

Diseño, construcción y puesta en marcha de un microfermentador

En la investigación y desarrollo de los procesos biotecnológicos es necesario disponer de equipos de fermentación que permitan un estricto control del proceso que se lleva a cabo. Para esto se ha desarrollado un microfermentador con capacidad de 3.5 litros, el cual consta de dos partes: 1. Un recipiente de fermentación construido en vidrio y acero inoxidable, provisto de un sistema de agitación; sistema de suministro de aire o gas; un condensador de vapores y humedad del aire de salida; sistema de muestreo aséptico; líneas de alimentación de medio de cultivo, inóculo y soluciones reguladoras de pH; pozuelos para sensores del controlador y registrador de temperatura; intercambiador de calor. 2. Una unidad de mando donde se encuentra el motor del agitador y su control automático de velocidad; el control de temperatura con elementos para calentamiento y enfriamiento; el sistema de suministro, regulación y esterilización de aire o gas a la entrada y salida. Los elementos y sistemas involucrados en este equipo fueron desarrollados en los talleres y laboratorios de la Universidad. El diseño y construcción de los controladores se realizó en los talleres del Centro de Equipos Interfacultades, CEIF.

GUSTAVO BUITRAGO H.
Ingeniero Químico.
Profesor Asistente,
Departamento de Ingeniería Química.
Coordinador Operativo Grupo de Biotecnología.
Universidad Nacional de Colombia.

DIEGO PIÑEROS R.
Ingeniero Químico.

ALVARO ZULUAGA C.
Ingeniero Químico.

Pág. 60-67
Ingeniería e Investigación
Volumen 4 - N° 2
Trimestre 1 de 1987

La biotecnología se ocupa del procesamiento económico de materiales de carácter u origen biológico en un medio ambiente adecuado, así como el control de las condiciones de este medio, con el propósito de obtener productos útiles al hombre.

Actualmente en el país se trabaja en procesos de fermentación, en especial en la industria cervecera, licoreras, industrias lácteas y de alimentos, tratamiento de aguas, producción de vacunas y en la industria farmacéutica. Teniendo en cuenta el potencial socioeconómico y técnico que conlleva este tipo de procesos, es importante estimular su desarrollo para que llegue a ser renglón importante en la economía del país, es así como en un marco científico y de investigación, en algunos centros universitarios y empresas se llevan a cabo estudios experimentales, bajo un enfoque acorde con las necesidades y posibilidades nacionales. Para un buen desarrollo del área es necesario crear una infraestructura física y académica adecuada para la investigación en biotecnología.

Existen múltiples factores tanto internos como externos al microorganismo que afectan su desarrollo y por lo tanto la producción de metabolitos, haciéndose necesario su conocimiento, evaluación y control; entre dichos factores están sus requerimientos nutricionales, temperatura y pH del medio de cultivo, nivel de aireación y grado de agitación.

El objetivo de este trabajo fue el de diseñar y construir un equipo versátil, provisto de los elementos básicos para la realización de estudios cinéticos y utilización de diferentes materias primas, el desarrollo de cepas nativas y la determinación de condiciones de operación para fermentaciones con aplicabilidad industrial.

CARACTERISTICAS DE UN MICROFERMENTADOR

Existen varias características que debe cumplir un fermentador utilizado en investigación: ante todo el proceso exige que el equipo sea confiable para ser trabajado durante largos periodos de tiempo; tanto el fermentador como su contenido

deben esterilizarse y además debe conservarse en condiciones asépticas durante su operación; por otra parte, el equipo debe ser versátil para realizar ensayos a diferentes condiciones de operación; debe estar provisto de sistemas manuales o automáticos para regular temperatura, pH y grado de aireación y agitación; debe tener un sistema de muestreo que garantice una muestra representativa y sin riesgo de contaminación del cultivo; deben existir uno o varios dispositivos para adicionar el inóculo, antiespumantes, nutrientes, ácidos, etc., de una manera aséptica; su diseño geométrico debe ser concebido dentro de los patrones estándares de los equipos industriales para facilitar su posterior escalado.

DISEÑO Y CONSTRUCCION

La construcción de las partes y sistemas involucrados en este equipo se llevó a cabo en los talleres y laboratorios de la Universidad. Para ello se contó con la colaboración de las siguientes dependencias:

Taller de Máquinas y Herramientas, Departamento de Ingeniería Mecánica, IEl, Facultad de Ingeniería.

Taller de Mecánica Fina, Departamento de Física, Facultad de Ciencias.

Taller del Centro de Equipos Interfacultades, CEIF, Universidad Nacional.

Laboratorios del Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería.

Laboratorio de Microbiología, Departamento de Farmacia, Facultad de Ciencias.

El equipo consta básicamente de: sistema de control automático de agitación; sistema de regulación manual de aire; sistema para control automático de temperatura; sistema para muestreo; elementos necesarios para ajuste de pH, adicción de nutrientes y antiespumantes.

Sistema de agitación

La agitación en los procesos de fermentación busca mantener homogéneo el medio del cultivo y mejorar los fenómenos de transferencia de masa y calor. En el diseño del sistema de agitación intervienen aspectos geométricos y mecánicos. Los aspectos geométricos están dados bajo patrones estándares para equipos industriales. Los aspectos mecánicos comprenden: dimensionamiento del eje; diseño de los sellos para el eje y cálculo de la potencia del motor.

