

**CARACTERIZACION DE UN DINAMOMETRO  
PARA REALIZAR ESTUDIOS DE CONSUMO  
DE POTENCIA Y MEZCLADO EN TANQUES  
AGITADOS DE NIVEL LABORATORIO**

**TESIS**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRIA EN BIOTECNOLOGIA**

**presenta**

**ALFREDO MARTINEZ JIMENEZ**

**Centro de Investigación sobre  
Ingeniería Genética y Biotecnología  
Universidad Nacional Autónoma de México**

**Cuernavaca, Mor., Mayo de 1990**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



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

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

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

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

# **INDICE GENERAL**

## **RESUMEN**

### **I. INTRODUCCION**

### **II. OBJETIVOS**

### **III. ANTECEDENTES**

**III.1 EQUIPOS PARA LA MEDICION DE POTENCIA EN TANQUES AGITADOS MECANICAMENTE**

**III.2 CURVAS DE POTENCIA AIREADAS Y FORMACION DE CAVIDADES DE AIRE EN FLUIDOS NEWTONIANOS CON TURBINAS DE DISCO**

**III.3 FORMACION DE CAVERNAS EN FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS**

**III.4 DETERMINACION DE PROPIEDADES REOLOGICAS MEDIANTE TORQUIMETROS EN FLUIDOS QUE PRESENTAN PROBLEMAS DE SEDIMENTACION**

### **IV. MATERIALES Y METODOS**

**IV.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO**

**IV.2 DETERMINACION DE TORQUE Y NUMEROS DE POTENCIA**

**IV.3 DETERMINACION DE DENSIDAD**

**IV.4 DETERMINACION DE VISCOSIDAD Y PARAMETROS REOLOGICOS**

**IV.5 TECNICAS VISUAL, FOTOGRAFICA Y DE VIDEOGRABACION PARA EL REGISTRO DE CAVIDADES EN FLUIDOS NEWTONIANOS TRANSPARENTES**

**IV.6 CONDICIONES UTILIZADAS PARA LLEVAR A CABO UNA FERMENTACION AEROBICA EN EL DINAMOMETRO**

**IV.7 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA Y TAMAÑOS DE CAVERNAS EN FLUIDOS NO-NEWTONIANOS PSEUDOPLASTICOS CON PUNTO DE CEDENCIA**

**IV.8 DETERMINACION DEL TORQUE DE FRICCION ESTATICA**

### **V. RESULTADOS Y DISCUSION**

**V.1 PRUEBAS DE OPERACION DEL COJINETE NEUMATICO**

**V.2 ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE, PRECISION Y SENSIBILIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS CON EL DINAMOMETRO**

**V.2.1 INCERTIDUMBRE**

**V.2.2 SENSIBILIDAD A PARAMETROS GEOMETRICOS Y OPERACIONALES**

**V.2.3 PRECISION, EFECTO DEL BRAZO DE PALANCA Y DE LA BASE HUECA**

**V.3 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA SIN AIREACION CON FLUIDOS NEWTONIANOS**

- V.3.1 CURVAS DE POTENCIA EN EL REGIMEN LAMINAR
- V.3.2 CURVAS DE POTENCIA EN EL REGIMEN TRANSIENTE
- V.3.3 CURVAS DE POTENCIA EN EL REGIMEN TURBULENTO
- V.3.4 CONCLUSIONES
  
- V.4 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA CON AIREACION EN FLUIDOS NEWTONIANOS CON TURBINAS DE DISCO Y DIFERENTES ASPERSORES
  - V.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL REGISTRO DE CAVIDADES DE AIRE EN FLUIDOS NEWTONIANOS TRANSPARENTES
  - V.4.2 CURVAS DE POTENCIA A VELOCIDAD DE AGITACION CONSTANTE Y FLUJO DE AIRE VARIABLE
  - V.4.3 CURVAS DE POTENCIA A FLUJO DE AIRE CONSTANTE Y VELOCIDAD DE AGITACION VARIABLE
  - V.4.4 POSIBILIDADES DE EXPERIMENTACION CON FERMENTACIONES EN EL DINAMOMETRO
  - V.4.5 CONCLUSIONES
  
- V.5 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA Y TAMAÑOS DE CAVERNA SIN AIREACION EN FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS CON PUNTO DE CEDENCIA
- V.6 DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS Y NUMEROS DE POTENCIA EN FLUIDOS QUE PRESENTAN PROBLEMAS DE SEDIMENTACION
  - V.6.1 CALIBRACION DEL SISTEMA DE MEDICION DE TORQUE
    - V.6.1.1 CONSTANTE C
    - V.6.1.2 CONSTANTE  $k_s$ 
      - V.6.1.2.1 DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS CON EL VISCOSIMETRO
      - V.6.1.2.2 DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS Y  $k_s$  CON EL SISTEMA DE MEDICION DE TORQUE
  - V.6.3 DETERMINACION DE PROPIEDADES REOLOGICAS DE UN CALDO DE FERMENTACION DE Streptomyces lincolnensis
  - V.6.4 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA EN AUSENCIA DE AIREACION EN UN CALDO DE FERMENTACION DE Streptomyces lincolnensis
  - V.6.5 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA CON AIREACION EN UN CALDO DE FERMENTACION DE Streptomyces lincolnensis
  - V.6.6 CONCLUSIONES

**VI. CONCLUSIONES GENERALES**

**VII. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS**

**VIII. NOMENCLATURA**

**IX. REFERENCIAS**

**X. APENDICES**

- A. CONCEPTOS DE REOLOGIA
- B. DETERMINACION DEL FLUJO DE AIRE
- C. METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS EN MUESTRAS QUE PRESENTAN PROBLEMAS DE SEDIMENTACION
  - B.1 TEORIA
  - B.2 MATERIALES Y METODOS
    - B.2.1 SISTEMA DE MEDICION DE TORQUE
  - B.3 CONSTANTES C, k, Y K
  - B.4 VISCOSIMETRO
- D. MANUSCRITO ACEPTADO PARA SU PUBLICACION EN Chem. Engr. Technol. 1990. A NEW PNEUMATIC BEARING DYNAMOMETER FOR POWER-INPUT MEASUREMENT IN STIRRED TANKS. Roberto Rezéndiz, Alfredo Martínez, Gabriel Ascancio y Enrique Galindo.

## LISTA DE FIGURAS

### No. TITULO

- 1 (a) Patrones de flujo generales y (b) estructura de las cavidades de aire formadas en las palas del impulsor con fluidos Newtonianos en tanques agitados mecánicamente.
- 2 Curvas de potencia en condiciones aireadas para fluidos Newtonianos: (a) curva de potencia a velocidad de agitación constante y flujo de aire variable; (b) curva de potencia a flujo de aire constante y velocidad de agitación variable.
- 3 Diagrama de las cavernas formadas en tanques agitados mecánicamente con fluidos pseudoplásticos.
- 4 Esquema del sistema de medición de torque y equipo auxiliar.
- 5 Dimensiones del sistema de medición de torque: (a) Diámetro del tanque = 0.205 m; (b) Diámetro del tanque = 0.1087 m; y (c) esquema de los impulsores usados.
- 6 Esquema y dimensiones del cojinete neumático.
- 7 Sensibilidad de la potencia suministrada a la velocidad de agitación.
- 8 Sensibilidad de la potencia suministrada al diámetro de impulsor.
- 9 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos con una turbina de seis palas planas con un diámetro igual a 0.36 veces el diámetro del tanque.
- 10 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos con una turbina de seis palas planas con un diámetro igual a 0.526 veces el diámetro del tanque.
- 11 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos con una turbina de seis palas planas con un diámetro igual a 0.635 veces el diámetro del tanque.
- 12 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos en el régimen laminar.

