

RESOLUCION DE UN SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES
PARCIALES DE 2° ORDEN MEDIANTE UN
METODO COMPUTACIONAL HIBRIDO

Stella Maris Udaquiola de Garcés
Instituto de Ingeniería Química
Universidad Nacional de San Juan
San Juan - Argentina

RESUMEN

Este trabajo describe una metodología desarrollada para resolver un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden por medio de un método computacional híbrido.

Este modelo ha sido diseñado para simular y realizar un análisis de sensibilidad paramétrico de un reactor de gasificación de carbón.

ABSTRACT

This paper describes a methodology devised to solve a set of 2° order partial differential equations by means of a hybrid computational method.

This model has been designed to simulate and perform a parametric sensitivity analysis of a coal gasifying reactor.

PARTE I. PRESENTACION DEL MODELO

1. Objetivo

El presente trabajo tiene como objeto describir la metodología utilizada en la resolución de un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden. El sistema al cual se aplicó esta metodología, fué desarrollado con el fin de poder simular y realizar un análisis de sensibilidad paramétrico de un reactor de gasificación de carbón de lecho fluidificado.

2. Descripción del proceso

Mediante el aprovechamiento del calor de proceso de reactores nucleares enfriados por gas se puede ahorrar la parte de carbón que en los procedimientos convencionales se quemó a fin de suministrar el calor de reacción necesario. En el desarrollo de este proceso y su correspondiente gasógeno se trabaja en la institución alemana Bergbau Forschung GmbH desde el año 1969. En la figura 1 se puede observar una vista transversal y longitudinal del reactor objeto de esta modelación. [1]

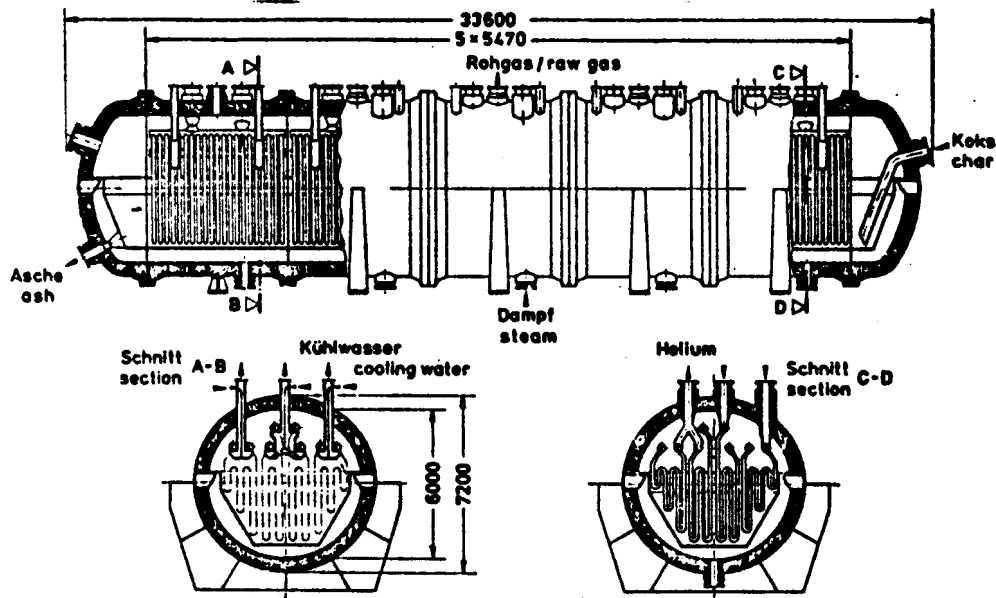


Fig. 1 Reactor de gasificación alotérmico de carbón

El reactor de gasificación consiste de un recipiente cilíndrico horizontal de una longitud de 33 m y un diámetro de 7,20 m construido en forma modular. El reactor nuclear suministra su calor en forma de Helio caliente el cual entra al reactor a una temperatura de 950°C. Luego de circular por una serie de intercambiadores de calor, llega al reactor de gasificación donde ingresa a través de un intercambiador de calor que se encuentra inmerso dentro del reactor suministrando de este modo el calor necesario para la reacción. Dentro del gasógeno en la parte inferior se encuentra una chapa perforada que cubre toda la superficie horizontal a través de la cual se inyecta el vapor de agua necesario para la gasifi-

cación.

La reacción de gas de agua heterogénea, la cual es endotérmica es la reacción principal en este proceso. Se origina de este modo una mezcla de gases que contiene H_2 , CO , CO_2 , CH_4 y pequeñas cantidades de S , N_2 e hidrocarburos superiores.

3. Principales características y simplificaciones del modelo

Se planteó un modelo matemático bidimensional, para dos fases que considera el proceso en estado estacionario. Las principales características son las siguientes: [2]

a) Los balances de materia y energía se plantean para un elemento de reactor tal como se muestra en la figura 2:

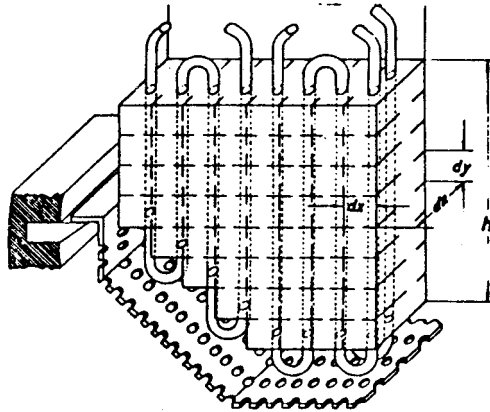


Fig 2 Representación esquemática de un sector

Este elemento o sector es el espacio comprendido entre dos paredes del intercambiador de calor. Las dos dimensiones en que se calcula son la longitud axial del reactor, z (horizontal) y la altura y del mismo (vertical).

