

# Construcción de un fermentador para operación en estado sólido y diseño de sistemas de control

Dentro de las alternativas para tratar la pulpa de café, la fermentación en estado sólido ha sido la más ampliamente estudiada, en procesos como el compost, el ensilaje y más recientemente buscando emplearla como suplemento para alimentación animal, dado el contenido alto de proteína que posee la pulpa (11). Sin embargo, sobre este tipo de fermentación la información no es muy amplia y los equipos para estudios confiables y reproducibles son muy escasos. Por esta razón se emprendió el diseño y construcción de un equipo para fermentación en estado sólido, con el apoyo de la Organización de Estados Americanos (OEA) y la Universidad Nacional. Este trabajo apunta a reforzar y apoyar la línea de investigación que sobre Tratamiento de Subproductos Agroindustriales adelanta el Grupo de Biotecnología de la Universidad Nacional.

**GUSTAVO BUITRAGO H.**  
Ingeniero Químico  
Profesor Asistente,  
Departamento de Ingeniería Química

**PATRICIA OSPINA M.**  
Ingeniera Química

**JOSE RAUL RENGIFO L.**  
Ingeniero Químico

La fermentación en estado sólido (FES) hace referencia a los tipos especiales de procesos biológicos que involucran el crecimiento de microorganismos sobre materiales en ausencia de líquido libre. La FES necesita de un nivel de humedad que varía entre un mínimo de 12%, abajo del cual cesa toda actividad biológica y una máxima, dependiendo del sustrato por tratar, que fluctúa entre 40 y 80%.

El proceso de FES tiene en la actualidad tres líneas de acción:

- La transformación de sustratos para obtener alimentos en general.
- La obtención de productos químicos o farmacológicos, que pueden ser difíciles o costosos de procesar usando otras alternativas.
- El tratamiento de desperdicios sólidos, como vía para disminuir el nivel de contaminación ambiental.

Por otro lado, en el proceso de beneficio del café se obtiene la pulpa (40%, en peso, del fruto) que, dado el volumen de producción en el país, un millón de toneladas de grano seco/año, ocasiona serios inconvenientes por contaminación ambiental. Esta pulpa posee un contenido de proteína del 12% (11).

En la Universidad Nacional, Seccional Bogotá, en el Departamento de Química de la Facultad de Ciencias, se iniciaron en 1975, investigaciones por parte de un grupo de Profesores encabezado por Elizabeth de Leal y Martha Roza, tendientes a evaluar metodologías que permitan adecuar la pulpa para alimentación animal, buscando retirar factores antinutricionales presentes en la pulpa de café. Se ha realizado una serie de trabajos de tesis de Grado en la Universidad Nacional (6, 7, 8, 11) relativos al proceso y al diseño del equipo apropiado para el mismo.

## CARACTERISTICAS DEL EQUIPO PARA FERMENTACION EN ESTADO SOLIDO

El equipo diseñado será utilizado básicamente en investigación, por lo que proporciona las siguientes

tes características:

- Flexibilidad para realizar todo tipo de FES.
- Garantizar el desarrollo uniforme del microorganismo en el sustrato por medio de agitación.
- Permitir operación aséptica garantizando el crecimiento, únicamente del microorganismo en estudio.
- Proporcionar control de las variables críticas de la fermentación como humedad y temperatura del aire.

Para lograr esto se diseñaron y construyeron las siguientes unidades: una de esterilización del equipo, otra de acondicionamiento del aire y la última para el control de variables. El presente trabajo tiene dos objetivos básicos:

- Construcción y ensamble del equipo.
- Diseño de los sistemas de control.

**CONSTRUCCION Y ENSAMBLE DEL EQUIPO**

El esquema del sistema de fermentación (Figura 1), es el propuesto en un trabajo anterior (6), con algunas modificaciones derivadas de la revisión del diseño original (9). La unidad de esterilización, consta de una resistencia que calienta aire, el cual se hace fluir por el equipo, antes de iniciar la fermentación. Se busca alcanzar una temperatura de 150°C aproximadamente, y mantenerla por 30 minutos. Las características de esta resistencia de esterilización (Re), se encuentran en la Tabla 1.

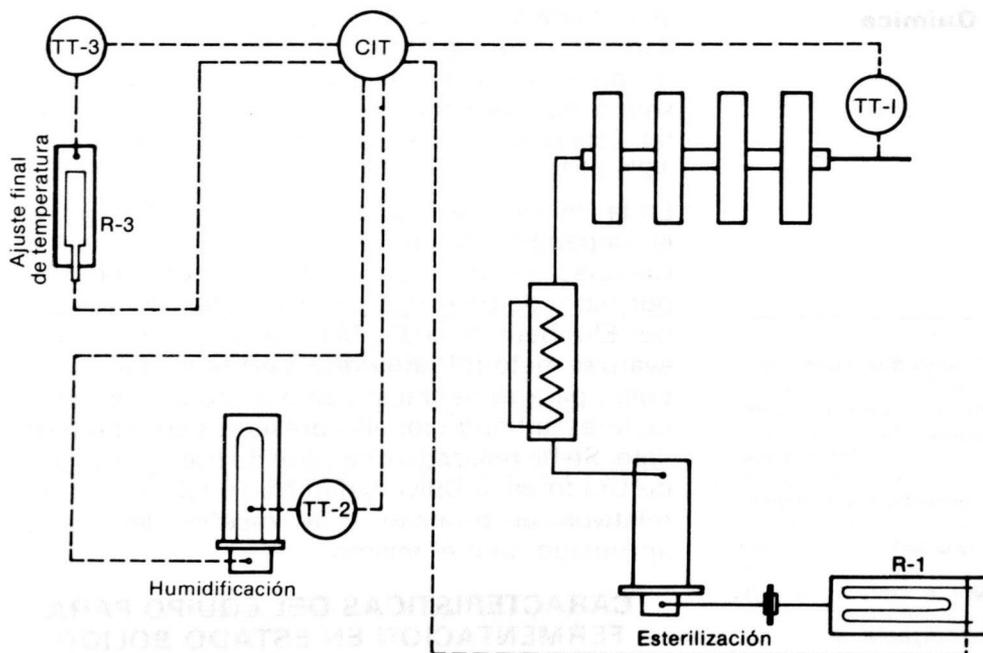
La unidad de acondicionamiento del aire consta