- 13 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos en el régimen turbulento.
- 14 Cavidades de aire formadas para en relación con la curva de potencia a velocidad de agitación constante y flujo de aire variable: (a) curva de potencia; (b) cavidades vortice; (c) cavidades adherentes; (d) cavidades con estructura 3-3; (e) cavidades grandes; (f) inundación del impulsor.
- 15 Curvas de potencia a velocidad de agitación constante con diferentes aspersores de aire.
- 16 Curvas de potencia a diferentes velocidades de agitación.
- 17 Curvas de potencia con diferentes aspersores de aire y flujo de aire constante.
- 18 Cinética de un cultivo de levaduras realizado en el dinamómetro con diferentes aspersores.
- 19 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para un fluido pseudoplástico.
- 20 Comparación del diámetro de caverna determinado experimentalmente con el calculado por la correlación de Elson et al (1986).
- 21 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para fluidos Newtonianos en la región de flujo laminar.
- 22 Relación del torque con la velocidad de agitación para fluidos Newtonianos en la región de flujo laminar.
- 23 Curvas de flujo para los caldos de fermentación de lincomicina obtenidos con el sistema de medición de torque.
- 24 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para caldos de Streptomyces lincolnensis.
- 25 Relación entre el número de potencia y el número de aireación para el caldo de S. lincolnensis de 24 horas a velocidad de agitación constante.
- 26 Relación entre el número de potencia y el número de aireación para el caldo de S. lincolnensis de 48 horas a velocidad de agitación constante.

- 27 Relación entre el número de potencia y el número de aireación para el caldo de S. lincolniensis de 72 horas a velocidad de agitación constante.
- 28 Relación entre el número de potencia y en número de aireación con incrementos y decrementos graduales del flujo de aire, para el caldo de S. lincolniensis de 24 horas a velocidad de agitación constante.

## LISTA DE TABLAS

### No. TITULO

- Tabla 1 Características del sistema de medición de torque.
- Tabla 2 Dimensiones de los impulsores usados.
- Tabla 3 Dimensiones de los aspersores de aire contruidos.
- Tabla 4 Determinaciones de números de potencia con diferentes brazos de palanca a velocidad de agitación constante.
- Tabla 5 Determinaciones de números de potencia con y sin la caja hueca a velocidad de agitación constante.
- Tabla 6 Correlación entre el número de potencia y el número de Reynolds para fluidos Newtonianos en el régimen laminar.
- Tabla 7 Función de la potencia suministrada con la velocidad de agitación y el diámetro del impulsor encontrada experimentalmente en el régimen laminar para fluidos Newtonianos.
- Tabla 8 Números de potencia mínimos para fluidos Newtonianos en el régimen transiente.
- Tabla 9 Valores experimentales de los parámetros reológicos para los caidos provenientes de la fermentación de lincomicina.

## RESUMEN

En el presente trabajo se describen estudios referentes a la versatilidad y características multipropósito de un dinamómetro diseñado y construido por el Centro de Investigación sobre Ingeniería Genética y Biotecnología, en colaboración con el Centro de Instrumentos, ambos de la UNAM. El trabajo se enfocó al desarrollo de principios y metodologías para llevar a cabo estudios de mezclado; potencia mecánica suministrada por el impulsor, reología e hidrodinámica, incluyendo la formación de cavidades de aire en el área del impulsor y cavernas con fluidos pseudoplásticos en fermentadores de nivel laboratorio agitados mecánicamente. Este equipo permite relacionar estudios de básicos de ingeniería con procesos de fermentación.

El sistema está basado en la medición del torque de reacción en un tanque cilíndrico transparente con un diámetro de 0.205 m, el cual se encuentra soportado sobre un cojinete neumático. La característica más relevante de dicho cojinete es la conicidad de un elemento metálico flotante, que es complementaria a la conicidad de un elemento estático. Este diseño permite colocar cargas excéntricas sin afectar la estabilidad y balance del sistema. El torque de fricción estática en el cojinete neumático fué muy pequeño ( $4 \times 10^{-4}$  Nm) de manera que se desprecia en la mayoría de las determinaciones de torque y/o potencia. De acuerdo a la instrumentación usada y manipulando el sistema de detección del dinamómetro, la incertidumbre obtenida en las

mediciones de torque son menor al 1%. El error de las mediciones de números de potencia con el dinamómetro, normalmente, fueron menores a 2.5%. La respuesta obtenida de la potencia en el regimen turbulento concuerda con lo predicho por el análisis dimensional, debido a que la relación encontrada entre la potencia y la velocidad de agitación es al cubo.

Para caracterizar el equipo se realizaron determinaciones de números de potencia con y sin aireación con fluidos Newtonianos (melaza, soluciones de azúcar y agua potable) y no-Newtonianos (Carbopol 940), para cuatro impulsores de turbina de seis palas planas. Los resultados obtenidos concuerdan de manera general con los reportados por otros investigadores con equipos similares.

Se montaron técnicas visuales, fotográficas y de videograbación, para observar y registrar la evolución de las cavidades de aire, formadas en las palas del impulsor, operando en agua. También se determinaron los tamaños de las zonas mezcladas, cavernas, en fluidos pseudoplásticos con punto de cedencia.

Se describen los métodos que se llevaron a cabo para caracterizar reológicamente un caldo de fermentación de Streptomyces lincolnensis, usado en la producción de linbomicina. En este tipo de fluidos, el fenómeno de sedimentación y el tamaño relativo de las partículas hacen muy difícil e incierta la caracterización reológica en viscosímetros ó reómetros

convencionales. La técnica de medición consistió en determinar el torque transmitido en el dinamómetro por una turbina de disco sumergida en el fluido en cuestión. Los resultados obtenidos mostraron que el sistema de medición de torque permite detectar los cambios de propiedades reológicas de estos fluidos. Las desviaciones que se obtuvieron entre los índices de flujo, para los fluidos de calibración, obtenidos en el viscosímetro y los obtenidos en el sistema de medición de torque, indicaron que el dinamómetro permite determinar el comportamiento reológico de fluidos Newtonianos viscosos y de fluidos no Newtonianos pseudoplásticos.

Se realizaron mediciones de números de potencia en condiciones aireadas y no aireadas para el fluido micelial. Se encontró que, en ausencia de aireación, las curvas de números de potencia a diferentes números de Reynolds tienen tendencias similares a las que presentan las soluciones de polímeros microbianos. La forma de estas gráficas depende de la reología y de la edad de los cultivos.

La operación del dinamómetro es estable y los resultados comprueban que el dinamómetro es confiable para determinar la potencia que suministra el sistema de agitación en tanques de nivel laboratorio agitados mecánicamente. Además, se demostró que el dinamómetro es versátil y de carácter multipropósito, debido a que se pueden realizar, entre otros, estudios de caracterización

de impulsores, de consumo de potencia, de hidrodinámica y de caracterización reológica de fluidos viscosos con problemas de sedimentación.

## 1. INTRODUCCION

Las operaciones de mezclado se encuentran ampliamente diseminadas en la industria, en procesos que involucran cambios físicos y químicos. En consecuencia, el mezclado es una operación unitaria central de muchos procesos industriales y de laboratorio tales como: la industria alimentaria, del papel, de plásticos, de polímeros, del caucho y de fermentaciones, entre otras. Independientemente de que muchos de los conocimientos que existen sobre mezclado se han originado en la industria química, muchos otros sectores llevan a cabo las operaciones de mezclado a gran escala. Es común que en la industria de fermentaciones la mayor parte de la energía eléctrica se consuma en la agitación de fermentadores y tanques de mezclado. De manera que la inversión fija y de operación para llevar a cabo operaciones de mezclado resultan altas (Nienow *et al.*, 1985a).

En la mayoría de las industrias que utilizan la operación unitaria de mezclado, la instrumentación existente es generalmente insuficiente para realizar estudios de mezclado en forma consistente. La falta de conocimientos sobre mezclado, aunado a la falta de instrumentación para detectar un sub o sobrediseño, originan un mezclado inadecuado, que en la mayoría de los casos puede resultar en un producto de mala calidad o de costo elevado. Es claro que las repercusiones debidas a la ignorancia en las operaciones de mezclado pueden ser graves y costosas (Nienow *et al.*, 1985a).