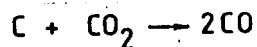
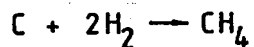
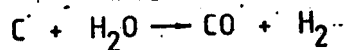
b) A los efectos de la modelación se ha dividido el contenido del sector en dos fases. La fase gaseosa, libre de sólidos y la fase heterogénea, llamada suspensión, consistente de gases y sólidos. Para la fase gaseosa se supone flujo pistón en ambas direcciones. En la suspensión se adopta mezclado perfecto en dirección y (vertical) y en la dimensión z (horizontal) se supone mezclado finito según el modelo de la dispersión.

c) La mayor parte del gas en el lecho fluido fluye en la fase gaseosa con velocidades de flujo muy por encima de la velocidad mínima de fluidización. El gas que fluye en la suspensión recorre el reactor con la velocidad mínima de fluidización.

d) Se supone transferencia de masa y calor entre las dos fases representada por el coeficiente α y β referidos a la unidad de volumen del reactor.

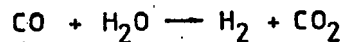
e) La reacción química es incorporada al modelo bajo dos puntos de

vista distintos: en el 1° caso se eligieron tres reacciones químicas heterogéneas las cuales son:



Como estas reacciones son heterogéneas, es decir implican la presencia de una fase sólida, se considera que la reacción química solo toma lugar en la suspensión.

La segunda alternativa que se consideró fué la de reemplazar la reacción de Boudouard por la reacción de agua homogénea y suponer que la misma alcanza en las condiciones de operación el equilibrio:



4. Modelo matemático

Teniendo en cuenta las consideraciones de 3. se plantearon los siguientes balances de materia y energía para los tres componentes clave y para las dos fases:

Para la fase gaseosa:

$$-u_{BZ} \frac{\partial x_{CO_2,b}}{\partial z} - u_{BY} \frac{\partial x_{CO_2,b}}{\partial y} - \beta S_v (x_{CO_2,b} - x_{CO_2,s}) = 0$$

$$-u_{BZ} \frac{\partial x_{CH_4,b}}{\partial z} - u_{BY} \frac{\partial x_{CH_4,b}}{\partial y} - \beta S_v (x_{CH_4,b} - x_{CH_4,s}) = 0$$

$$-u_{BZ} \frac{\partial x_{H_2O,b}}{\partial z} - u_{BY} \frac{\partial x_{H_2O,b}}{\partial y} - \beta S_v (x_{H_2O,b} - x_{H_2O,s}) = 0$$

$$-u_{BZ} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial z} - u_{BY} \rho C_p \frac{\partial T_b}{\partial y} + \alpha S_v (T_b - T_s) + K_{W/b} S_{v1} (T_w - T_b) = 0$$

$$x_{i,b} = x_{i,b}^{\circ} \quad \text{für} \quad y = 0 \quad \text{und alle } Z$$

$$T_b = T_b^{\circ} \quad \text{für} \quad y = 0 \quad \text{und alle } Z$$

Para la fase suspensión:

$$\begin{aligned}
 -D_z \frac{\partial^2 x_{\text{CO}_2,s}}{\partial z^2} - u_{\text{SZ}} \frac{\partial x_{\text{CO}_2,s}}{\partial z} + \beta S_v (x_{\text{CO}_2,b} - x_{\text{CO}_2,s}) - \rho_{\text{WB}} \frac{RT}{M_c P} \cdot r_{\text{BOU}} &= 0 \\
 -D_z \frac{\partial^2 x_{\text{CH}_4,s}}{\partial z^2} - u_{\text{SZ}} \frac{\partial x_{\text{CH}_4,s}}{\partial z} + \beta S_v (x_{\text{CH}_4,b} - x_{\text{CH}_4,s}) + \rho_{\text{WB}} \frac{RT}{M_c} \cdot r_{\text{HYD}} &= 0 \\
 -D_z \frac{\partial^2 x_{\text{H}_2\text{O},s}}{\partial z^2} - u_{\text{SZ}} \frac{\partial x_{\text{H}_2\text{O},s}}{\partial z} + \beta S_v (x_{\text{H}_2\text{O},b} - x_{\text{H}_2\text{O},s}) - \rho_{\text{WB}} \frac{RT}{M_c P} \cdot r_{\text{WAS}} &= 0 \\
 -\lambda_{\text{eff}} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} - u_{\text{SZ}} \rho C_p \frac{\partial T_s}{\partial z} - \alpha S_v (T_b - T_s) + K_{\text{W/S}} S_{v1} (T_w - T_s) + \left(-\sum_{i=1}^3 \Delta H_i \cdot r_i \right) &= 0
 \end{aligned}$$

$$x_{i,s} = x_{i,s}^{\circ} \quad \text{für} \quad y = 0 \quad \text{und alle } z \qquad T_s = T_s^{\circ} \quad \text{für} \quad y = 0 \quad \text{und alle } z$$

$$\frac{dx_{i,s}}{dz} = 0 \quad \text{für} \quad \begin{cases} z = 0 \\ z = z_e \end{cases} \quad \text{und alle } y \qquad \frac{dT_s}{dz} = 0 \quad \text{für} \quad \begin{cases} z = 0 \\ z = z_e \end{cases} \quad \text{und alle } y$$

5. Descripción matemática del sistema de ecuaciones

El modelo desarrollado es un modelo de dos fases, bidimensional que consta de 8 ecuaciones diferenciales parciales. Para la fase gaseosa y para la fase suspensión se tienen 4 ecuaciones respectivamente, 3 ecuaciones para los perfiles de concentración de los componentes clave CO_2 , CH_4 y H_2O y una cuarta ecuación para el perfil de temperatura en el reactor.