**TABLA 1.**  
**Características de las resistencias**

Resistencia	Re	Rh	Rca
Tipo X	Resistencia "U"	de inmersión en "U"	Tubular
Potencia máx. (Watts)	2000	800	100
Voltaje de Línea (Volts)	110	220	110
Resistencia (ohmios)	6.05	60.5	121
Longitud (cms.)	25	50	25
Instalación	Tubería de 1" nominal	En columna de humidific.	Tubería 1" nominal

de un tanque o columna de burbujeo y dos resistencias eléctricas. En la columna se tendrá agua previamente purificada, hasta una altura suficiente para cubrir una resistencia encargada de calentar el sistema de humidificación, hasta la temperatura de operación. Por el fondo de la columna, se burbujea aire, previamente purificado por un filtro empacado o en lana de vidrio, ubicado después de la resistencia de esterilización y antes de la columna. La segunda resistencia se utiliza para ajustar el porcentaje de saturación del aire, llevando a cabo un calentamiento a humedad relativa constante. Las especificaciones de la columna de humidificación son:

- Diámetro del cuerpo de la columna: 3 1/2".
- Altura: 0.42 m.
- Diámetro nominal de las tuberías de salida del



- F Filtro
- R Rotámetro
- H Columna de humidificación
- TP Sistema de transmisión de potencia
- Rc Resistencia para esterilización
- Rca Resistencia para calentamiento de aire

**FIGURA 1.** Diagrama del sistema de fermentación.

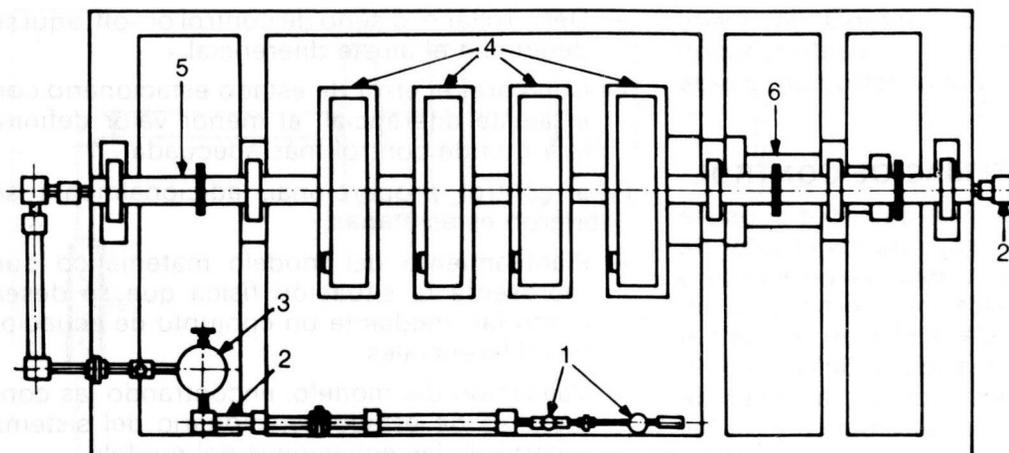


FIGURA 2.

- aire y entrada del agua de reposición: 1/4".
- Diámetro nominal del tubo difusor del aire: 3/8".
- Diámetro de los orificios del difusor: 0,001 m.
- Número de orificios: 22.

La columna está provista además de un indicador de nivel y de dos piezas para la ubicación de sensores de temperatura. Las especificaciones de la resistencia de calentamiento del agua, ubicada dentro de la columna de humidificación (Rh), y de la resistencia para ajuste final de la temperatura (Rca) pueden consultarse en la Tabla 1.

La unidad de fermentación consta de cuatro tambores acoplados a un eje común. El aire acondicionado se suministra por un extremo del eje, sobre el cual hay agujeros de suministro y retiro del aire, independientes para cada tambor. Los tambores tienen un diámetro de 35,5 cms. y un largo de 8 cms., construidos en acero inoxidable, seccionado para desmonte y limpieza, con deflectores para mejorar la agitación y puertas para cargue, toma de muestras e inoculación.

La agitación necesaria para la mezcla se provee

mediante un sistema de giro consistente de un motovariador reductor unido al eje por medio de una transmisión simple por cadena de velocidad regulable. El motovariador posee un motor de 0.6 HP y provee velocidades entre 6 y 40 rpm.

El eje al que se acoplan los tambores está construido en tubería de acero inoxidable de 1 1/2" nominal, con un tubo soldado interior de 1/2" nominal que recoge el aire que ha circulado por los tambores. Se ubica un filtro de aire antes de la columna de humidificación y otra luego del extremo de salida del eje. Las consideraciones de diseño (10) llevan a las siguientes especificaciones para cada filtro.

- Diámetro del filtro: 0,0254 m.
- Longitud del filtro: 0,10 m.
- Densidad de la lana de vidrio: 2,450 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad del lecho empacado: 400,83 kg/m<sup>3</sup>
- Peso de la lana de vidrio: 0,022 kg.
- Eficiencia del filtro: 90%.