Desafortunadamente, muy pocos profesionistas en el área reciben buena capacitación en fundamentos de procesos de mezclado. Aún con cursos de nivel avanzado, raramente un profesionista puede diseñar equipos de mezclado ad hoc para las necesidades de las industrias. Los mismos ingenieros incluso encuentran dificultades en la selección apropiada de sistemas de mezclado para una aplicación específica. Esto se debe, entre otras cosas, a que no existen códigos de diseño generales, ampliamente aceptados, en operaciones de mezclado (Nienow et al., 1985a) y a que aún existen aspectos básicos de ingeniería de mezclado que se deben estudiar.

Para mezclar, es necesario proveer energía a un sistema dado, usualmente a través de la velocidad de rotación de un impulsor. La velocidad con la cual se provee esta energía, no solo depende del tipo de impulsor usado y de la velocidad con que gira, sino también de las características fisicoquímicas del fluido, de la forma del tanque y de la localización relativa de todos los componentes geométricos del sistema. Por consiguiente, para caracterizar adecuadamente el comportamiento de un determinado sistema de mezclado se deben tomar en cuenta todas las variables en las cuales este opera (Rushton et al., 1950a). El suministro real de potencia al sistema es un dato fundamental para caracterizar diferentes tipos de impulsores y procesos cuando se evalúan en función del medio ambiente específico que los rodea (Rushton et al., 1950 a).

Se sabe que es difícil realizar una medición precisa del suministro de potencia, requiriéndose de equipo especializado (King et al., 1988). Dichas mediciones generalmente no se realizan in-situ en una planta de proceso, dando como resultado final que el suministro de potencia no este bien documentado en la literatura para operaciones en condiciones de procesos de fermentación. Esto se debe principalmente a que las geometrías internas en tanques industriales y piloto de fermentación, no son los usados típicamente en los trabajos básicos de ingeniería de mezclado y de potencia. Además, frecuentemente se realizan cambios de construcción después de que se instala un fermentador y varios investigadores han reportado que ciertos datos de potencia reportados en la literatura científica no son exactos (Bates et al., 1963; Nienow y Miles, 1969; King et al., 1988).

La agitación en la mayoría de las fermentaciones aerobias, tiene entre otros objetivos realizar una dispersión homogénea de una fase gaseosa, generalmente aire, en una fase líquida o medio de cultivo. En este caso el aire se burbujea en el líquido a través de uno o varios orificios colocados en el fondo del tanque, debajo del impulsor inferior. Además, frecuentemente el impulsor ayuda a mantener una fase sólida en suspensión y, en ocasiones, a agitar fluidos de fermentación reológicamente complejos y altamente viscosos. Entender la forma en que los sólidos y/o gases se distribuyen en el seno del líquido para obtener un

sistema homogéneo, es un requisito esencial para diseñar o seleccionar de manera adecuada un agitador (Nienow et al, 1985a; Midoux y Charpentier, 1984).

Existen un amplio número de situaciones en donde el mezclado excesivo, en una forma u otra, no solo ocasiona un gasto excesivo de energía, sino también repercute en decrementos de la productividad. Por ejemplo, en el mezclado de materiales biológicos, suministros excesivos de potencia o velocidades de agitación altas, pueden dañar, en ciertas ocasiones, a los microorganismos en suspensión, especialmente si estos tienen morfología micelial, además de que también se inducen cambios en el metabolismo, velocidad de crecimiento y productividad de los microorganismos (Märkl y Bronnenmeier, 1985). Además, algunas soluciones de biopolímeros, cuyas características reológicas deseadas dependen o resultan de su estructura molecular, se pueden modificar irreversiblemente por causa de una agitación excesiva (Nienow, et al 1985a). En consecuencia, en ciertas aplicaciones mezclar más energéticamente o durante más tiempo, puede ocasionar más daños que beneficios.

El desarrollo de equipos y metodologías para el estudio del comportamiento del mezclado en tanques agitados mecánicamente ha sido una de las principales tareas a las que se han dedicado diversos grupos de investigación en todo el mundo. A partir de los trabajos clásicos de Rushton et al, (1950a, 1950b), Metzner y

Otto (1957); Michel y Miller (1962), Bates et al (1963), Bruijn et al (1974) y Nagata (1975), se han estudiado diversos aspectos del mezclado en tanques agitados mecánicamente con sistemas gas-liquido; cuyo ejemplo típico en el área biotecnológica, son las fermentaciones aerobias. El enfoque de estos estudios ha sido, en primera instancia, orientado a la determinación de números de potencia con fluidos Newtonianos y no-Newtonianos, variando diferentes parámetros geométricos. También se han estudiado aspectos de hidrodinámica tales como movimiento global del fluido (patrones de flujo), tamaños de burbujas, formación de cavidades de aire en la región del impulsor, tanto con fluidos Newtonianos como con no-Newtonianos, efecto de parámetros reológicos, suspensión de sólidos, etc. Sin embargo, se reconoce, Nienow et al, 1985a; Midoux y Charpentier, 1984 y Oldshue, 1983, reconocen que se requiere más trabajo en el área para poder realizar sugerencias sobre procesos de nivel industrial o de laboratorio. Además, desafortunadamente la mayor parte del trabajo publicado está restringido a sistemas aire-agua y con frecuencia es difícil emplear tales resultados en sistemas de relevancia industrial, debido obviamente a que las soluciones no se comportan de la misma manera que los sistemas reales, cuya composición y comportamiento es compleja.

Dado que la potencia suministrada por un diseño particular de impulsor determina en buen grado el medio ambiente del mezclado, (Rushton et al, 1950a). Oldshue (1983) postuló que para la

evaluación de estudios de planta piloto y para asegurar cargas adecuadas en agitadores utilizados en plantas de proceso, es necesaria la calibración de familias de impulsores geoméricamente similares.

Para diseñar y trabajar en condiciones óptimas en tanques agitados mecánicamente, es necesario obtener un conocimiento preciso de aspectos relacionados con la transferencia de masa y calor y con la hidrodinámica (velocidad de agitación y potencia mínima para alcanzar un estado determinado dentro del reactor, retención de aire en el reactor, tamaño de burbujas, etc.) Midoux y Charpentier (1984). Midoux y Charpentier (1984) demostraron con líquidos Newtonianos coloreados y técnicas fotográficas que la mayor parte de la transferencia de masa se lleva a cabo en la periferia del impulsor, que es la zona de mayor turbulencia. En 1974 Bruijn et al realizaron una descripción más amplia, mediante técnicas cinematográficas, de la formación de cavidades de aire en las palas de los impulsores denominados Rushton.

Por otro lado, la mayoría de los estudios reportados en la literatura, incluyen resultados de experimentos llevados a cabo con tanques de geometría denominada "estándar", que frecuentemente no son del todo compatibles o similares con las condiciones geométricas que se tienen en un proceso de fermentación. En consecuencia, es necesario generar conocimiento

básico de ingeniería en condiciones operacionales, geométricas y de composición de fluidos, similares a las que se dan en procesos de fermentación. No solo para tener una descripción cuantitativa desde el punto de vista básico de un proceso, sino también para desarrollar estrategias de operación y control de un proceso de fermentación particular, con el fin de optimizarlo desde el punto de vista de mezclado.