Las ecuaciones para la fase gaseosa y para la fase suspensión están acopladas a través del término de transferencia de masa entre las fases. Los balances de masa y energía para las respectivas fases están a su vez acopladas entre ellos a través del término de velocidad de reacción.

Las ecuaciones de la fase gaseosa forman un sistema de ecuaciones diferenciales parciales de primer orden. Para la fase suspensión por el contrario debido a que se supone retromezclado en la dirección z , se tiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de segundo orden de tipo parabólico.

En el caso de la fase gaseosa se tiene un problema de valores iniciales ya que los valores de entrada para las concentraciones de los componentes clave y para la temperatura son conocidos. Para la fase suspensión el sistema de ecuaciones representa un problema mixto de condiciones límite y condiciones iniciales ya que además de conocerse los valores iniciales de las variables, se tienen los valores de las derivadas primeras en el contorno del elemento de volumen.

6. Método matemático utilizado

El tratamiento analítico de ecuaciones diferenciales parciales es en la mayoría de los casos muy complicado y de larga duración y también la programación de los procedimientos numéricos en computadoras digitales está ligada a un elevado consumo de tiempo. Por lo tanto es práctico utilizar un método que permita la solución de estas ecuaciones en una computadora analógica.

Debido a que en una computadora analógica se dispone de una sola variable independiente, el tiempo, es necesario una transformación de las ecuaciones diferenciales parciales en ecuaciones diferenciales ordinarias. Para ello hay diferentes caminos posibles:

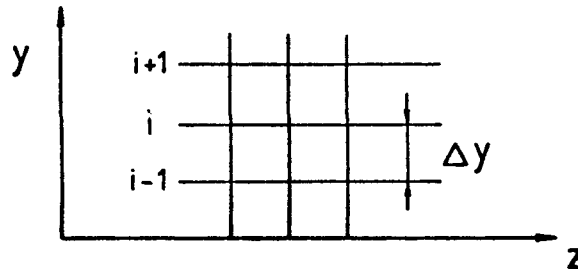
1. A menudo se pueden llevar las ecuaciones diferenciales parciales lineales a ecuaciones diferenciales ordinarias por medio de una separación de variables. Ya que para una o varias de ellas hay que resolver un problema de valores propios y a partir de las funciones propias hay que construir la solución del problema, es este procedimiento demasiado engorroso. Solo se justifica realizarlo cuando exista interés en conocer los valores propios del problema.

2. Otra posibilidad consiste en aproximar las ecuaciones diferenciales parciales por medio de un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias. A este fin se considera la función en puntos discretos, bien determinados del rango, en los cuales se busca la solución como función de una variable. Las derivadas parciales según esta variable se transforman en derivadas totales debido a que se mantienen constantes las otras coordenadas. Las derivadas parciales respecto de las coordenadas constantes se aproximan mediante cocientes de gradientes. De este modo se tiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias cuya solución se puede obtener en la computadora analógica.

Hay una serie de métodos que se basan en esta segunda posibilidad, y que permiten la solución híbrida de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales. En este trabajo, se usó el método CSDT (Continuous Space Discrete Time), según el cual se discretizan las derivadas con respecto a la coordenada y y las derivadas con respecto a z permanecen como tales. Se realiza el reemplazo de las derivadas por los cocientes de gradientes según las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial x_j}{\partial y} \cong \frac{x_j^{i+1} - x_j^i}{\Delta y} \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{T^{i+1} - T^i}{\Delta y}$$

donde los índices $i+1$ e i tienen el siguiente significado:



7. Estrategia de solución

A los fines de implementar la solución, se divide el reactor en sectores, donde el sector se considera según la definición realizada en 3. El cálculo en dirección axial (coordenada z) se realiza a través de la computadora analógica. En el primer paso se calculan todos los coeficientes de las ecuaciones para las condiciones iniciales en la computadora digital y se transfieren luego a la analógica. Después que la computadora analógica ha calculado el primer nivel, se transfieren a la computadora digital la concentración de la mezcla gaseosa y temperatura obtenidas. Se recalculan en la computadora digital todos los coeficientes en función de las concentraciones y de las temperaturas calculadas en el paso anterior y se transfieren por medio de conversores digital-analógicos a la computadora analógica. Así, con estos nuevos coeficientes se calcula el nivel siguiente en la dirección z con ayuda de la computadora analógica. Este procedimiento se repite hasta que se completa toda la altura del sector.

Una vez que se ha calculado todo el sector, se calcula con ayuda de los valores obtenidos, la masa de carbón que queda y luego se calcula el segundo sector y así sucesivamente se prosigue con todos los sectores. Se toman 15 niveles en la dirección y y 125 sectores que completan la longitud z del reactor.

Por cada punto en la red de coordenadas, se calculan 6 concentraciones y 2 temperaturas: las concentraciones de los componentes clave (CH_4 , CO_2 , H_2O) en las dos fases, así como la temperatura de la fase burbuja y la temperatura de la fase suspensión. Con ayuda de las concentraciones de los componentes clave se calculan los otros componentes es decir de CO , H_2 y C . De este modo se calculan los perfiles de concentración de todos los componentes en las fases. Como es importante conocer la concentración total del gas, se utiliza para cada componente, la siguiente expresión:

$$X_{i,g} = f_B \cdot X_{i,b} + f_s X_{i,s}$$

donde f_b y f_s son las fracciones respectivas en la fase gas y en la fase suspensión. f_b y f_s se calculan para cada nivel de altura en el reactor lo que permite la determinación de una concentración global para cada componente en cada punto del reactor.

