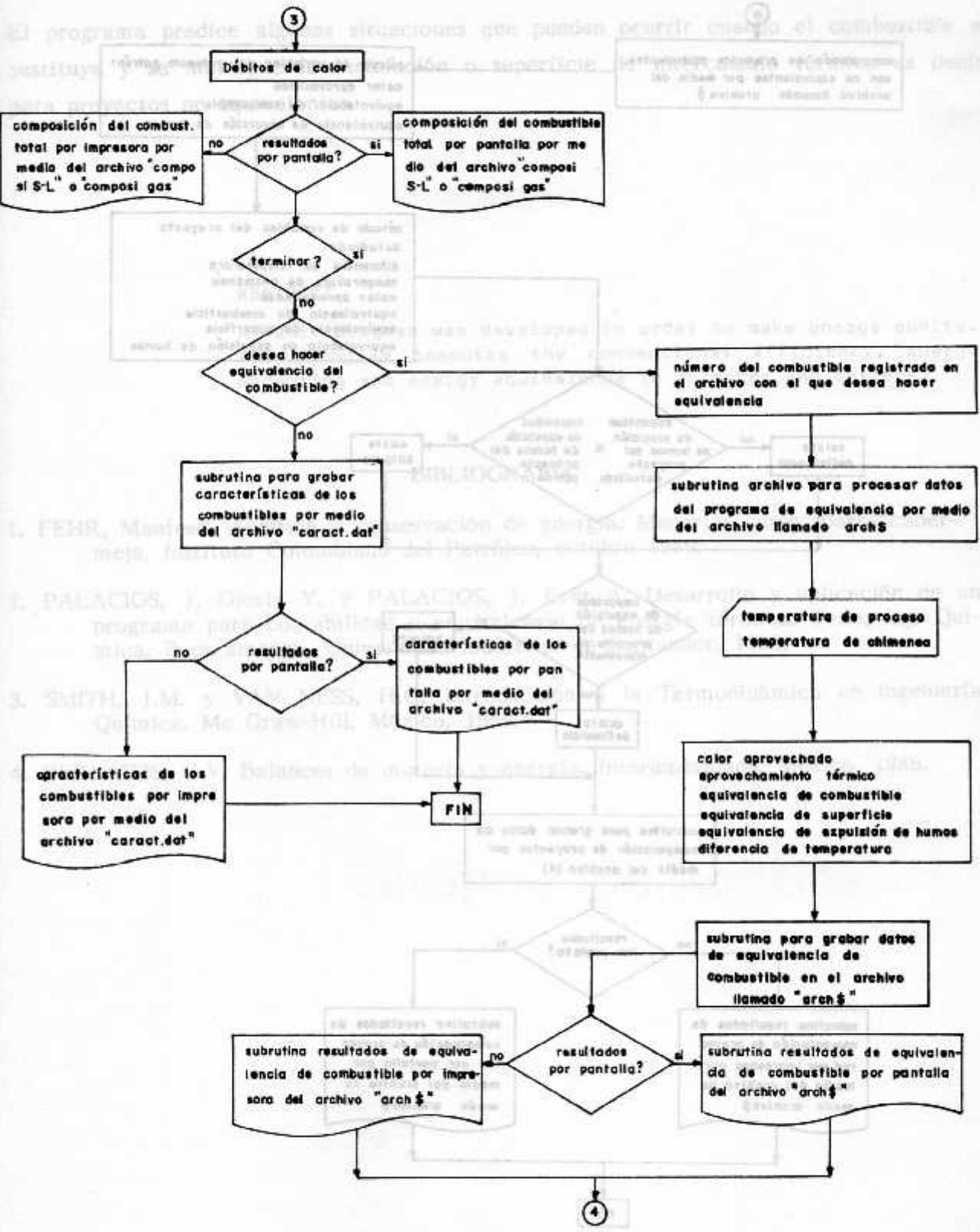


FIGURA 2 CONTINUACION

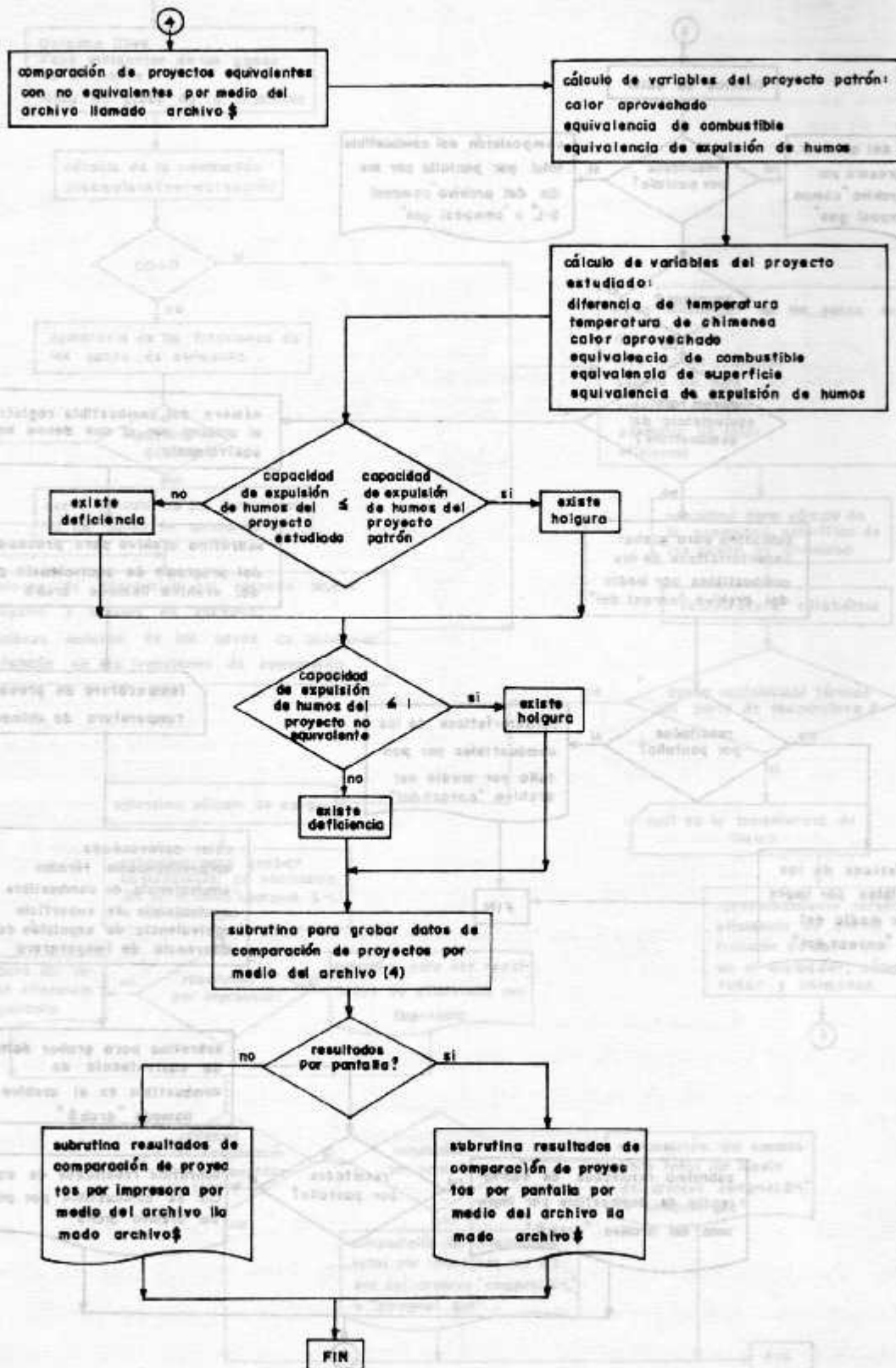


FIGURA 2 CONTINUACION

El programa predice algunas situaciones que pueden ocurrir cuando el combustible se sustituye y se mantiene la instalación o superficie de intercambio térmico es decir, para proyectos no equivalentes.

#### ABSTRACT

A basic program was developed in order to make energy audits. This program computes the conventional efficiency, energy accounting and energy equivalence in furnaces and boilers.

#### BIBLIOGRAFIA

1. FEHR, Manfred. Auditaje y conservación de energía. Menorias curso, Barrancabermeja, Instituto Colombiano del Petróleo, octubre 1986.
2. PALACIOS, J. Gloria Y. y PALACIOS, J. Ever A. Desarrollo y aplicación de un programa para contabilidad y equivalencia de energía térmica. Tesis, Ing. Química, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander, 1988.
3. SMITH, J.M. y VAN NESS, H.C. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. Mc Graw-Hill, México, 1980.
4. REKLAITIS, G.V. Balances de materia y energía. Interamericana, México, 1986.

Desarrollo de Modelos