Por otro lado, los microorganismos miceliales, tales como los hongos y actinomicetos, son utilizados ampliamente a nivel industrial para obtener diferentes productos, principalmente antibióticos. Tales procesos presentan cambios drásticos en las propiedades reológicas conforme transcurre el proceso de producción (Aiba *et al.*, 1973; Cooke *et al.*, 1988; Golman y Yu, 1987; Gbewongo *et al.*, 1987) y por consiguiente se requiere de cuidado especial en el escalamiento, mezclado y eliminación del calor metabólico generado en este tipo de procesos. Debido principalmente a la presencia de sólidos insolubles y substratos de elevado peso molecular (por ejemplo, diferentes tipos de harinas), en las etapas iniciales de la fermentación, la mayoría de los fluidos de este tipo presentan características Newtonianas con viscosidades ligeramente mayores a las del agua. Conforme transcurre el proceso de fermentación, la contribución de las harinas a las propiedades reológicas del caldo disminuyen, debido primordialmente a que estas son hidrolizadas por la acción que ejercen las enzimas excretadas por los microorganismos. Sin

embargo, el incremento de la masa celular y principalmente la morfología de los microorganismos (la cual a su vez es una función del tiempo de fermentación, tipo de agitación, aireación, pH, oxígeno disuelto, nivel de nutrientes, etc.), hacen que las propiedades reológicas del medio de cultivo cambien convirtiéndose en fluidos no-Newtonianos con una viscosidad muy alta. En general, en los procesos que se llevan a cabo con hongos está alta viscosidad permanece a lo largo de toda la fermentación y en el caso de los actinomicetos llega a un máximo y posteriormente disminuye. Estos cambios, determinan de manera importante los fenómenos de mezclado global, de transferencia de masa y de calor (Charles, 1978), y de la dispersión de burbujas de aire (Solomon et al., 1981). En consecuencia, en estos procesos de fermentación también se presentan problemas de monitoreo (Charles, 1978). El mezclado inadecuado de una fermentación micelial, si es altamente viscosa, puede dar lugar a gradientes de pH, de oxígeno disuelto o de nutrientes y ocasionar efectos no deseados sobre los microorganismos en zonas estancadas o mal mezcladas (Cooke et al., 1988).

Por otro lado, la cantidad de energía que el sistema de agitación transmite al fluido de proceso, también se ve afectada conforme las propiedades reológicas de los caldos de fermentación cambian. Si el fluido alcanza una viscosidad aparentemente alta, se puede llegar a tener un mezclado deficiente, con zonas no activas o estancadas (Elsom et al., 1986) y ocasionar

disminuciones en el coeficiente volumétrico de transferencia de masa y en la productividad.

Debido a que la velocidad de deformación promedio cambia con la escala de operación, cuando se desea realizar el diseño de un bioreactor y/o plantear una estrategia de escalamiento, es necesario predecir las viscosidades aparentes en un proceso fermentativo (Cooke et al, 1988). Así mismo, conocer la variación de las propiedades reológicas en función de la concentración celular o del tiempo de fermentación y si es posible, tener modelos reológicos de las suspensiones. Por otra parte, para poder realizar inferencias sobre un proceso determinado se requiere evaluar las propiedades reológicas, los fenómenos de transferencia de masa y calor, en función de aspectos tales como la geometría de los sistemas de agitación, la potencia suministrada, la hidrodinámica generada en el tanque, y la velocidad de agitación y aireación, para poder realizar inferencias sobre un proceso determinado.

En virtud de lo mencionado anteriormente es fundamental desarrollar equipos y metodologías diversas para llevar a cabo estudios de mezclado en el área de la bioingeniería.

## **II. OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Contribuir a la generación de conocimiento básico de ingeniería mediante la implementación de métodos y técnicas para llevar a cabo estudios de suministro de potencia y mezclado en tanques de nivel laboratorio agitados mecánicamente.

### **PARTICULARES**

- a) Caracterizar un dinamómetro soportado por un cojinete neumático, con geometría similar a un fermentador de escala semipiloto.
- b) Determinar los intervalos de aplicación, sensibilidad, precisión y reproducibilidad del dinamómetro.
- c) Demostrar la versatilidad y características multipropósito del aparato.

### III. ANTECEDENTES

#### III.1 EQUIPOS PARA LA MEDICION DE POTENCIA EN TANQUES AGITADOS

En la práctica existen diversos métodos para medir el suministro de potencia en tanques agitados mecánicamente. E el método a usar depende, en parte, de la escala del equipo. En general, los métodos de medición de potencia más exactos son aquellos en los que el torque y la velocidad se miden directamente sobre la flecha del impulsor (Oldshue, 1983).

En cualquier escala se pueden usar dinamómetros de torsión o medidores de tensión (transductores de torque electrónicos o "strain gauges", Brown, 1977; Solomons, 1969; Nagata, 1975; Oldshue, 1983).

Para tanques de escala piloto es muy usual emplear dinamómetros de torsión sobre la flecha. Para tanques de escala semipiloto se han utilizado varias configuraciones: a) dinamómetros en donde los motores están acoplados a cojinetes que mantienen suspendido al motor o motores suspendidos por una extensión de la flecha (Brown, 1977), b) dinamómetro con cojinete neumático, ya sea en la base del tanque (Nienow y Miles, 1971) o en el motor (Carlderbank 1958).

Se han desarrollado métodos en los cuales se mide el incremento de temperatura en el líquido en un recipiente aislado, para calcular, por medio de balances de calor, la potencia suministrada al sistema (Oosterhuis y Kossen, 1981). Para la medición en tanques con impulsores múltiples se ha desarrollado una metodología en la cual un resorte acoplado a un impulsor magnetizado permite medir la potencia suministrada individualmente para cada impulsor, (Bar, 1987), o bien se recomienda el uso de varios transductores de torque electrónicos, a prueba de agua, montados en la flecha de agitación (Kuboi et al 1983).

Los trabajos enfocados a la medición de potencia con la ayuda de cojinetes neumáticos, se han realizado con cojinetes cilíndricos en los cuales se forma un colchón de aire en la dirección axial y radial de un elemento fijo (estático) y otro flotante complementario. Se ha demostrado que con el uso de cojinetes neumáticos, para medir el torque de reacción en un tanque de escala pequeña, se obtienen resultados exactos en la medición de potencia suministrada por el sistema de agitación, (Nienow y Miles, 1971; Nagata, 1975), siempre y cuando se tomen las precauciones necesarias para eliminar los efectos debidos a la fricción. Frecuentemente, una fuente grave de error en la determinación de potencia es la fricción estática que presenta un dinamómetro (Nagata, 1975). Con el fin de evaluar el efecto real de varios parámetros se requiere un dinamómetro que tenga

fricción estática despreciable, o bien conocer este valor para tomarlo en consideración en los cálculos de potencia. La fricción estática puede ser evaluada midiendo el torque de fricción estática, esto es, el torque mínimo que se requiere para girar el recipiente que flota y que se origina esencialmente, en este caso, por la fricción que existe entre las partes que constituyen el cojinete neumático y la fricción originada por el claro originado por el aire que se introduce al cojinete.

### III.2 CURVAS DE POTENCIA AIREADAS Y FORMACION DE CAVIDADES DE AIRE EN FLUIDOS NEWTONIANOS CON TURBINAS DE DISCO.

Se han empleado diversos métodos para visualizar los patrones de flujo general en tanques agitados. Para el estudio de la hidrodinámica generada se recomienda llevar a cabo los estudios en tanques y fluidos transparentes, de manera que se pueda observar y registrar el movimiento global del fluido, la formación de cavidades de aire en las palas del impulsor, tamaños de burbuja y la retención de aire ("hold-up").

El estudio de la hidrodinámica, en fluidos Newtonianos o no-Newtonianos, ha repercutido en un mejor entendimiento del flujo mono y bifásico en la región del impulsor (Bruijn et al., 1974; Kuboi et al., 1983; Warmoeskerken et al., 1981; Cahue, 1988). Las técnicas más usuales, para tanques cilindricos transparentes con fondo plano, han consistido en:

a) Colocar debajo del tanque una cámara fotográfica, la cual gira sincrónicamente a la misma velocidad del impulsor (Bruijn et al., 1974; Warmoeskerken et al., 1981).

b) Colocar un espejo debajo del fondo plano del tanque, y obtener el efecto de "detener" el giro del agitador con la ayuda de destellos de luz colimada y de dos prismas rotacionales (Kuboi et al., 1983).

c) Colocar debajo del fondo del tanque una cámara fotográfica, la cual esta sincronizada con la frecuencia de la luz emitida, hacia el impulsor, por una lámpara estroboscópica (Cahue, 1987).