Para la obtención de una temperatura en el lecho fluidificado se toma el promedio aritmético entre la temperatura de la fase gaseosa o burbuja y la temperatura de la fase suspensión. Haciendo uso de estos valores, se puede calcular el grado de conversión del carbón y asimismo el rendimiento de la gasificación y consumo de vapor de agua.

PARTE II. SIMULACION HIBRIDA

1. Descripción de la computadora híbrida

Para la realización de la simulación se utilizó una computadora híbrida la cual cuenta con los siguientes elementos:

- Una computadora digital, tipo PDP 11/34 de l. firma DIGITAL con memoria ampliada, 128 KW. A esta computadora se le acopla una terminal gráfica VT100 de la firma DIGITAL así como también un plotter.

- Dos computadoras analógicas DO80 de la firma Dornier. Ambas trabajan con una tensión de referencia de ± 10 V y pueden conectarse para operar en el modo Master-slave lo que significa que una de ellas trabaja como computadora accesoria de la otra.

-Interfase CAMAC. El intercambio de información entre las computadoras analógicas y digital se realiza a través de la interfase CAMAC. Está construida en base a módulos y la transferencia de datos entre estos módulos y la computadora digital es regulado por el controlador de la interfase. Este controlador permite "transferir" palabras de 16 bits o de 24 bits en ambas direcciones.

2. Programas y subprogramas

a) Programa híbrido

El cálculo del sistema de ecuaciones se realiza mediante el procedimiento que se visualiza en la figura 3:

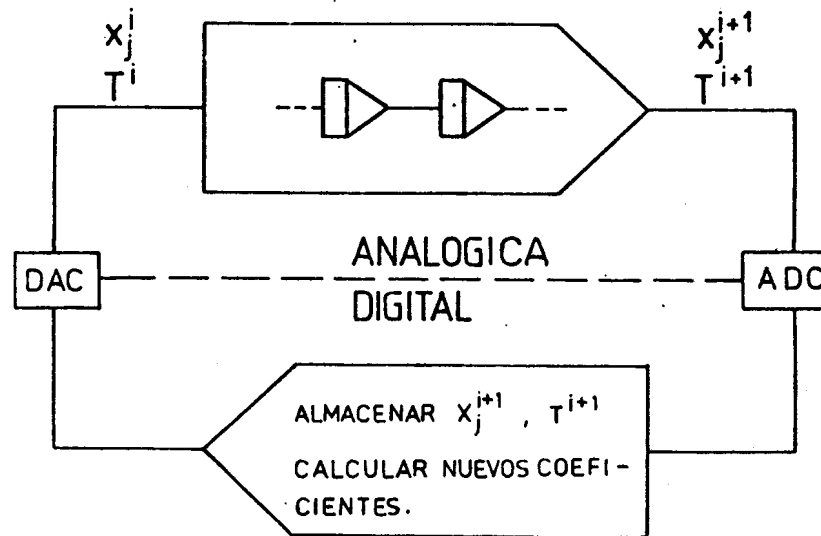


Fig 3 Esquema híbrido utilizado

El proceso de cálculo descrito en 7. se realiza por medio de un programa principal y varios subprogramas los cuales llevan a cabo las distintas operaciones digitales y analógicas. En la figura 4 se observa un diagrama de flujo simplificado con los distintos pasos de la simulación.

Desde el programa principal se solicitan dos tipos distintos de subprogramas, por un lado los que realizan el cálculo de funciones y coeficientes y por otro lado el control de los distintos componentes de la interfase así como de la computadora analógica.

Para poder conocer y almacenar cada valor que la analógica calcula en el intervalo de tiempo fué necesario diseñar un circuito electrónico que permite parar la computadora analógica luego de un determinado periodo de tiempo, transferir el valor obtenido hasta ese momento a la compu-