El sistema de suministro del aire cuenta con válvulas de paso filtro regulador y un rotámetro con capacidad de medida hasta 18 litros por minuto.

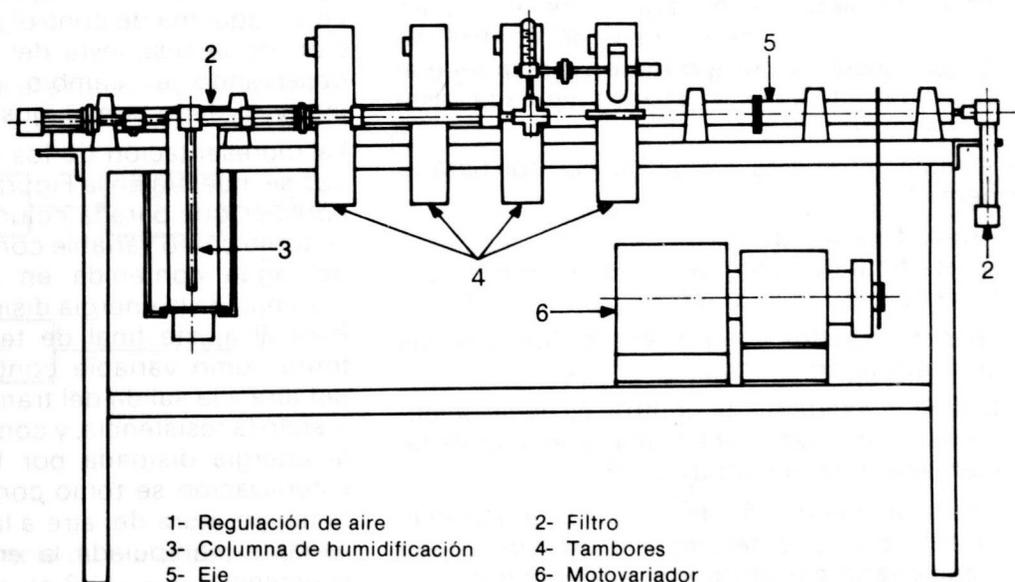


FIGURA 3.

- |                              |                 |
|------------------------------|-----------------|
| 1- Regulación de aire        | 2- Filtro       |
| 3- Columna de humidificación | 4- Tambores     |
| 5- Eje                       | 6- Motovariador |

Para mayor detalle el lector interesado puede consultar las referencias (6) y (9). La disposición final de los elementos sobre la estructura puede verse en las Figuras 2 y 3.

### DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

La regulación en los procesos químicos consiste en mantener dentro de límites dados el valor de una variable, modificando el balance de energía o de masa de los materiales involucrados en un proceso (1, 2, 3, 4, 5). Cada proceso industrial posee unas características específicas y como éstas inciden directamente en la facilidad de aplicación de la regulación automática y en los resultados que pueden esperarse de ella, no es posible disponer de reguladores automáticos de un solo diseño o tipo. Los métodos de regulación que interesan en el presente trabajo son:

- Regulación de dos posiciones (on — off) (4): ocurre cuando el controlador recibe la señal del valor de la variable controlada y establece una comparación con el nivel de referencia de dicha variable. Si no coinciden el controlador ejerce una acción correctiva que consiste en llevar el elemento final de control a una de dos posibles posiciones: un valor alto mayor que la demanda máxima, o un valor bajo, menor que la demanda mínima. Este tipo de control se aplica a procesos en los cuales la variable controlada no requiere de gran precisión, pudiendo variar dentro de un relativamente amplio intervalo de valores.
- Regulación de posición proporcional, cuando el controlador selecciona una posición determinada para el elemento final de control, luego que ha hecho la comparación entre el valor de referencia y la variable controlada, con el fin de mantener esta última entre los límites de trabajo. La acción de este controlador se mide de modo indirecto con el concepto de banda proporcional que es el intervalo de valores en el elemento de medida, necesarios para hacer que el elemento final de control se mueva desde la posición que corresponde al valor más alto de la variable manipulada hasta el más bajo.

Se establecieron tres ciclos de control para el fermentador:

- Humidificación del aire.
- Ajuste final de la temperatura del aire.
- Esterilización del equipo.

Los pasos seguidos en el diseño de los sistemas de control fueron:

- Definir el esquema de control, es decir, seleccionar variables controlada y manipulada, elemento final de control, etc.
- Desarrollar el diseño de control proporcional; en este diseño se determina el error de estado estacionario para esta forma de control.

- Desarrollar el diseño de control on-off, aquí se determina el ajuste diferencial.
- Comparar el error de estado estacionario con el ajuste diferencial, el menor valor definirá la forma de control más adecuada.