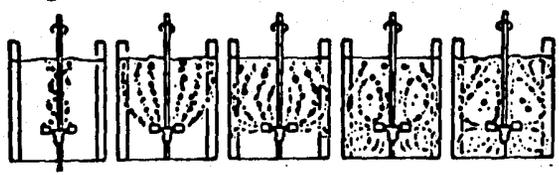
Las turbinas de disco, generalmente con seis palas planas, son los impulsores más ampliamente usados en los trabajos de laboratorio, planta piloto e industriales. Se ha comprobado que es muy difícil desarrollar correlaciones que permitan predecir exactamente la potencia gaseada,  $P_g$ , o los números de potencia en condiciones aireadas (Nienow et al., 1977; Allisford, 1985; Cahue, 1988; Galindo, 1989). Esto se debe a que el flujo de gas que controla el tamaño de las cavidades, no es únicamente el introducido a través del aspersor, sino también el que recircula y coalesce en las palas del impulsor, el cual llega a ser, en fermentadores de pequeña escala, tres veces mayor que el introducido a través del aspersor (Middleton, 1985). Sin embargo, se utilizan números adimensionales, como el número de aireación ( $Fl_a$ ) y el número de Froude ( $Fr$ ), para relacionar cambios sobre

intervalos en los cuales ocurren determinados regímenes hidrodinámicos.

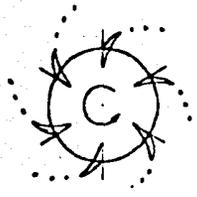
El suministro de potencia en un sistema gas-líquido está controlado por el tamaño y tipo de cavidades de gas que se forman en la parte posterior del impulsor (Bruijn *et al.*, 1974). El flujo de gas-líquido en las cercanías del impulsor es compleja y en consecuencia se requiere del estudio experimental de la evolución de estas cavidades en función de parámetros tales como la velocidad de agitación ( $N$ ) del flujo de aire ( $Q_a$ ) y de las características de los fluidos, entre otros. La existencia de estas cavidades se debe a la formación de zonas de baja presión que se generan en la parte trasera de las palas de un impulsor de turbina. La fase gaseosa es arrastrada por los vórtices cilíndricos (Nienow y Wisdom, 1974) hacia esta zona y forman las cavidades llenas de aire sobre la cara de succión de las palas. El proceso de formación de cavidades pasa a través de varios estadios dependiendo del cambio de velocidad de agitación cuando se mantiene el flujo de aire constante o del cambio del flujo del aire a velocidad de agitación constante (Nienow *et al.*, 1977).

Cuando la velocidad de agitación se mantiene constante y el flujo del aire se incrementa gradualmente, el patrón de flujo global, la curva de potencia y la forma de cavidades de aire en las palas del impulsor cambian de acuerdo a lo mostrado en las figuras 1a, 1b y 2a respectivamente.

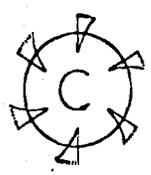
— INCREMENTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACION —  
 ← INCREMENTO DEL FLUJO DE AIRE →



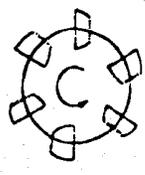
(a)



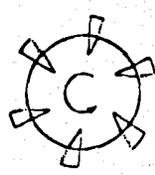
VORTICE



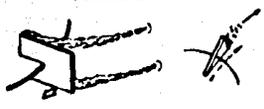
ADHERENTES



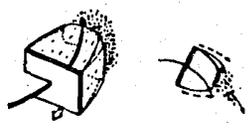
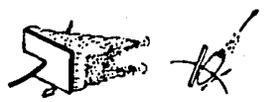
3-3



DESIGUALES



PUENTE



(b)

Figura 1 (a) Patrones de flujo generales y (b) estructura de las cavidades de aire formadas en las palas del impulsor con fluidos Newtonianos en tanques agitados mecánicamente.

Cuando el flujo de aire se mantiene constante y la velocidad de agitación se incrementa gradualmente, el patrón de flujo global, la curva de potencia y la forma de cavidades de aire en las palas del impulsor cambian de acuerdo a lo mostrado en las figuras 1a, 1b y 2b, respectivamente.

Aunque se reconoce que las cavidades de aire controlan la forma de la curva potencia vs número de aireación, es necesario desarrollar modelos que permitan predecir el tipo de cavidad bajo diferentes condiciones de operación. Además, en virtud de que la curva de potencia vs el número de aireación es de utilidad para el diseño y el escalamiento de procesos, se necesita explicar el efecto de cambio de escala y del diámetro del impulsor sobre esta curva.

### III.3 FORMACION DE CAVERNAS EN FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS

La región bien mezclada, alrededor del impulsor, de un fluido pseudoplástico, ha sido denominada como "caverna" (figura 3; Wichterle y Wein, 1979; Solomon et al., 1981). Este tipo de fluidos, que son comunes en la producción de biopolímeros y en algunas fermentaciones con microorganismos miceliales, pueden presentar problemas para obtener un mezclado homogéneo. Por lo general, el líquido en la región de alto esfuerzo de corte, i.e. en las cercanías del impulsor, es fluido y altamente móvil. Lejos

$P_G/P$  = Relación de potencia consumida en condiciones aireadas a potencia consumida en ausencia de aireación

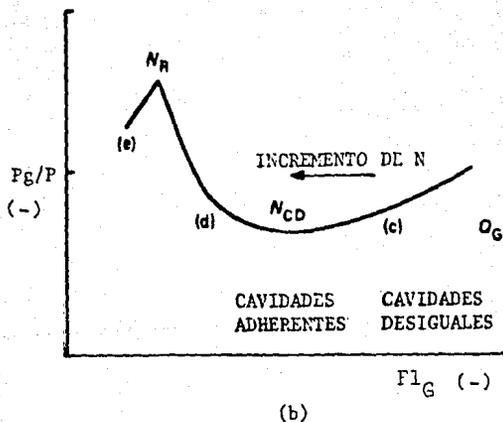
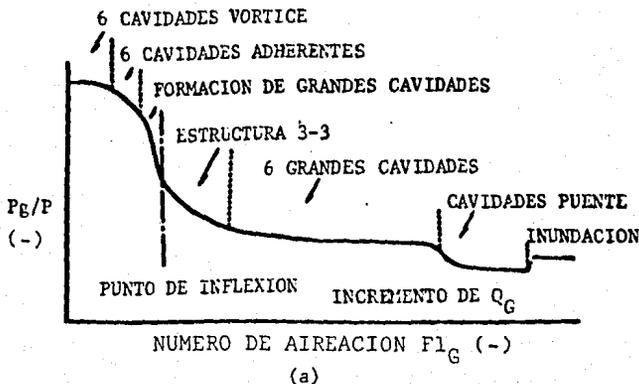
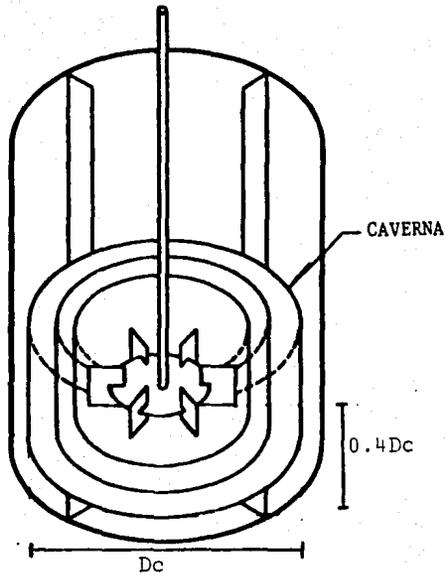


Figura 2 Curvas de potencia en condiciones aireadas para fluidos Newtonianos: (a) curva de potencia a velocidad de agitación constante y flujo de aire variable; (b) curva de potencia a flujo de aire constante y velocidad de agitación variable.