Con base en las dimensiones del recipiente y en las relaciones geométricas estándares para fermentadores se establecen las dimensiones y ubicación de los impulsores y el ancho de los deflectores. Se establece que el tipo de impulsor más adecuado es el de turbina de disco, ya que se puede utilizar en un amplio intervalo de viscosida-

des, produce corrientes intensas y tiene buena eficiencia para romper burbujas de gas. En la figura 1 se reseñan las dimensiones del recipiente y distribución de los impulsores. El diseño de los deflectores se ha concebido de manera que sirvan a la vez de intercambiadores de calor.

En el cálculo de la potencia requerida por el motor, son variables principales: la velocidad del impulsor, viscosidad y densidad del medio, dimensiones y tipo del impulsor, al igual que el grado de aireación.

Para el cálculo de la potencia en sistemas gas-líquido, la ecuación considerada más completa es la siguiente(5), la cual cubre el más amplio rango de variables y es de carácter adimensional:

$$\frac{P_g}{P} = 0.1 \left(\frac{nV}{Q} \right)^{1/4} \left(\frac{n^2 D_i^4}{g A_i V^{2/3}} \right)^{1/5}$$

La función principal del eje es la de transmitir a los impulsores el movimiento de rotación producido por el motor. Para determinar el diámetro mínimo del eje se deben calcular el torque y el momento de torsión máximo ya que estos ocasionan un esfuerzo de corte y un esfuerzo de tensión que actúan sobre el eje.

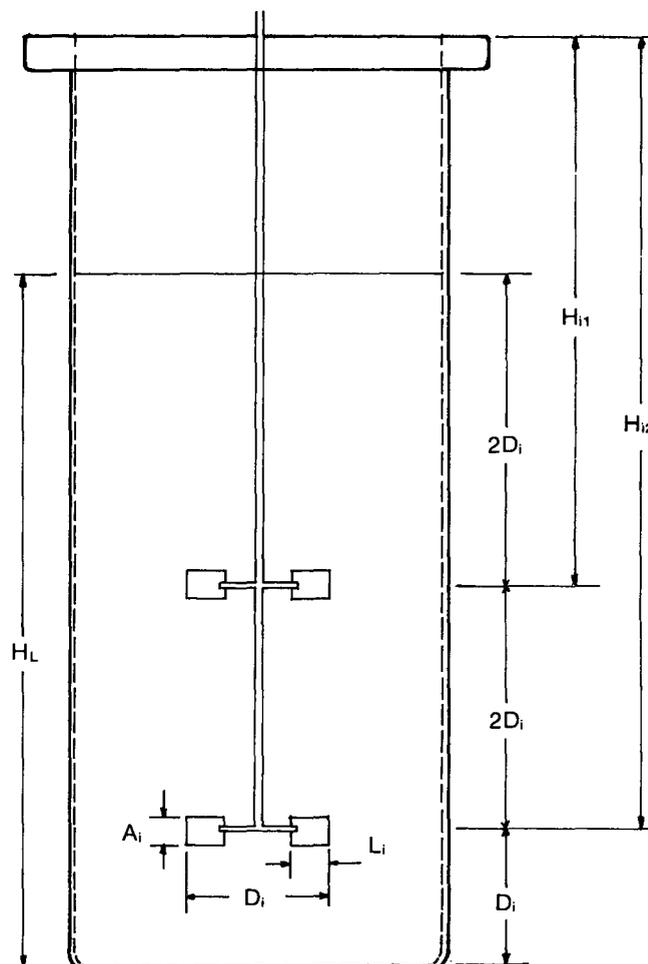


FIGURA 1. Dimensiones y distribución de los impulsores.

El diámetro mínimo calculado a las condiciones más críticas es: $4,24 \times 10^3$ mts.

Para evitar problemas de contaminación, se construye un sello doble de neopreno y teflón, que junto con las balineras forman el prensaestopas para estabilizar el eje.

La regulación de la velocidad de agitación se efectúa mediante un control automático realimentado, el cual ofrece un intervalo continuo de variación entre 0-600 rpm. El montaje del eje y prensaestopas se aprecia en la figura 2.

Sistema de aireación

El diseño del sistema de aireación comprende el cálculo de flujo de gas, el diseño de los filtros de entrada y salida, el cálculo de la caída de presión en los filtros y el diseño de un condensador que retenga la humedad arrastrada en la corriente de salida.

La cantidad de aire suministrada en los procesos de fermentación está comprendida entre 1 y 2.5 volúmenes de aire por volumen de líquido y por minuto (VVM), a condiciones normales (8). El aire suministrado debe cumplir estrictamente un alto grado de asepsia, por lo que es necesario implementar un sistema adecuado de suministro y esterilización. Para el diseño de un filtro de material fibroso se recurre a la ley logarítmica de penetración, cuya ecuación en forma integrada es (2, 3, 4):

$$L_N \frac{N_o}{N} = \frac{-4\beta\alpha L}{\pi d_f}$$

La eficiencia individual de fibra depende de la dinámica de filtración. Los fenómenos que intervienen en la colección de partículas son (2): difusión, interceptación, impactación y las fuerzas eléctricas. La eficiencia individual de fibra para cualquier velocidad dada está determinada por la suma de las contribuciones de los fenómenos anteriormente citados.