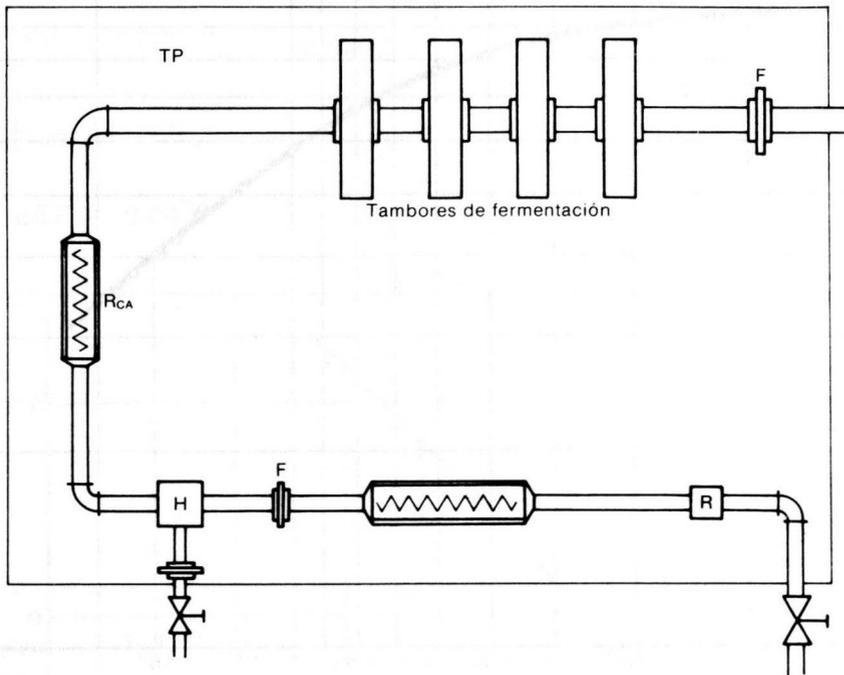
Para control proporcional, adicionalmente se cubrieron estas etapas:

- Planteamiento del modelo matemático que representa la situación física que se desea controlar, mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales.
- Validación del modelo, encontrando las condiciones de estado estacionario del sistema a partir de las ecuaciones del modelo.
- Desarrollo de la función de transferencia de malla abierta a partir de la ecuación diferencial de interés, la ecuación de estado estable, las variables de desviación (una variable de desviación se define como la diferencia entre el valor de la variable en un instante cualquiera y el valor en estado estacionario), aplicación de la transformada de Laplace, deducción de la función de transferencia de malla abierta, ejecución de los diagramas de Bode y cálculo del error de estado estacionario, mediante la aplicación del teorema del Valor Final a la función de transferencia para la malla de control del sistema realimentado negativamente, ciclo cerrado, la cual se define mediante la expresión:

$$G(s) = \frac{\text{Función de transferencia de paso directo}}{1 + \text{Función de transferencia de ciclo cerrado}}$$

Para el diseño de un control on-off se desarrollaron estos pasos: planteamiento del modelo matemático que representa el sistema por controlar; validación del modelo matemático mediante la evaluación de las condiciones de estado estable; selección del ajuste diferencial con base en el esquema de control propuesto; representación de la respuesta del sistema en el tiempo; observando el cambio de la variable en el intervalo dado con el ajuste diferencial.

La representación de los esquemas seleccionados se muestra en la Figura 4, en donde se puede apreciar que para la columna de humidificación se tomó como variable controlada la temperatura del agua contenida en ella y como variable manipulada la energía disipada por la resistencia. Para el ajuste final de temperatura del aire se tomó como variable controlada la temperatura del aire a la salida del tramo de tubería donde se instaló la resistencia, y como variable manipulada la energía disipada por la resistencia. Para la esterilización se tomó como variable controlada la temperatura del aire a la salida del eje y como variable manipulada la energía disipada por la resistencia.



TT- Transmisor de temperatura  
CIT Controlador indicador de temperatura

FIGURA 4. Esquema de control.

Los controladores seleccionados fueron para humidificación y ajuste final de la temperatura del tipo proporcional y para esterilización del tipo on-off (9).

**MODELAMIENTO PARA LA COLUMNA DE HUMIDIFICACION**

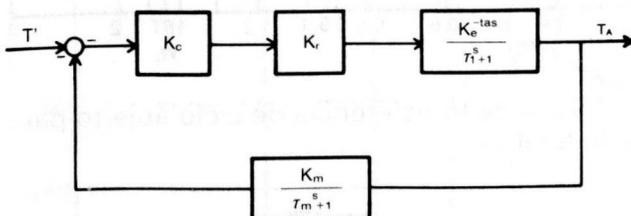
Planteando un balance de energía para el agua, aire y resistencia (9) y aplicando la transformada de Laplace se llegó a la siguiente función de transferencia para el proceso: (nomenclatura al final del artículo).

$$T_A = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)} T'(s)$$

$$K = \frac{1}{1 + \frac{m}{h_G A_T}}$$

$$\tau_1 = \frac{\rho_A V_A C_A}{(h_G A_T + m^0 C)}$$

La malla de control para el esquema de control en la humidificación es:



$$\tau_m = \frac{\rho_E m_E C_E}{K_E A_E}$$

La función de transferencia de malla abierta para construir los diagramas de Bode será:

$$G(s) = \frac{K_r K K_m e^{-tas}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_m s + 1)}$$

En las referencias (1, 2, 3, 5) se describe el procedimiento para la construcción de los diagramas de Bode. Estos diagramas para la humidificación se muestran en la Figura 5, de ellos se obtiene:

$$K_{m\acute{a}x} = \frac{1}{AR_{total} WC} = \frac{1}{0,4079} = 2,45$$

$$K_{m\acute{a}x} = K_{c \acute{m}ax} (K_r K K_m)$$

Evaluando las demás ganancias (9) se llega a

$$K_{c \acute{m}ax} = 2,193$$

El error en estado estacionario es:

$$EEE = N - \lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = N \left[ 1 - \frac{K_c K_r K}{1 + K_c K_r K K_m} \right] = 0,289 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**MODELAMIENTO PARA AJUSTE FINAL DE LA TEMPERATURA**