**Figura 3** Diagrama de las cavernas formadas en tanques agitados mecánicamente con fluidos pseudoplásticos.  $D_c$  = a diámetro de la caverna.

del impulsor, donde los esfuerzos de corte son bajos, si no se excede el punto de cedencia el líquido permanecerá estancado, de manera que se forma una caverna de líquido bien mezclado, rodeado por líquido estancado. El límite de la caverna está definido por el área donde el esfuerzo de corte local iguala a el punto de cedencia del fluido (Nienow y Elson, 1988).

Solomon et al (1981) desarrollaron un modelo para predecir el tamaño de las cavernas cuando se utilizan turbinas de disco. El modelo asume que la región en movimiento alrededor del impulsor puede ser descrita por un cilindro, cuya altura corresponde al 40% de su diámetro (figura 3; Elson et al, 1986; Elson, 1988; Nienow y Elson, 1988). Para turbinas de disco, en la región de flujo laminar, el diámetro de la caverna es igual al diámetro del impulsor. El diámetro de la caverna para números de Reynolds ( $Re$ ) mayores a 30 puede calcularse a partir de:

$$D_c^3 = \frac{1.36 P_o \rho N^2 D^3}{\tau_y} \quad (2.1)$$

donde:  $D_c$  es el diámetro de la caverna (m)

$D$  es el diámetro del impulsor de turbina (m)

$P_o$  es el número de potencia (adimensional)

$\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )

$N$  es la velocidad de agitación ( $\text{s}^{-1}$ )

$\tau_y$  es el punto de cedencia (Pa)

A la fecha, se han reportado datos de tamaño de caverna (Elson et al., 1966; Elson, 1968; Nienow y Elson, 1968; Galindo et al., 1968) para soluciones de goma xantana y Carbopol, utilizando técnicas de rayos X con trazadores, anemómetros de película caliente u observación visual de movimiento del fluido en la pared del tanque.

#### III.4 DETERMINACION DE PROPIEDADES REOLOGICAS MEDIANTE TORQUIMETROS EN FLUIDOS QUE PRESENTAN PROBLEMAS DE SEDIMENTACION

Desde épocas pasadas, se ha reconocido la dificultad para determinar propiedades reológicas de caldos de fermentación de organismos miceliales. Sin embargo, varios investigadores en la época de los sesentas (y aún actualmente) han hecho uso indiscriminado de los viscosímetros o reómetros "convencionales" para la determinación de propiedades reológicas de los citados fluidos (Charles, 1976). En muchos casos se ignoraron problemas asociados con la operación de los instrumentos, tales como la destrucción de agregados celulares durante las mediciones, la formación de películas menos densas cercanas a la superficie de los cilindros, la separación de fases y la heterogeneidad del fluido debido a la sedimentación de los micelios y/o a la presencia de agregados celulares (pellets).

En 1973, Bongenaar et al. reportaron un método alternativo para determinar parámetros reológicos de caldos miceliales, aplicando

los modelos de la ley de la potencia y de Casson. Este método consiste en utilizar un impulsor de turbina de disco, en lugar de los cilindros, en un viscosímetro rotacional (Haake Rotovisko). Alternativamente, midieron el torque debido a la rotación angular que sufre un alambre que sujeta a un pequeño recipiente cilíndrico, que a su vez "flota" sobre una solución de glicerol. Los sistemas de medición de torque se calibran con un fluido de referencia (Newtoniano y no-Newtoniano) que no presenten los problemas que se mencionaron en el párrafo anterior. Debido a que el impulsor genera patrones de flujo complejos y los tiempos de mezclado cambian de determinación a determinación, este tipo de sistemas no satisfacen a priori la condición de la medición intrínseca de las propiedades reológicas (Bongenaar et al., 1973; Reuss et al., 1980). Sin embargo se obtienen resultados reproducibles e internamente consistentes (Bongenaar et al., 1973; Kembloski y Kristiansen; 1986). Posteriormente, aplicando el modelo de Casson a caldos provenientes de una fermentación para producir penicilina, Roels et al. (1974) continuaron el trabajo de Bongenaar et al. (1973). En base a medidas de viscosidad y de determinaciones de peso seco, éstos autores realizaron una descripción morfológica cuantitativa del hongo. Posteriormente Metz et al. en 1979 usando cuatro diferentes tamaños de impulsores de turbina y un impulsor de seis paletas (con una alta relación de ancho de paleta (W) a diámetro de impulsor (D),  $W/D = 0.96$ ) ampliaron y mejoraron las bases teóricas de los trabajos de Bongenaar et al. (1973) y Roels et al. (1974). Reuss et

al (1980) determinaron los parámetros reológicos de caldos de fermentación de Penicillium chrysogenum. Dichas mediciones se basaron en la medición de torque en sistemas con impulsores de turbina y de tornillo helicoidal. Sus resultados muestran que las viscosidades aparentes obtenidas con el impulsor de turbina son ligeramente mayores que las obtenidas con el impulsor de tornillo helicoidal.

Con el fin de estudiar las propiedades reológicas de caldos de fermentación de Aureobasidium pullulans, en 1986, Kembloski y Kristiansen, basados en trabajos previos (Bongenaar et al., 1973; Roels et al., 1974; Charles, 1978; Metz et al., 1979), reportaron el uso de un reómetro (Rheomat 115, Contraves), donde reemplazaron el sistema estándar de copa y cilindros, por impulsores de turbina de seis palas con una alta relación de ancho de paleta a diámetro del impulsor, W/D de 1.8 y 2.7. Para determinar las propiedades reológicas de suspensiones de cultivos de células vegetales, Scragg et al. (1988) reemplazaron el sistema de cilindros de un reómetro Contraves por un impulsor de ancla. Los resultados que obtuvieron muestran que una suspensión de células de Catharanthus roseus presenta propiedades pseudoplásticas.

Como puede verse, la implementación de metodologías para determinar parámetros reológicos de fluidos que presentan problemas de sedimentación no sólo es importante para conocer

estos, sino también para estudiar el comportamiento de procesos biológicos que presentan estos problemas y para poder relacionar, los parámetros reológicos, con el proceso en sí.

#### IV. MATERIALES Y METODOS

##### IV.1 DESCRIPCION DEL EQUIPO

La figura 4 muestra un diagrama esquemático del sistema de medición de torque incluyendo todo el equipo auxiliar. En la figura 5a y en la tabla 1 se incluyen las dimensiones geométricas del recipiente, el cual es geoméricamente similar a un fermentador comercial de 14 litros (labroferm, Modelo FS-314, New Brunswick Scientific) y se pueden utilizar los misasos impulsores para ambos tanques. La figura 5b muestra las dimensiones de un recipiente de un fermentador comercial de 2 litros (Multi-Gen, New Brunswick Scientific) que opcionalmente también puede ser soportado por la base mostrada en la figura 4. En ambos recipientes se pueden quitar las mamparas. En la tabla 2 y en la figura 5c se muestran los impulsores usados, sus dimensiones y la nomenclatura que se utilizará en lo subsecuente para designarlos. En la tabla 3 se presentan las dimensiones de los aspersores de aire disponibles.