El siguiente modelo matemático corresponde a una correlación empírica para el cálculo de la eficiencia individual de fibra, teniendo en cuenta la presencia de otras fibras (2):

$$\beta = \beta_D + \beta_I + \beta_{IM} = 2.9K_u^{-1/3} P_e^{-2/3} + 0.62P_e^{-1} + 1/2K_u[2(1 + R_{pf})L_n(1 + R_{pf}) - (1 + R_{pf}) + (1 + R_{pf})^{-1} + \alpha(-2R_{pf}^2 - 1/2 R_{pf}^4 + 1/2 R_{pf}^2 + \dots)] + 1.24K_u^{-1/2} P_e^{-1/2} R_{pf}^{2/3} + 0.075 \sqrt{\frac{d_p^2 \rho_p V_s}{18\mu d_f}}$$

Para calcular la eficiencia individual de fibra se tuvo en cuenta la variación en el diámetro de la fibra de vidrio comercial, la diferencia del diámetro en las partículas contenidas en el aire y el cambio en la velocidad del aire debido a cambios en las condiciones de operación del equipo; se

hizo análisis numérico de las ecuaciones presentadas.

Para unas condiciones externas de fermentación: un flujo de aire de 2.5 VVM, 10 días de duración, una concentración de microorganismos en el aire comprendida entre 10^3 y 10^4 microorganismos/m³ de aire, una probabilidad de penetración de una millonésima, la longitud del filtro necesaria es de 0.129 mts.

El arrastre de humedad y productos de la fermentación que se presenta por el burbujeo del gas al pasar por el líquido y la evaporación

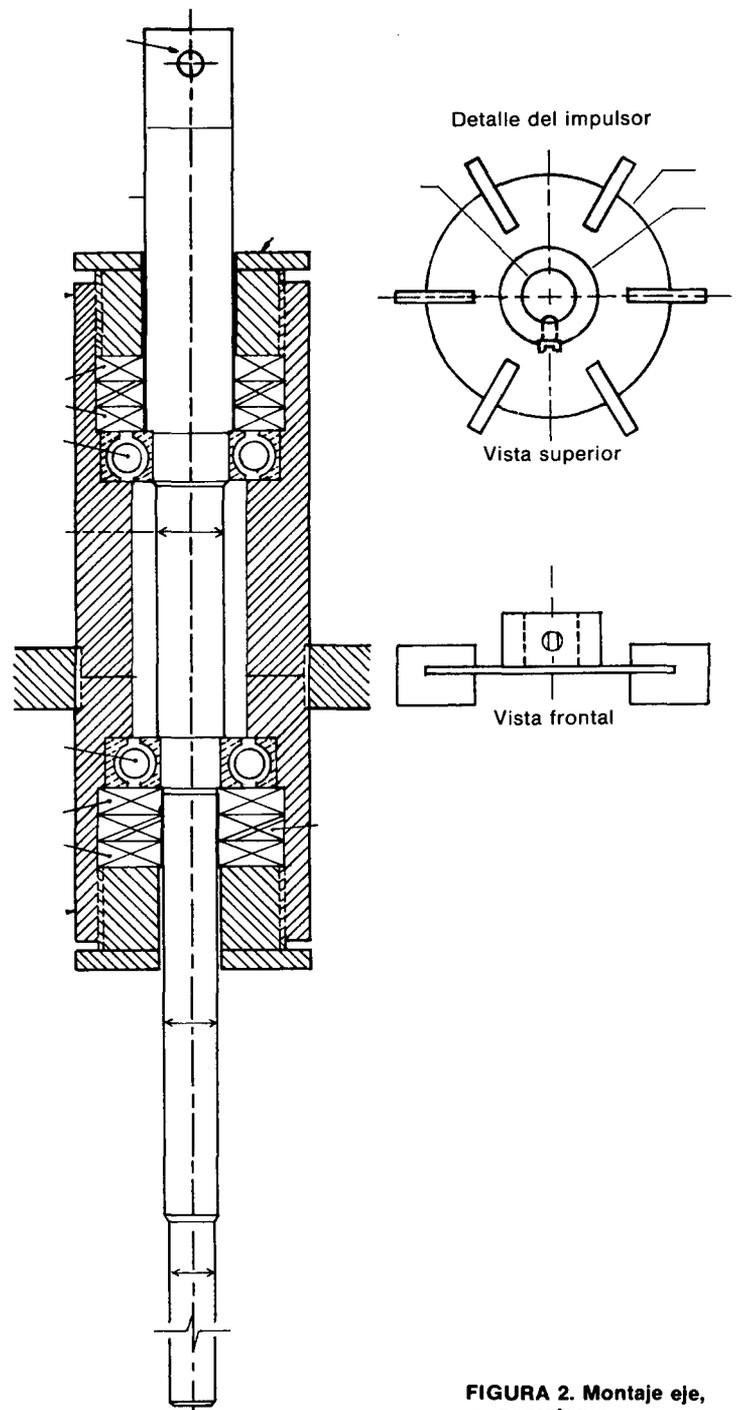


FIGURA 2. Montaje eje, prensaestopas e impulsoras.

producida por la agitación y la temperatura del fermentador, deben ser controlados mediante un elemento que los retenga y retorne al recipiente de fermentación, con lo cual se evita la pérdida de materiales, manteniéndose un adecuado balance de masa que garantice la obtención de resultados fiables. Para el diseño del condensador se tienen en cuenta aspectos de transferencia de masa y de calor.