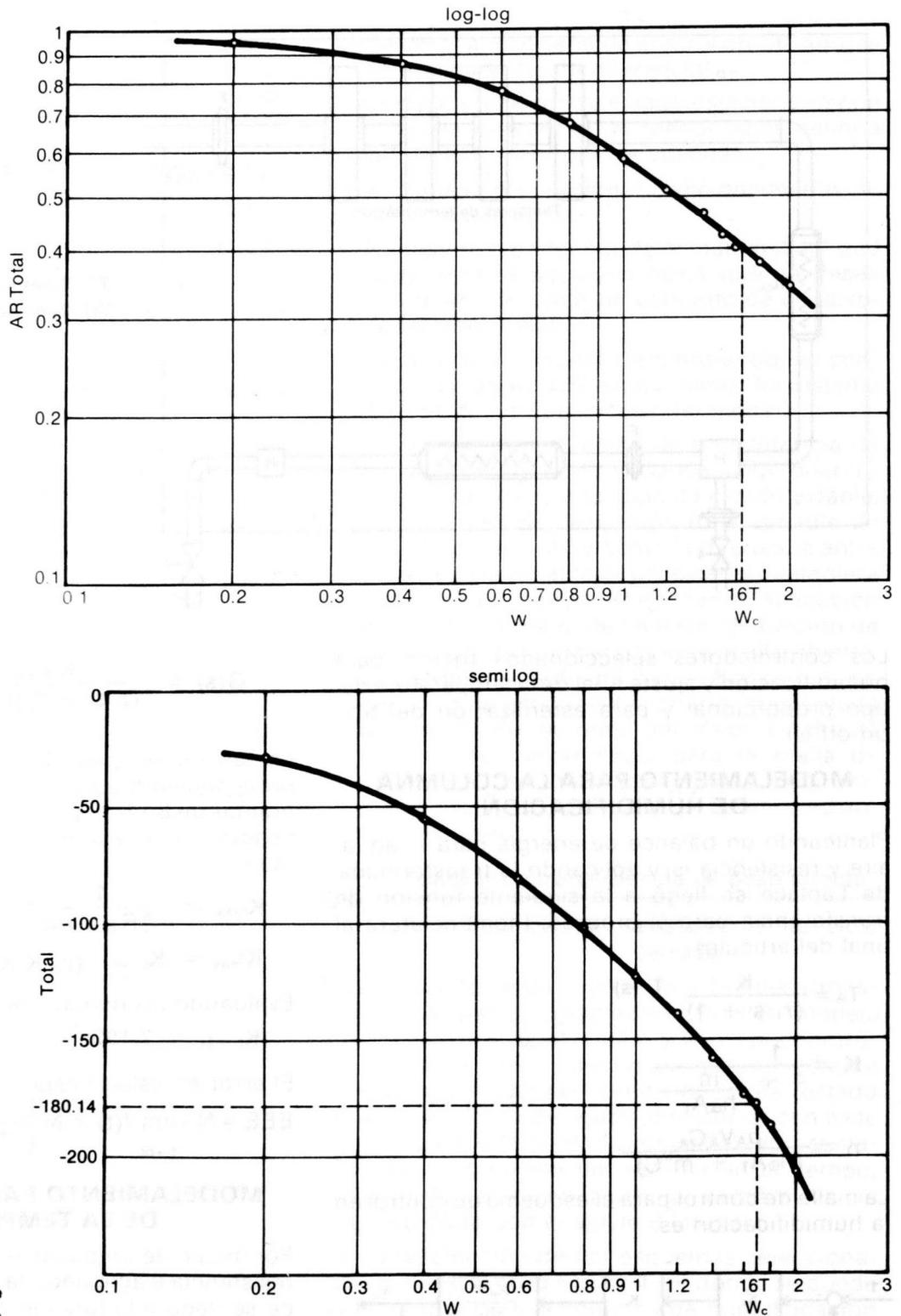
Por medio de un balance térmico para el aire y la resistencia y aplicando la transformada de Laplace se llegó a la función de transferencia para el proceso (nomenclatura al final del artículo).

$$T'_A(s) = \frac{K}{\tau_1 s + 1} Q'_c(s)$$

$$K = \frac{1}{FP_2 + m(1,005 + 1,844\gamma)}$$

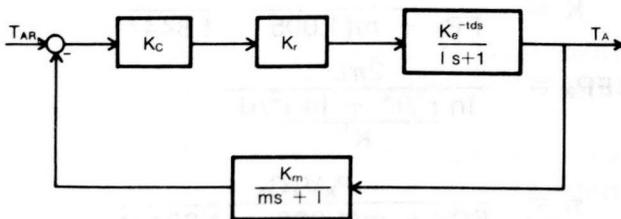
$$FP_2 = \frac{2\pi L}{\ln \frac{r^3/r^2 + \ln r^2/rl}{K^1}}$$

$$\tau_1 = \frac{P_A V_A C_A}{FP_2 + m(1,005 + 1,844\gamma)}$$



**FIGURA 5. Diagrama de Bode para humidificación**

El diagrama de bloques para la malla de control es:



La función de transferencia de ciclo abierto para ajuste final es:

$$G(s) = \frac{K_r K_e^{-tds}}{(\tau_1 S + 1)(\tau_m S + 1)}$$

A partir de esta función de transferencia se calcularon los diagramas de Bode (Figura 6) y de estas se obtienen los siguientes valores (análogo a la humidificación).

$$K_{\text{máx}} = \frac{1}{A_r \text{ total} | w_c} = \frac{1}{0,0427} = 23,4$$

$$K_c \text{ máx} = 1,9$$

$$EEE = 0,04^\circ\text{C}$$

### VALIDACION EXPERIMENTAL DE LOS MODELOS MATEMATICOS

Esta validación consistió en buscar repetir experimentalmente, las condiciones de estado estable obtenidas en la parte de diseño, adecuando el equipo para proporcionar los parámetros usados en los modelos, como flujos, espesor de aislamientos, etc.