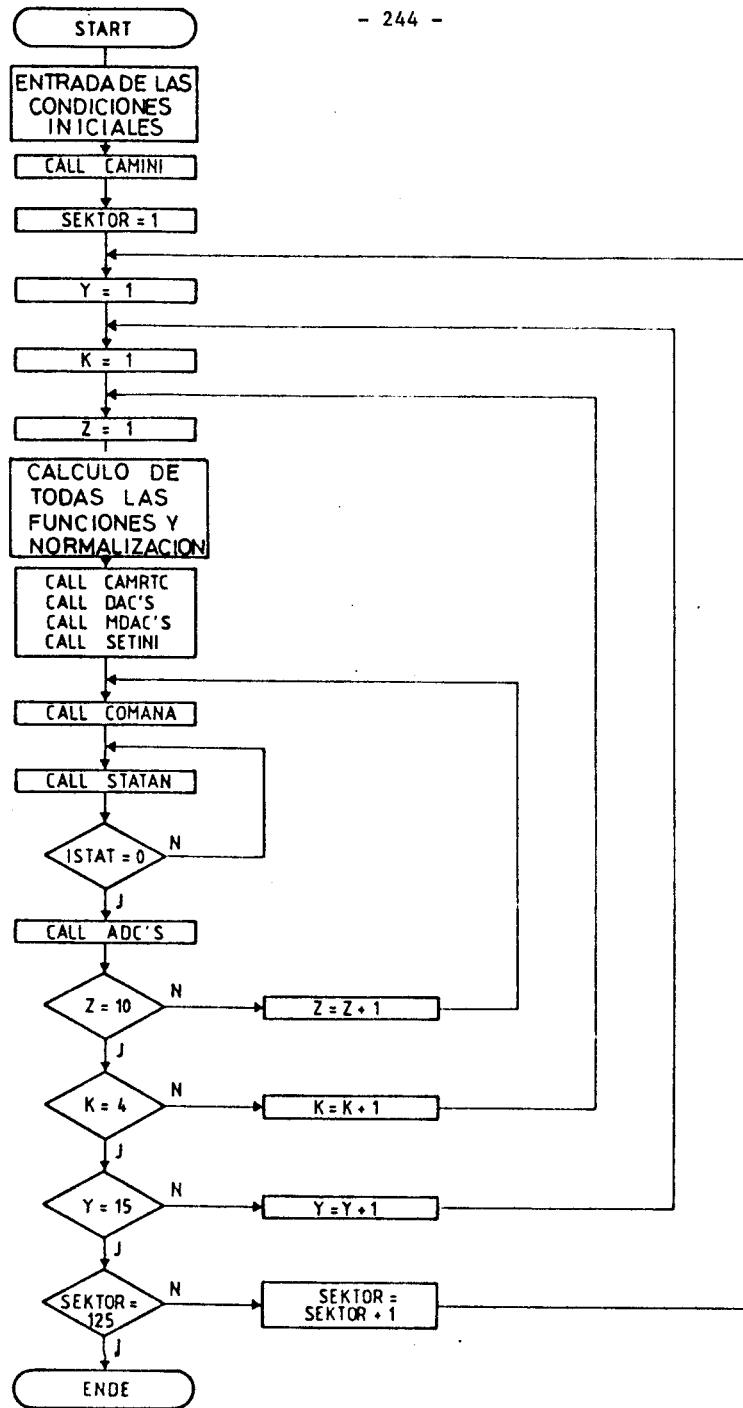


Fig 4 Diagrama de flujo simplificado

tadora digital y luego continuar el cálculo.

Los siguientes subprogramas realizan la transferencia de datos desde y hacia la computadora analógica así como su control:

CAMINI: este subprograma inicializa la interfase CAMAC, es decir que todas las líneas se fijan a cero para que pueda comenzar un nuevo ciclo de transferencia de datos.

CAMRTC: Con él se inicializa el reloj de tiempo real (Real Time Clock). Se transmiten dos argumentos, la frecuencia del reloj y el intervalo de tiempo. Del producto de estos dos valores, se obtiene el tiempo durante el cual la computadora puede calcular hasta que sea parada e interrogada. Este intervalo de tiempo está en relación con el factor de escala, el cual se determina a partir de los coeficientes calculados. Esto significa que el intervalo de tiempo es una función de la posición vertical y en el reactor.

SETINI: Coloca a la computadora analógica en el modo de condición inicial antes de comenzar un nuevo ciclo de cálculo.

COMANA: Este subprograma pone en funcionamiento a la computadora analógica, es decir que comienza a calcular un nuevo ciclo o bien continúa el cálculo.

STATAN: Averigua el status de la computadora analógica y de acuerdo a la respuesta, continúa calculando o espera hasta que la analógica esté lista.

MDASB: Realiza la transferencia de valores digitales a través de convertidores multiplicadores digitales-analógicos.

DAC8A-DAC9A, DAC10A-DAC10B: Con ayuda de estos subprogramas se produce la transformación de valores digitales a tensiones analógicas y son enviados a la computadora analógica.

ADC22A-ADC22B-ADC22C: realizan la transformación de los valores analógicos a digitales y envían estos valores a la computadora digital.

Todos estos subprogramas están escritos en MACRO 11 debido a la mayor velocidad con que trabajan en comparación con FORTRAN.

b) Programa o circuito analógico

En general, las magnitudes que aparecen en el modelo matemático no puede usarse así directamente como variables de máquina. Todas las magnitudes que aparecen en el modelo no deben sobrepasar la barrera del valor 1. Es por esta razón que tanto la variable dependiente como independiente deben someterse a una transformación de escala.

Para la temperatura se realiza la siguiente transformación:

$$\Theta = \frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0}$$

T_0 : valor mínimo de la temperatura
 T_{\max} : valor máximo de la temperatura

Para la variable independiente se realiza la siguiente transformación:

$$\epsilon = \lambda \cdot z \quad (3)$$

λ es un factor de escala que se determina a partir de la normalización de los coeficientes. Como los coeficientes no son constantes, serán calculados para cada nivel en el reactor, z es en este caso la variable independiente del problema. Como la composición del gas está expresada en fracciones molares y éstas por definición varían entre 0 y 1, no hace falta una normalización.

Para poder resolver el sistema de ecuaciones en la computadora analógica, se deben realizar algunas transformaciones. En primer lugar, los coeficientes deben agruparse por variables. Al mismo tiempo se deben plantear las ecuaciones de tal modo que solo se presenten las operaciones que pueden ser resueltas por la computadora analógica. Luego deben ordenarse los diferentes términos de manera que el término con la derivada de mayor grado se coloque a la izquierda mientras que el resto se traslada al lado derecho del signo igual. Como último paso, previo al diseño del circuito analógico, deben escalarse las ecuaciones. [3]

$$B^*(K,1) \frac{dx_{j,b}^{i+1}}{dz} = -B^*(K,2) x_{j,b}^{i+1} + B^*(K,3) x_{j,s}^{i+1} + B^*(K,4)$$

$$B^*(K,1) \frac{d\theta_b^{i+1}}{dz} = -B^*(K,2) \theta_b^{i+1} - B^*(K,3) \theta_s^{i+1} + B^*(K,4) \quad (4)$$

für $j = \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}$
 $K = 1,4$

$$S^*(K,1) \frac{d^2 x_{j,s}^{i+1}}{dz^2} = S^*(K,2) \frac{dx_{j,s}^{i+1}}{dz} - S^*(K,3) x_{j,s}^{i+1} + S^*(K,4) x_{j,b}^{i+1} + S^*(K,5)$$

$$S^*(K,1) \frac{d^2 \theta_s^{i+1}}{dz^2} = S^*(K,2) \frac{d\theta_s^{i+1}}{dz} - S^*(K,3) \theta_s^{i+1} - S^*(K,4) \theta_b^{i+1} + S^*(K,5) \quad (5)$$