En la figura 3, se muestran detalles de construcción del filtro, boquilla del difusor y del condensador.

Completa el sistema de aireación un regulador de presión de entrada y un medidor de flujo de gas. Un esquema que muestra el sistema de aireación completo se observa en la figura 4, fotografías 1 y 2.

Sistema automático de control de temperatura

En el diseño del sistema de control de temperatura se tienen en cuenta aspectos de transferencia de calor y control automático. Se plantean dos alternativas, una para control on-off y otra para control proporcional; el esquema de control proporcional se muestra en la figura 5.

Basados en la figura 5 se plantean las ecuaciones de balance de energía que luego de simplificarlas son:

$$M_F C_p \frac{dT_F}{dt} = B(T_F - T_{A1}) + (Q_F + Q_A - Q_{rad})$$

$$-M_A C_p \frac{dT_{A1}}{dt} = B(T_F - T_{A1}) + W_{AE} C_p (t_{A1} - T_o) - Q_R - \frac{W_{AE} C_p}{W_A C_p} Q_R$$

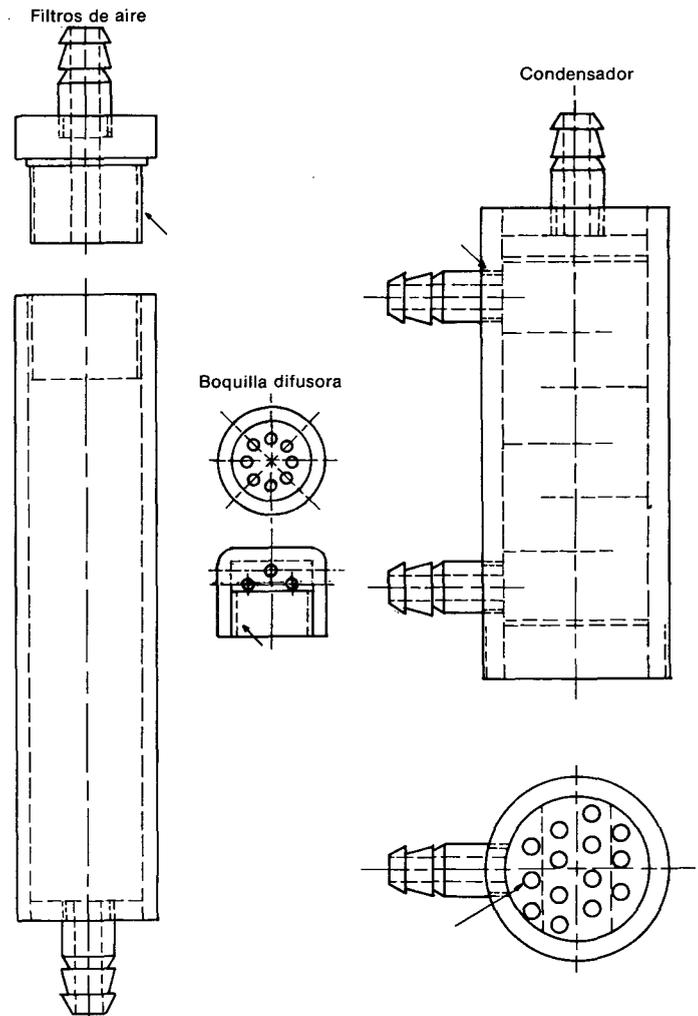


FIGURA 3. Detalles del sistema de aireación.

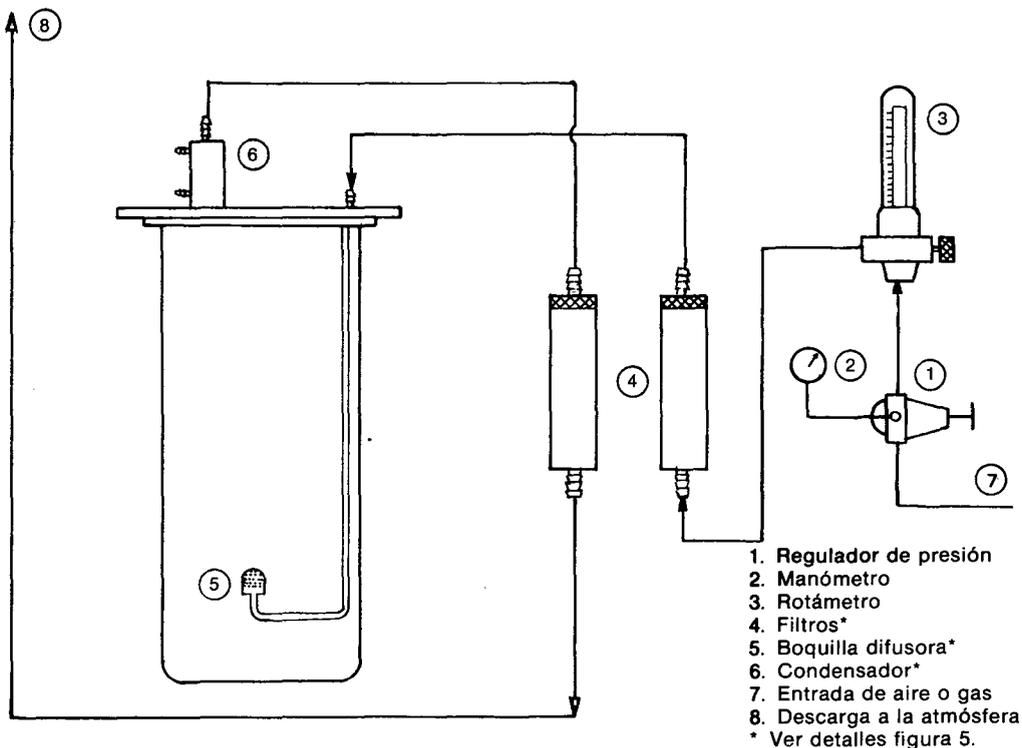


FIGURA 4. Sistema de aireado.