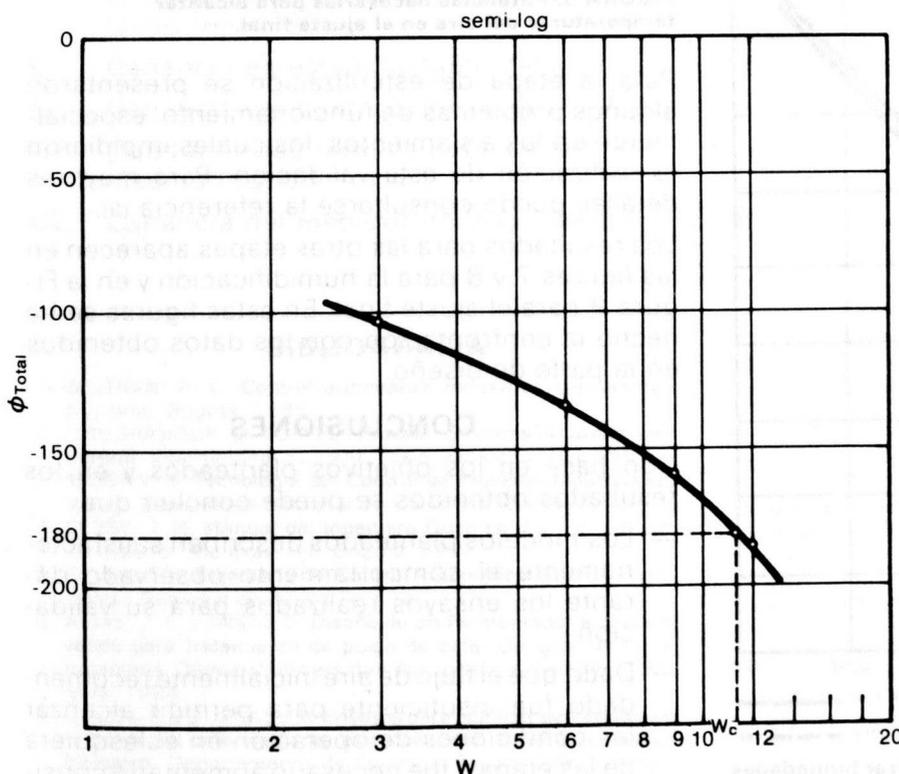
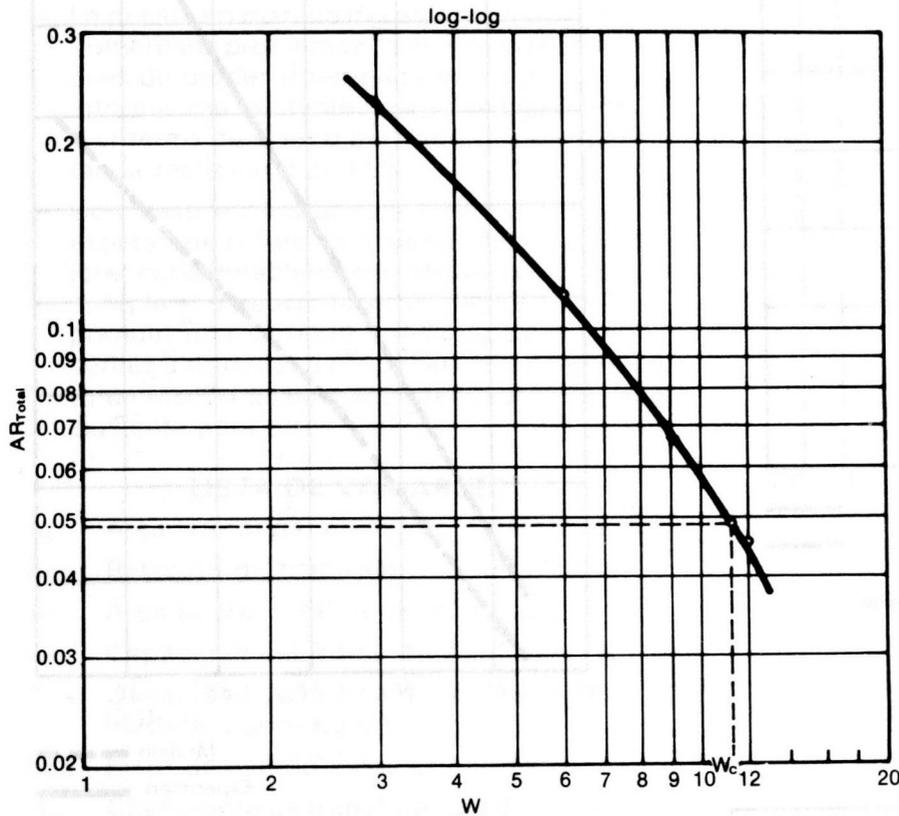
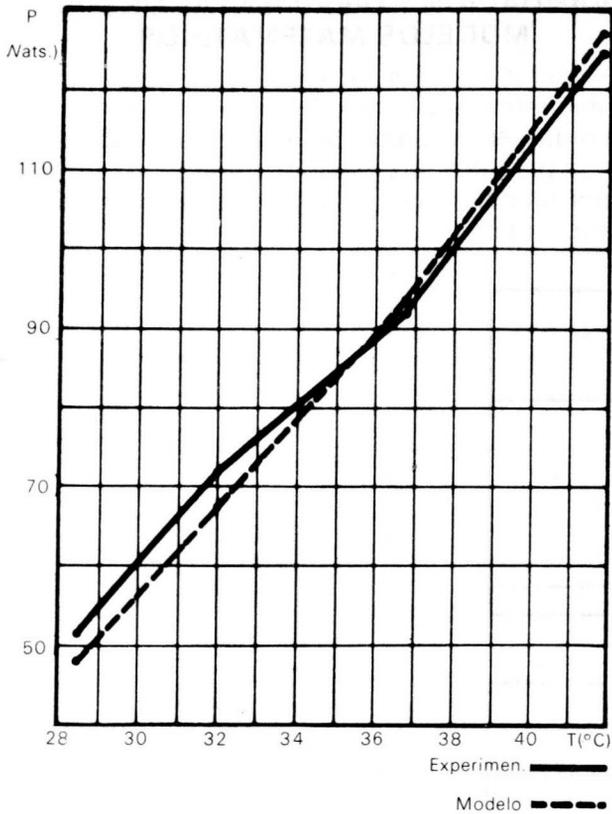
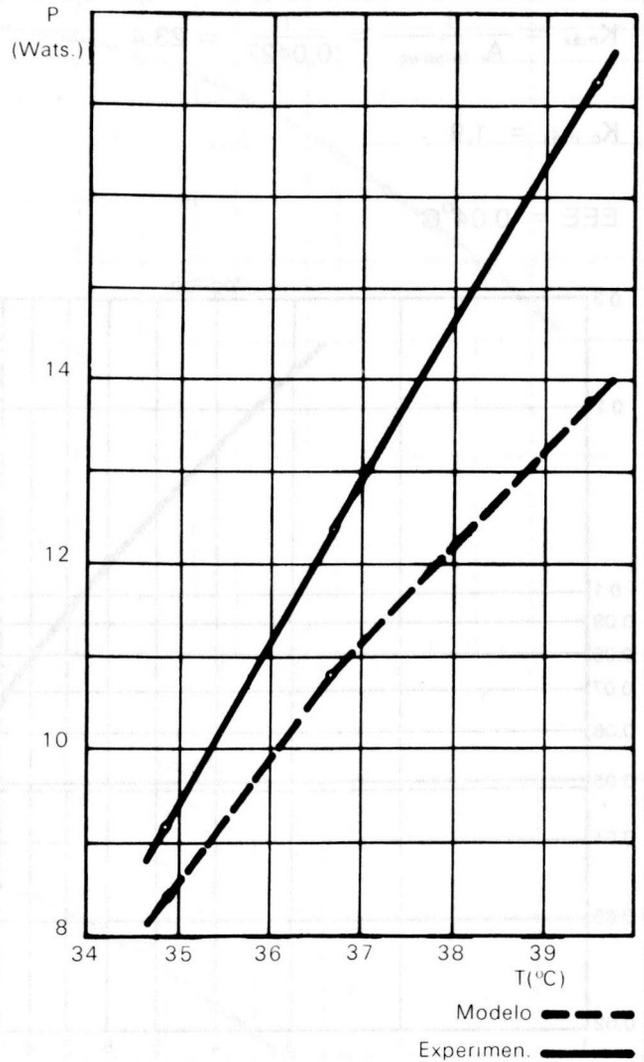