für $j = \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}$
 $K = 1,4$

Los sistemas (4) y (5) son los sistemas de ecuaciones ya transformados para la fase burbuja y para la fase suspensión, previo al cambio de escala. Los coeficientes $B^*(K,L)$ y $S^*(K,L)$ para $K=1,4$ y $L=1,5$ representan los coeficientes agrupados de los sistemas en forma matricial. Como en la solución analógica, estos coeficientes deben tomar valores entre 0 y 1 debe efectuarse una normalización. Esta normalización se lleva a cabo transformando la variable z según (3). Esta transformación tiene como objeto expresar las ecuaciones en función del tiempo que es la única variable independiente que dispone la computadora analógica. El factor de escala λ se iguala al coeficiente de mayor valor y todos los coeficientes se dividen por λ . Para tener el coeficiente del lado izquierdo igual a 1, se dividen todos

los coeficientes por el primero. Al realizar este paso, se obtienen los sistemas definitivos (6) y (7) que ahora pueden ser programados.

$$\frac{dx_{j,b}^{i+1}}{d\varepsilon} = -B(K,2)x_{j,b}^{i+1} + B(K,3)x_{j,s}^{i+1} + B(K,4)$$

$$\frac{d\theta_b^{i+1}}{d\varepsilon} = -B(K,2)\theta_b^{i+1} - B(K,3)\theta_s^{i+1} + B(K,4)$$

$$j = \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{H}_2\text{O} \quad (6)$$

$$K = 1,4$$

$$\frac{d^2x_{j,s}^{i+1}}{d\varepsilon^2} = S(K,2)\frac{dx_{j,s}^{i+1}}{d\varepsilon} - S(K,3)x_{j,s}^{i+1} + S(K,4)x_{j,b}^{i+1} + S(K,5)$$

$$\frac{d^2\theta_s^{i+1}}{d\varepsilon^2} = S(K,2)\frac{d\theta_s^{i+1}}{d\varepsilon} - S(K,3)\theta_s^{i+1} + S(K,4)\theta_b^{i+1} + S(K,5)$$

$$j = \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}$$

$$K = 1,4$$

(7)

$$B(K,L) = \frac{B^*(K,L)}{\lambda \cdot B^*(K,1)}$$

$$S(K,L) = \frac{S^*(K,L)}{\lambda \cdot S^*(K,1)}$$

Circuito analógico

Existen dos posibilidades de programación analógica de los sistemas (6) y (7). Si se dispone de número suficiente de multiplicadores y conversores analógico-digital y digital-analógicos y conversores multiplicadores, es posible resolver simultáneamente el sistema total. Para ello serían necesarios 24 conversores digital-analógico, 16 conversores multiplicadores digital-analógico y 4 multiplicadores. Como sólo se disponía de 16 conversores digital-analógico y 4 conversores multiplicadores, se resolvió el problema en forma seriada, es decir, que el circuito desarrollado resuelve los sistemas para las dos fases simultáneamente en el siguiente orden: CO₂, CH₄, H₂O y temperatura. Al utilizar esta metodología, se requieren solo 6 DAC, 4 MDAC, 3ADC y 1 multiplicador.

La desventaja de este procedimiento es el tiempo de cálculo que resulta multiplicado por 4. En la figura 4 se puede observar el circuito desarrollado, en el cual el 1° integrador resuelve la primera derivada de las ecuaciones de la fase burbuja y el 2° y el 3° respectivamente la 2° y 1° derivada de la fase suspensión.

En la subrutina PRANDT se calculan todas aquellas propiedades de los gases y carbón como por ej. densidad, viscosidad, capacidad calorífica, etc. en función de la composición y temperatura.

Con el empleo de estos valores se calculan en la subrutina FLOW todos los parámetros fluidodinámicos del sistema como por ej. velocidad mínima de fluidización, fracción de vacío, densidad de lecho fluido, altura de lecho fluido, etc.

Estos datos son entonces transferidos al subprograma KENSUB y se calculan todos los números adimensionales y los coeficientes de transferencia de masa y calor.

En el subprograma KINETI se calculan todos los parámetros cinéticos en función de las concentraciones de los componentes gaseosos y de la temperatura.

Una vez que el circuito analógico ha transmitido sus resultados parciales se retransforman los valores y se recalculan la composición del gas global y con ella se calcula el grado de conversión de carbón y a partir de éste, la masa residual de carbón de la cual dispone el siguiente sector.

PARTE III. RESULTADOS DE LA SIMULACION

Los resultados de la simulación se presentan, por un lado, en forma de gráficos tridimensionales que presentan la variación de la concentración de todos los componentes del sistema con las dos dimensiones del reactor y también el perfil de temperatura en el reactor. En el presente trabajo se presenta a modo ejemplificativo, las concentraciones de CO_2 , CO , el consumo de vapor de agua y la temperatura en las figuras 6, 7, 8 y 9