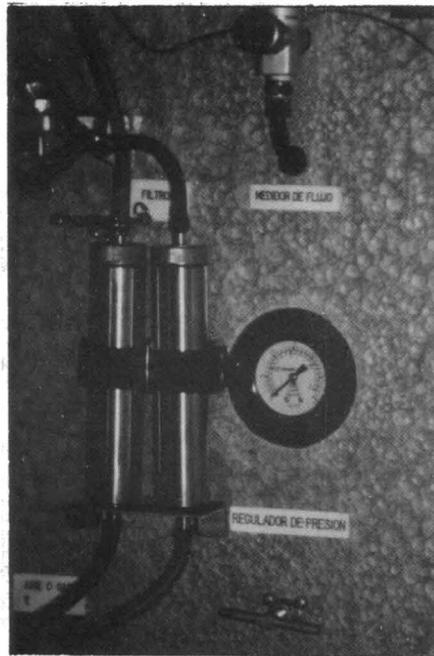


FOTO 1

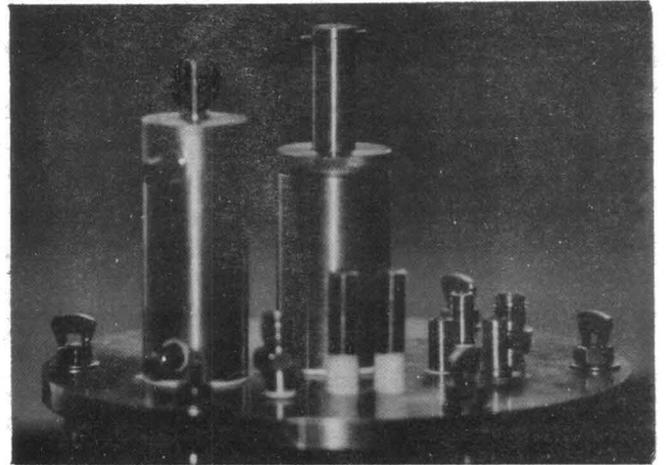


FOTO 2

donde:

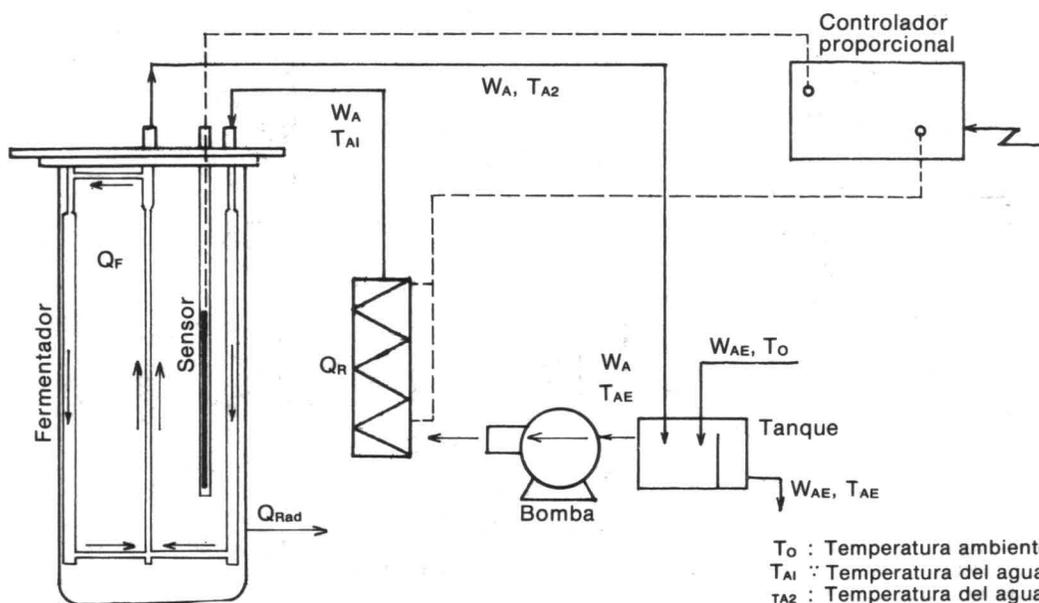
$$B = W_A C_p \left[1 - \frac{1}{\text{Exp}(UA/W_A C_p)} \right]$$

Con base en las ecuaciones anteriores y las condiciones de operación determinadas en el diseño del equipo, se determina que el sistema presenta una respuesta sobreamortiguada y un error de estado estacionario de 0.6°C.