El cojinete neumático, colocado debajo del recipiente transparente de acrílico, induce a que el recipiente "flote" cuando se introduce aire a través de los jets de aire (figura 6). Las consideraciones de diseño para el cojinete neumático fueron similares a las postuladas originalmente por Nienow y Miles (1969). Una de las diferencias fundamentales con el trabajo

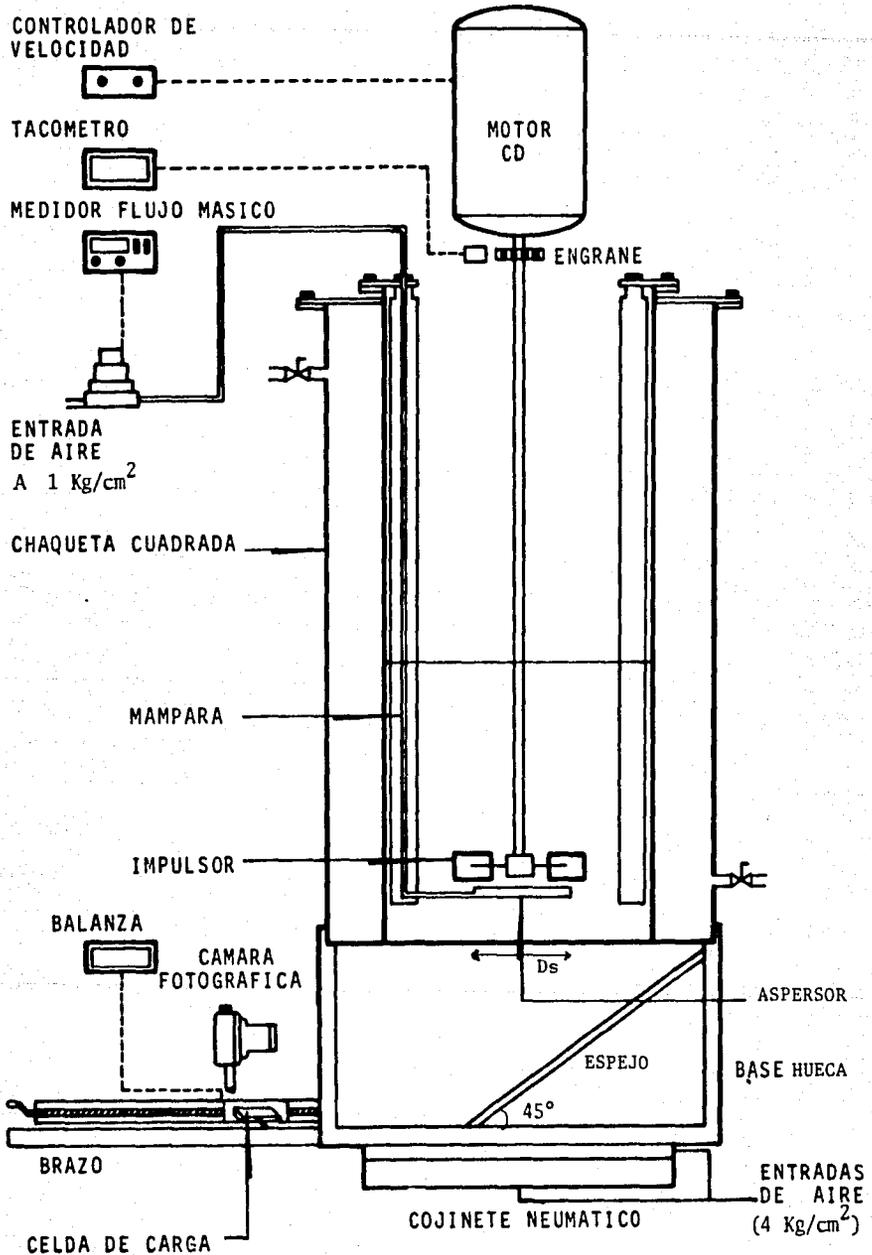
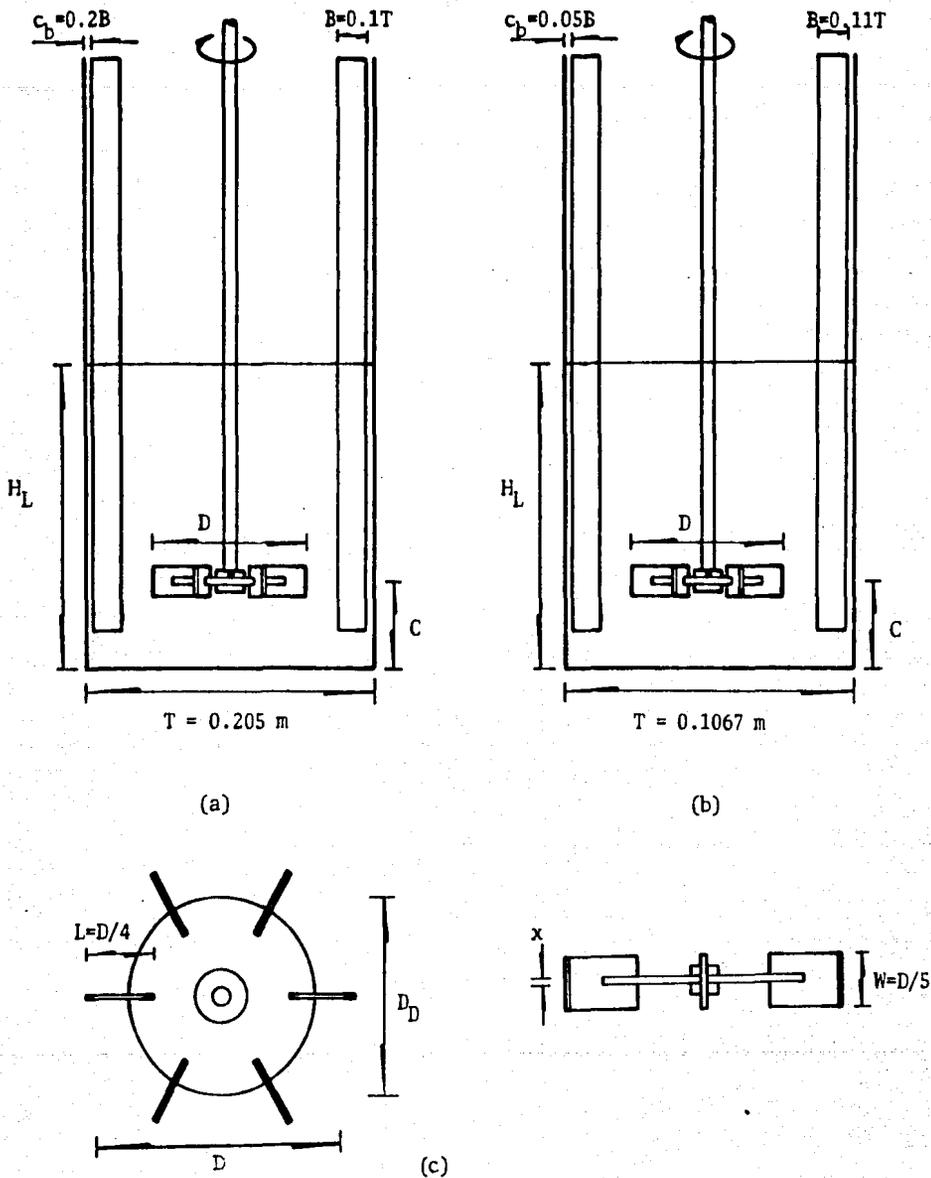
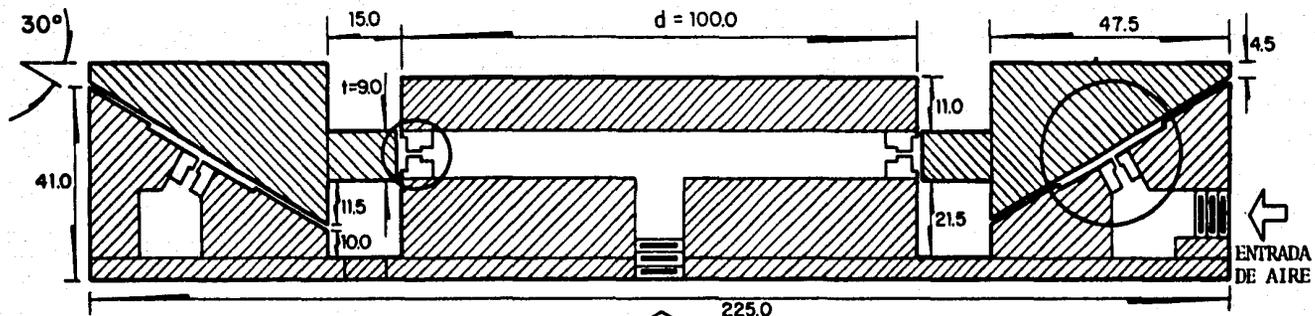


Figura 4 Esquema del sistema de medición de torque y equipo auxiliar.