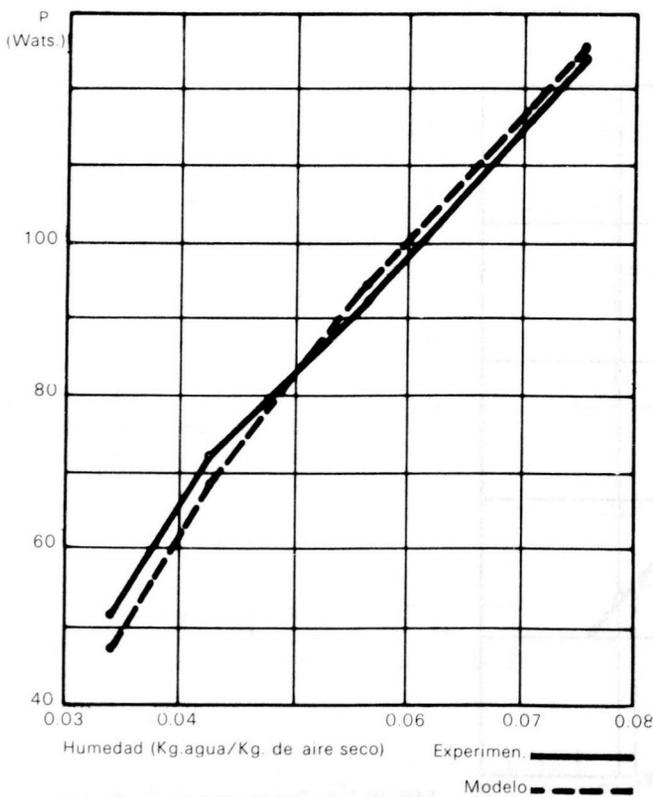
FIGURA 6. Diagrama de Bode para ajuste final de temperatura de aire.



**FIGURA 7. Potencias necesarias para alcanzar temperaturas del aire en la humidificación.**



**FIGURA 9. Potencias necesarias para alcanzar temperaturas del aire en el ajuste final.**



**FIGURA 8. Potencias necesarias para alcanzar humedades**

Para la etapa de esterilización se presentaron algunos problemas de funcionamiento, especialmente en los aislamientos, los cuales impidieron la realización de esta validación. Para mayores detalles puede consultarse la referencia (9).

Los resultados para las otras etapas aparecen en las figuras 7 y 8 para la humidificación y en la Figura 9 para el ajuste final. En estas figuras se ha hecho la confrontación con los datos obtenidos en la parte de diseño.