De manera similar se hace una evaluación para el esquema propuesto de control on-off y se deter-

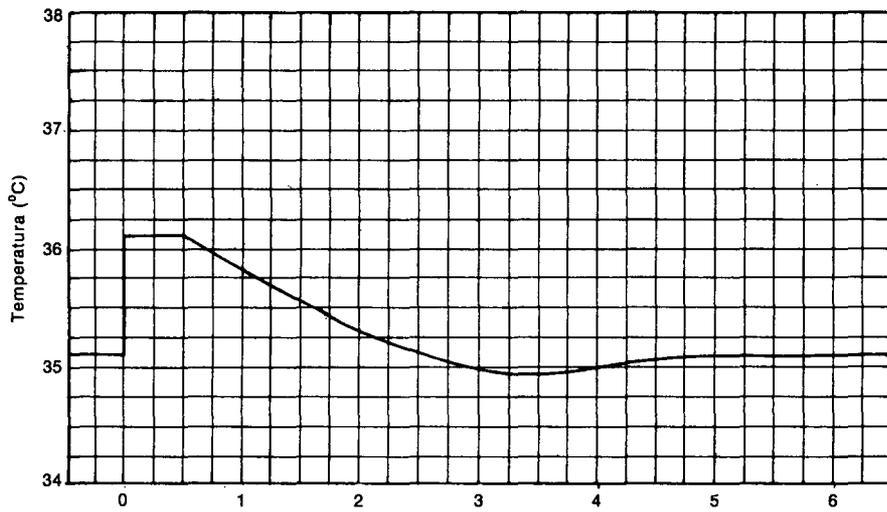
mina que su ajuste diferencial real es de 1.6°C, para un ajuste en el controlador de 1°C. Por esta razón se escoge el sistema de control proporcional.

Una vez construido el sistema de control se sometió a prueba determinándose que su comportamiento es mejor que el previsto, como se observa en la figura 6, la cual muestra la respuesta del sistema cuando se produce una alteración instantánea en la temperatura dentro del microfermentador, es decir, se introduce una perturbación tipo paso.



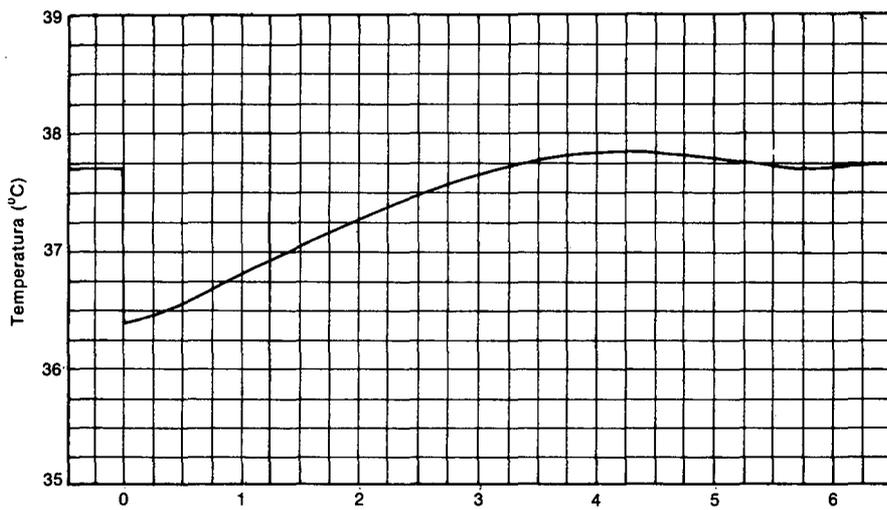
- T_0 : Temperatura ambiente
- T_{A1} : Temperatura del agua a la entrada del fermentador
- T_{A2} : Temperatura del agua a la salida del fermentador
- T_{AE} : Temperatura del agua de enfriamiento
- W_A : Flujo de agua proporcionada por la bomba
- W_{AE} : Flujo de agua de enfriamiento
- Q_F : Calor generado por la fermentación
- Q_R : Calor suministrado por la resistencia
- Q_{Rad} : Calor perdido por radiación al ambiente

FIGURA 5. Esquema de control proporcional.



(A) Adición de agua caliente para $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ (36.1-35.1) $^{\circ}\text{C}$

Tiempo (min)



(B) Adición de agua fría para $\Delta T = -1.3^{\circ}\text{C}$ (36.4-37.7) $^{\circ}\text{C}$

Tiempo (min)

FIGURA 6. Perturbaciones alternando externamente la temperatura dentro del microfermentador.