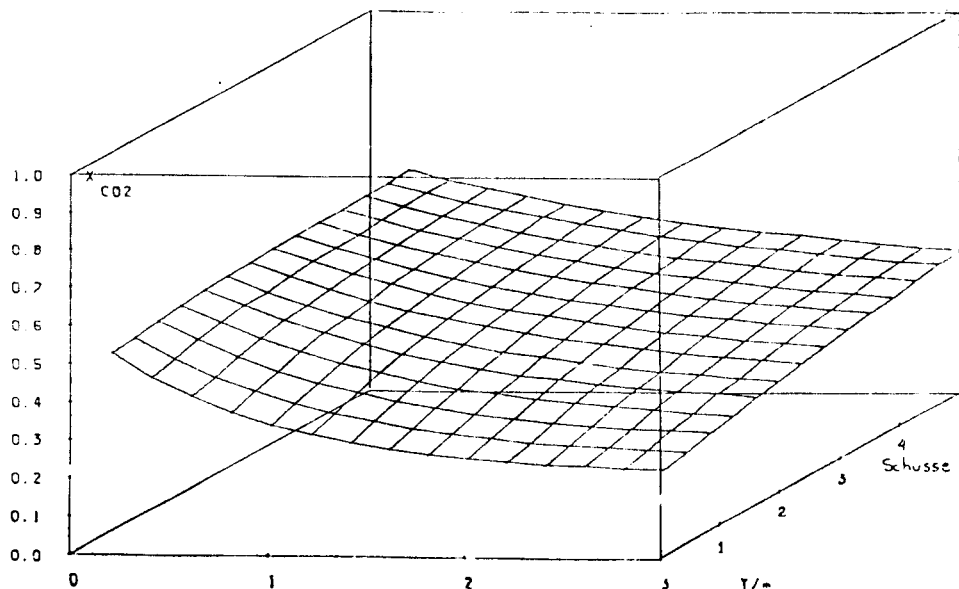


Fig. 6 Variación de la concentración de CO_2

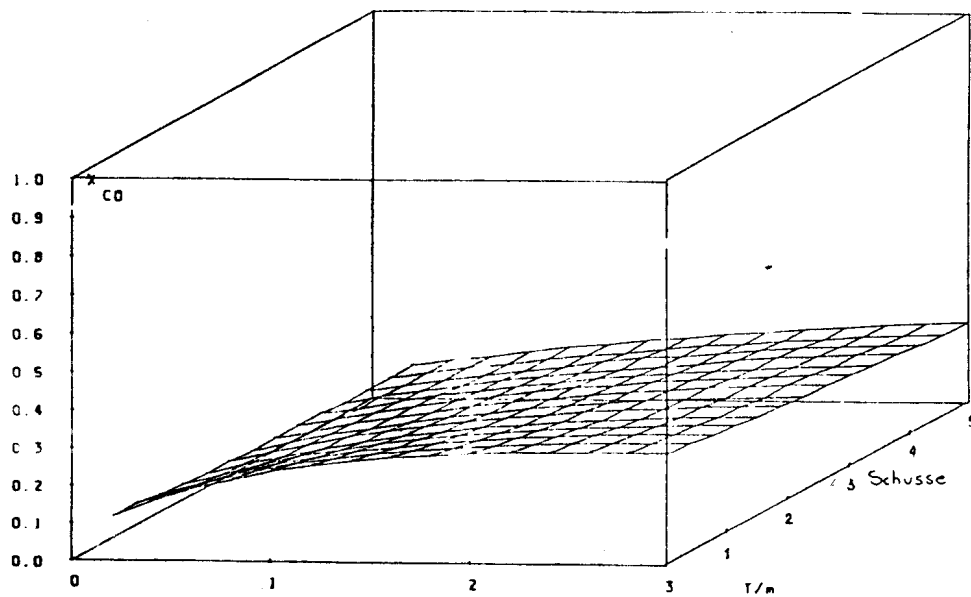


Fig 7 Variación de la concentración de CO

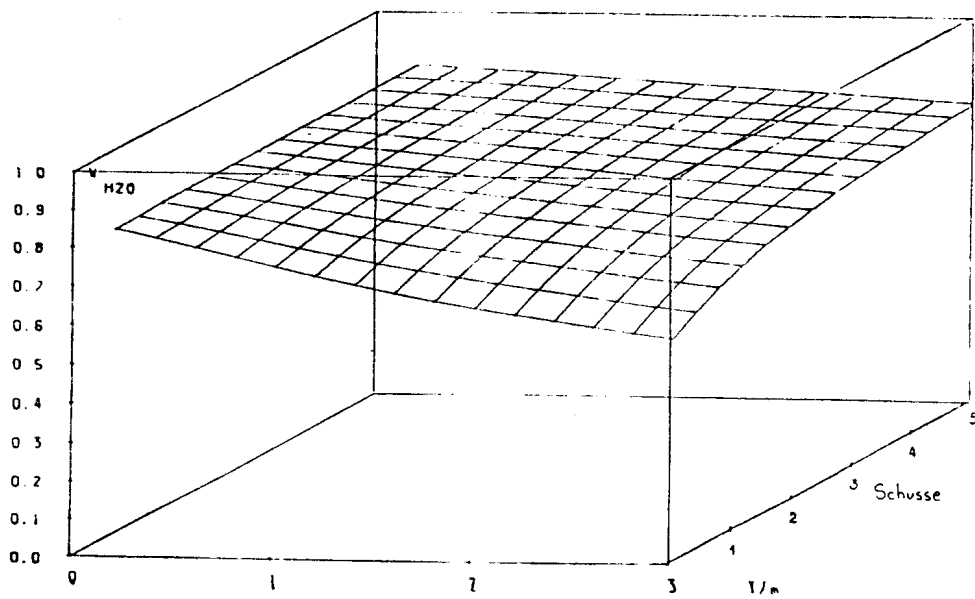


Fig 8 Variación del consumo de vapor de agua

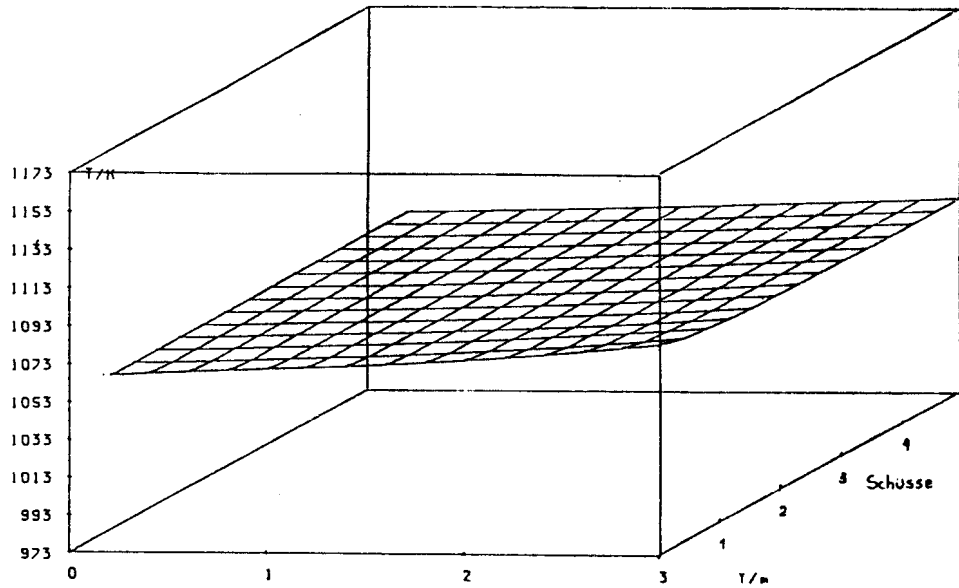


Fig 9 Variación de la temperatura

En la figura 10 se graficó en función de la altura del reactor las concentraciones de todos los componentes gaseosos en base seca y la concentración del vapor de agua.

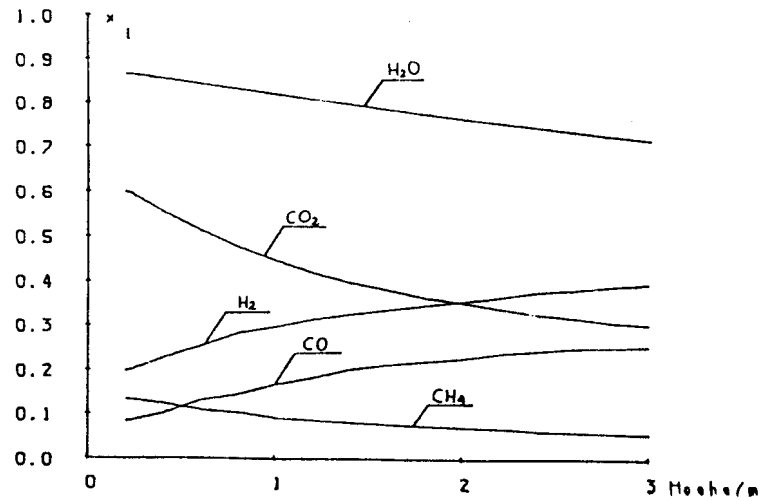


Fig 10 Concentración de la mezcla gaseosa en función de la altura del reactor

Por último se realizó un análisis de sensibilidad del reactor, tomando el grado de conversión del carbón en función de la longitud del reactor para distintos valores de los parámetros operativos: velocidad de flujo de entrada de vapor de agua, velocidad de flujo de entrada de carbón, temperatura de entrada del agua, temperatura de entrada de carbón y la composición del gas de entrada gasificante. (fig. 11)