### CONCLUSIONES

Con base en los objetivos planteados y en los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Los modelos planteados describen satisfactoriamente el comportamiento observado durante los ensayos realizados para su validación.
- Dado que el flujo de aire inicialmente recomendado fue insuficiente para permitir alcanzar las condiciones de operación en cualesquiera de las etapas, fue necesario aumentarlo consi-

derablemente, convirtiéndose en limitante para el flujo de aire, un valor que permita suministrar la energía para la calefacción de los tambores de fermentación.

- Se presentaron problemas con los aislamientos de fibra de vidrio, en la etapa de esterilización, pero pueden solucionarse, introduciendo material refractario.
- La puesta en marcha del equipo, trajo consigo numerosos problemas, la mayoría de ellos difíciles de predecir, teniendo en cuenta la poca información existente sobre posibles métodos o criterios de diseño para equipos que permitan la realización de FES.
- Con base en los cambios propuestos (9) se espera que el funcionamiento del equipo mejore considerablemente, de manera tal que cumpla el objetivo de servir de base para emprender una serie de investigaciones conducentes a formular o proponer un procedimiento de diseño de equipos adecuados similar al existente para otros sistemas.

### LISTA DE VARIABLES

AE:	Area lateral del elemento de medida (m <sup>2</sup> )	K <sub>R</sub> :	Ganancia de la resistencia (°C/Volt.).
A <sub>R</sub> :	Relación de amplitud.	K <sub>1</sub> :	Conductividad térmica de la tubería (Julio/Hr m <sup>2</sup> °C).
A <sub>T</sub> :	Area lateral total de las burbujas.	K <sub>2</sub> :	Conductividad térmica del aislante (Julio/Hr m <sup>2</sup> °C).
CA:	Capacidad calorífica del aire (Julio/Kg °C)	L:	Longitud de la tubería que contiene la resistencia de ajuste final de temperatura (m).
CE:	Capacidad calorífica del elemento de medida (Julio/Kg °C)	m:	Flujo masivo de aire seco: (Kg/hr).
EEE:	Error de estado estacionario (°C).	me:	Masa del elemento de medida (kg.).
H <sub>G</sub> :	Coeficiente de transferencia de calor entre el agua y el aire en el humidificador (Julio/Hr m <sup>2</sup> °C).	N:	Magnitud del cambio escalar en el valor de referencia.
K:	Ganancia en estado estable del proceso.	Q <sub>C</sub> :	Energía disipada por la resistencia (Jul/Hr.).
K <sub>C</sub> :	Ganancia del controlador (Volt./m Volt.)	r <sub>1</sub> :	Radio interior de la tubería que contiene la resistencia de ajuste final (m).
K <sub>E</sub> :	Conductividad térmica del elemento de medida (Sul/hr - m °C)	r <sub>2</sub> :	Radio exterior de la tubería que contiene la resistencia de ajuste final (m).
K <sub>m</sub> :	Ganancia del medidor: (mVolt/mvolt.)	r <sub>3</sub> :	Radio exterior de la tubería que contiene la resistencia de ajuste final, incluido aislante (m.)
		s:	Variable Laplaciana.
		T:	Temperatura del agua (°C)
		T <sub>A</sub> :	Temperatura del aire (°C)
		to:	Tiempo muerto en humidificación: Tiempo ascensión de las burbujas en la columna (h <sub>1</sub> )
		td:	Tiempo muerto en ajuste final de temperatura. Tiempo necesario para que el aire atraviese la tubería (hr).
		V <sub>A</sub> :	Volumen de aire contenido (m <sup>3</sup> )
		wc:	Frecuencia crítica (rad/seg)
		A:	Densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )
		E:	Densidad del elemento de medida (kg/m <sup>3</sup> )
		τ <sub>1</sub> :	Constante de tiempo del proceso (hr).
		τ <sub>m</sub> :	Constante de tiempo del elemento de medida (hr)
		Φ	Angulo de fase.

### BIBLIOGRAFIA

1. BELTRAN, R. C. **Control automático industrial**. Universidad Nacional, Bogotá, 1985.
2. COUGHANOUR & KOPPEL. **Process Systems Analysis and Control**. International Student. Tokio, Mc Graw. Hill, 1965.
3. MORA V. A. **Tecnología del Control de Procesos Industriales**, Vol. 1. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1982.
4. PERRY, J. H. **Manual del Ingeniero Químico**. 5a. Ed. 2a. Ed. en español. Mc Graw Hill, Bogotá, 1982.
5. RAVEN, F. H. **Ingeniería del Control Automático**. Buenos Aires, Centro Regional de Ayuda Técnica.
6. ARIAS, J. E. y MISAS O. **Diseño de un Fermentador en estado sólido para tratamiento de pulpa de café**. Departamento de Ingeniería Química Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1984.
7. CRUZ J. E. y DUEÑAS J. A. **Ensayos para eliminar polifenoles de la pulpa del café mediante extracción con solvente y ensayo biológico**. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1979.
8. GARCIA, L. A. **Cuantificación de polifenoles presentes en la pulpa de café y su interacción con proteínas y sus posibles efectos en el metabolismo del hierro**. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, 1983.
9. OSPINA, M. P. y RENGIFO L., J. R. **Construcción de un fermentador para operación en estado sólido y diseño de los sistemas de control**. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, 1986.
10. PIÑEROS, R. D. y ZULUAGA, C. A. **Diseño, construcción y puesta en marcha de un microfermentador**. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1985.
11. RODRIGUEZ, J. P. y SANCHEZ, E. **Ensayos preliminares para la fermentación de la pulpa de café con hongos y ensayos biológicos**. Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 1983.