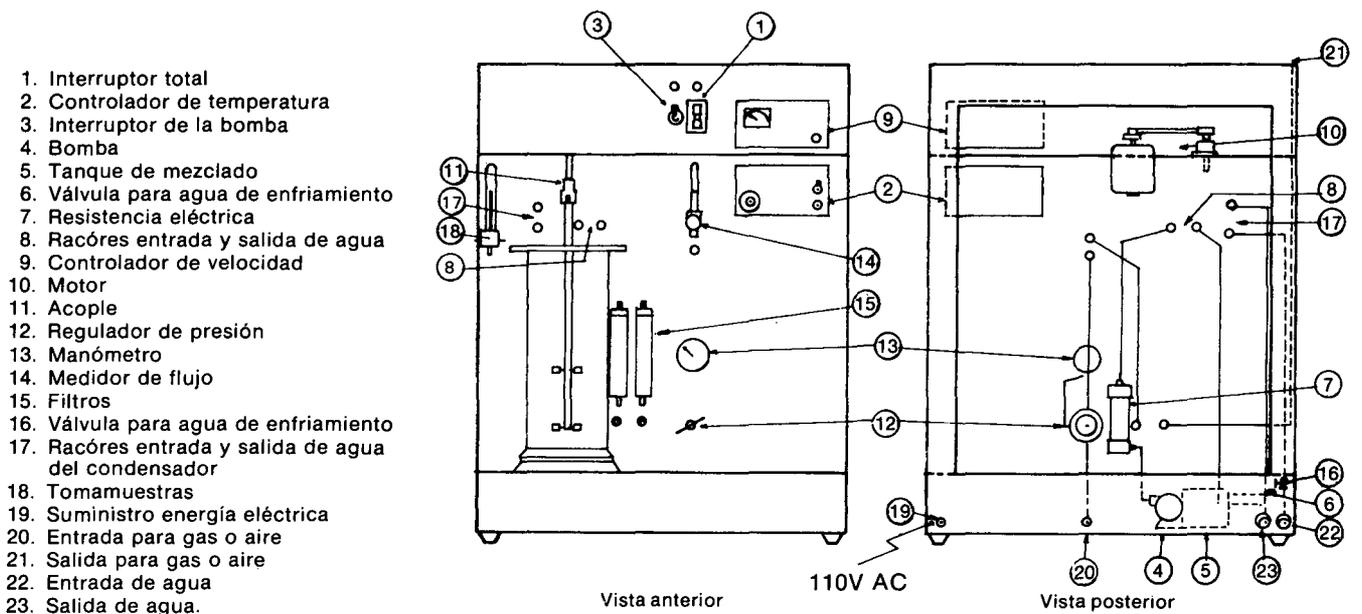


FIGURA 7. Distribución de partes en el microfermentador.

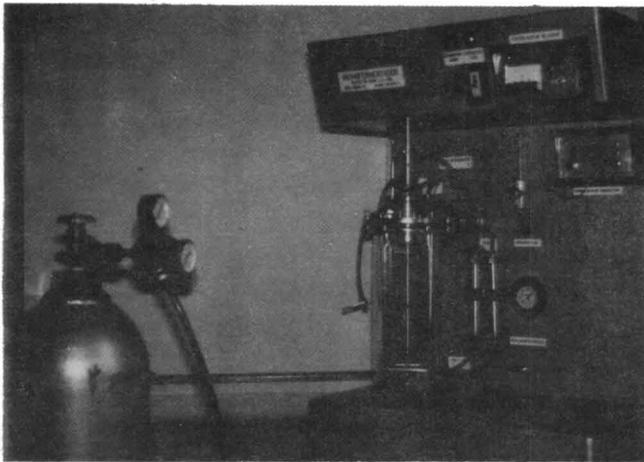


FOTO 3.

MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA

El equipo se construyó, adecuó y calibró en los talleres de la Universidad. Se diseñó y construyó una estructura metálica con los soportes necesarios para una adecuada instalación y funcionamiento de cada una de las partes componentes del equipo. Un esquema donde se muestra un montaje completo del equipo se presenta en la figura 7, fotografías 3 y 4.

Se determinaron curvas de calibración para el sensor de temperatura, y el medidor de flujo de gas; se comprobó un buen funcionamiento del equipo.

Para una correcta instalación, operación, y mantenimiento se elaboró un manual de instrucciones para las personas interesadas en manejar el

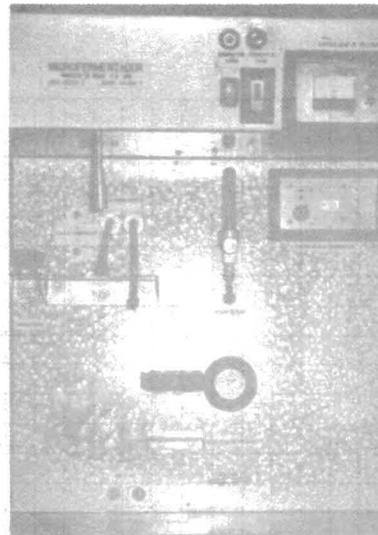


FOTO 4.

equipo. En la tabla 1 se presenta un resumen de las características y especificaciones del equipo construido.

CONCLUSIONES

- En la Universidad existe la tecnología y recursos suficientes para desarrollar este tipo de equipos.
- Un proyecto de esta magnitud y naturaleza debe ser de carácter interdisciplinario con el fin de agilizar su desarrollo y obtener mejores resultados.
- Se pueden y deben canalizar los recursos y la infraestructura existente en la Universidad para abordar con éxito este tipo de proyectos.
- La infraestructura existente en los laboratorios y talleres podría ser mejor aprovechada si paralelamente a las labores docentes se apoya aún más la investigación y desarrollo de equipos especializados.
- Ante todo, este equipo se considera un prototipo y por tanto es susceptible de modificaciones y mejoras; este es un primer esfuerzo y es necesario invertir más trabajo e investigación para lograr un mejor prototipo y que este no se convierta en un equipo más construido como parte de un proyecto de grado.
- Comparativamente con los microfermentadores importados, se puede contruir a un costo bastante menor y supliendo las necesidades básicas.
- Para asegurar un buen comportamiento es conveniente contar, desde un comienzo, con elementos de buena calidad.
- El equipo desarrollado es una buena base para el diseño y escalado de otros fermentadores que podrían ser construidos para investigación en biotecnología.
- El microfermentador cumple con las características y requisitos necesarios para adelantar