Los distintos casos analizados son:

1. Condiciones standard
2. Disminución de la velocidad de flujo másico de entrada de carbón
3. Disminución de la velocidad de flujo másico de entrada de H_2O
4. Aumento de la temperatura de entrada del carbón
5. Disminución de la temperatura de entrada de carbón
6. Disminución de la temperatura de entrada de H_2O
7. Composición del gas de entrada: H_2 : 25%, CO : 10%, H_2O : 55%, CO_2 : 15%, CH_4 : 5%

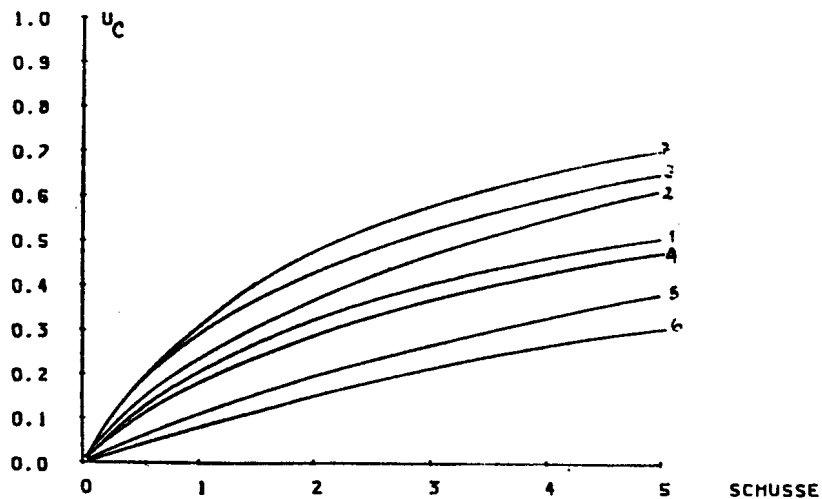


Fig 11 Análisis de sensibilidad

REFERENCIAS

- 1 van Heek, K.H., Juntgen, H., Peters, W., Atomenergie/Kerntechnik 40, 1982, pag 225.
- 2 Udaquiola de Garcés, Stella Maris, "Zweidimensionales, zweiphasiges Modell zur hybriden Simulation der allothermen Wasserdampfvergasung von Steinkohlen in der Wirbelbettrinne.", Disertación doctoral, 1984, Aachen, RFA.
- 3 Heinhold, J.H., Kulisch, U., "Analogrechnen", Bibliographisches Institut AG, Mannheim, 1969.