TABLA 1
Características y especificaciones del microfermentador

Dimensiones: A1 × An × L (mts):	0.38 × 0.60 × 0.50
Peso aproximado (kgs):	55
Capacidad del fermentador	
• Volumen total (lts)	4.3
• Volumen de trabajo (lts)	1.5 - 3.5
Velocidad de agitación (rpm)	0 - 600
Potencia del motor (hp)	1/3
Tipo de impulsor	Turbina de 6 paletas
Número de impulsores	2
Capacidad del medidor de flujo	(lts/min)
• Aire	0 - 5.8
• CO ₂	0 - 4.7
Intervalo de regulación de temperatura (°C)	2°C arriba de la temp. del agua suministrada hasta 75°C.
Precisión de la regulación de temperatura (°C)	± 0.2°C
Suministro eléctrico (voltios C.A.)	110 - 115
Resistencia de calentamiento (vatios)	250
Potencia consumida aprox. (Vat)	750
Consumo de agua (lts/min)	0.45

investigaciones sobre otros procesos químicos además del proceso de fermentación.

NOMENCLATURA

- A_i = Ancho de los deflectores (mts).
 C_p = Capacidad calorífica (N.m./kg. °K)
 D_{AB} = Difusividad del vapor en el gas inerte (m^2/seg).
 D_i = Diámetro del impulsor (mts).
 D_j = Diámetro del impulsor (pulg).
 df = Diámetro de la fibra (mts).
 dp = Diámetro de la partícula (mts).
 gc = Factor de corrección de unidades (kgmol/N. seg).
 H_v = Calor latente de vaporización (N/m seg. °K)
 h = Coeficiente de transferencia de calor para el lado interno de tubos (N/m seg. °K).
 h_{oi} = Coeficiente de transferencia de calor para el lado externo de los tubos referido a el diámetro interno (N/m. seg. °K).
 K = Conductividad térmica (N.m/m. °K).
 K_G = Coeficiente de transferencia de masa para la fase gaseosa (kgmol/m².atm).
 K_u = Parámetro de Kuwabara (adimensional)
 L = Longitud del lecho empacado (mts).
 M_A = Masa del agua en el circuito intercambiador (kgs).
 M_F = Masa en el fermentador (kgs).
 M_v = Peso molecular del vapor (kgs/kgmol).
 N = Número de microorganismos presentes en la corriente en longitud L.
- N_o = Número de microorganismos presentes en la corriente de gas a la entrada del filtro.
 n = Velocidad del impulsor (rpm).
 p = Potencia consumida en sistemas líquidos (vatios).
 P_e = Número Peclet para la fibra (adimensional).
 P_g = Potencia en sistema de gas-líquido (vatio).
 Q = Flujo volumétrico de gas (m^3/seg).
 R_{pt} = Relación de diámetro de partícula a diámetro de fibra (adimensional).
 T_F = Temperatura en el fermentador (°K).
 t = Tiempo (seg)
 U = Coeficiente global de transferencia de calor (N.m/seg °K).
 v = Volumen de líquido (m^3).
 V_s = Velocidad lineal del gas (m/seg).
 α = Fracción volumétrica de sólidos en el filtro (adimensional).
 β = Eficiencia individual de fibra (adimensional).
 β_D = Eficiencia individual de fibra por difusión (adimensional).
 β_i = Eficiencia individual de fibra intersección (adimensional).
 β_{DI} = Eficiencia individual de fibra por difusión-intersección (adimensional).
 β_{IM} = Eficiencia individual de fibra por impactación (adimensional).
 ρ = Densidad del flujo (kgs/ m^3).
 μ = Viscosidad del fluido (Pas).

BIBLIOGRAFIA

1. AIBA S. A. E. Biochemical Engineering. Academic Press, N. Y., 1973.
2. BAILEY J. E. Biochemical Engineering Fundamentals. Mc Graw-Hill, N. Y., 1977.
3. GADEN, Fibrous Filter for Air Esterilization. Ind. and Eng. Chem., December, 1956.
4. HUMPREY, Air Esterilization By Fibrous Media. Ind. and Eng. Chem., May, 1955.
5. JOSHI, J. B. Mechanical Agitated Gas-Liquid Reactors. Chem. Eng. Sci., 1978.
6. KERN, D. Q. Procesos de transferencia de calor. Comp. Edit. Continental, México, 1965.
7. McCABE W. Operaciones básicas de ingeniería química. Ed. Reverté, Barcelona, 1978.
8. QUINTERO R. R. Ingeniería Bioquímica. Ed. Alhambra, México, 1981.
9. RAMSEY - HICKS. How to select turbine agitators for Dispersing gas into liquids. Chem. Eng. July 19, 1975.
10. RAMSEY W. D. How the Desing of Shaft, seal and Impellers affects Agitator Performance. Chem. Eng. August 30, 1976.
11. SHINGLEY J. Engineering Desing. McGraw-Hill, N.Y., 1983.
12. SOLOMONS G. L. Materials and Methods in Fermentation. Academic Press, London, 1969.