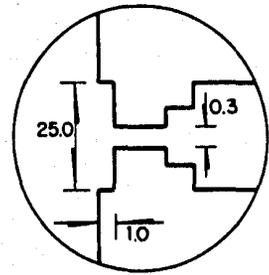


**Figura 5** Dimensiones del sistema de medición de torque: (a) Diámetro del tanque = 0.205 m; (b) Diámetro del tanque = 0.1067 m; y (c) esquema de los impulsores usados.

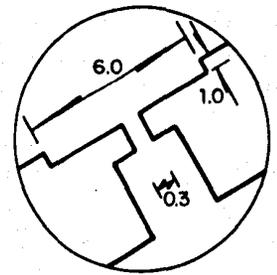


ENTRADA  
 DE AIRE

ACOTACIONES EN: mm



SECCION TRANSVERSAL DE  
 UN JET RADIAL



SECCION TRANSVERSAL DE  
 UN JET AXIAL

Figura 6 Esquema y dimensiones del cojinete neumático.

Tabla 1 Características del sistema de medición de torque.

Nomenclatura	Características	Dimensión m	Relaciones geométricas
T	Diámetro del tanque	0.205	$H_r/T=2.34$
$H_r$	Altura total del tanque	0.480	
B	Ancho de las mamparas	0.0205	$B/T=0.10$ $c_b/T=0.02$
$c_b$	Separación de la mampara a la pared del tanque	0.004	
$N_b$	Número de mamparas	4	

Tabla 2 Dimensiones de los impulsores de turbina de seis palas planas (ver figura 5c para detalles de nomenclatura)

D	D/T T=0.205 m	$D_b/D$ —	$x/D$ —	Peso Kg
0.0485	0.24 (0.45)*	0.61	0.028	0.0281
0.0737	0.36 (0.69)*	0.58	0.0231	0.0585
0.0753	0.37	0.67	0.0066	0.0362
0.1075	0.52	0.65	0.0130	0.0963
0.1295	0.63	0.65	0.0108	0.1351

\* T = 0.1067 m

Tabla 3 Dimensiones de los aspersores de aire construidos.  
 $D_s$  = Diámetro del aspersor de anillo

$D_s$ (m)	$D_s/D$ para			
	D/T=0.36	D/T=0.37	D/T=0.52	D/T=0.64
0.057	0.77	0.75	0.53	0.44
0.081	1.10	1.07	0.75	0.63
0.090	1.22	1.20	0.84	0.69
0.129	1.75	1.71	1.20	1.00

Todos construidos en acero inoxidable con un diámetro interno de 3.97 mm (5/32 plg.) y con barrenos de 0.794 mm (1/32 plg.) cada 24.4°  
Aspersor de orificio con diámetro de salida igual a 3.97 mm (5/32 plg.).

de Nienow y Miles (1969) es que las partes estáticas y móvil son conicamente complementarias. De esta manera se evitan al máximo los problemas de estabilidad, de alineamiento y de oscilaciones, debido a que se obtienen resultantes axiales y radiales de empuje en el mismo plano (figura 6) y la fricción estática se puede despreciar en la mayoría de las determinaciones.

El cojinete neumático tiene dos elementos: uno estático (o inferior) y otro flotante (o superior). El elemento estático tiene una cavidad cónica, cuya función es proporcionar un componente de empuje axial y una parte cilíndrica central la cual proporciona un componente de empuje radial en el buje del cojinete. El elemento flotante tiene una superficie cónica y una cavidad central que complementa y ajusta a el elemento estático. El claro entre la parte cilíndrica central del elemento estático y el elemento flotante se especificó en  $5 \times 10^{-6}$  m.

El elemento estático del cojinete de aire tiene ocho jets, equidistantes, para el componente de empuje axial y seis jets equidistantes para el empuje radial, cuyas dimensiones se muestran en la figura 6.

Tanto los jets radiales como los axiales, se encuentran intercomunicadas a través de un canal de distribución de aire. El empuje axial y radial y la acción del buje del cojinete hacen estable la acción del cojinete. Como puede observarse en la

figura 6, la relación entre el ancho del buje ( $t$ ) del elemento flotante y el diámetro del buje ( $d$ ) del elemento estático es menor de  $1/10$ , aunado a la distribución del aire en el cojinete, esto, además de inducir una alta estabilidad, proporciona resistencia para que el elemento flotante no se incline (o bambolee) cuando se introduce aire a presión. De manera que se reduce a un mínimo el contacto entre los metales que componen la parte estática y la flotante, lo cual permite colocar cargas excéntricas sin afectar la estabilidad y la libre operación del cojinete, p. ej. instrumentación auxiliar.

Como puede observarse en la figura 4, el sistema esta provisto con una chaqueta cuadrada que opcionalmente puede ser usada para el control de temperatura. El sistema de agitación consiste en un motor de corriente directa, de velocidad y torque variable, con una potencia nominal de 186 watts (Pillar Mexicana S.A de C.V. Modelo: 100-25-90, 186 W [1/4 Hp], A. Armadura 2.85 amp., V. Armadura 90 VCD, velocidad nominal 28.6  $s^{-1}$  [1725 rpm], Aislamiento B, campo imán permanente). La velocidad del impulsor se controla a través de dos potenciómetros, uno de ajuste fino y otro de ajuste grueso. La velocidad de rotación del impulsor es medida con un transductor ferro-magnético (Power Instruments, Inc., Modelo 892-1800 OHM-SXC) y un tacómetro (Power Instruments, Inc., Modelo 1715VR), los cuales proporcionan lecturas desde 100 a más de 2000 rpm. La máxima variación observada en la velocidad de agitación fué, en promedio, de  $\pm 1/80$  rpm (1 rpm). El

transductor magnético envía una señal cuando un engrane de material ferroso, con 80 dientes y un diámetro de 0.13 m, gira junto con la flecha, de 0.0079 m (5/16 plg.) de diámetro y 0.73 m de largo. Cuando se introduce aire al líquido, se utiliza un medidor de flujo másico con una precisión de  $\pm 0.2$  litros por minuto (Brooks, modelo 5850C).

Como puede observarse en la figura 4, se construyó una caja hueca, con ángulo de aluminio, la cual puede ser opcionalmente fijada en la base del tanque y actuar como soporte del mismo. Este dispositivo permite realizar observaciones visuales y, si se requiere, registro fotográfico y de videograbación con la ayuda de una lámpara estroboscópica y un espejo colocado como de indica en la figura 4.

En una parte lateral del recipiente se encuentra colocado un brazo rígido de aluminio (con una escala en milímetros) el cual hace contacto en forma perpendicular contra la punta del transductor de una balanza electrónica comercial (OHAUS, modelo C501), con una capacidad de hasta 0.5 Kg, detección mínima de 0.0001 Kg y una precisión de  $\pm 7 \times 10^{-6}$  kg y con posibilidad para interfase (interfase RS232). La celda de carga puede ser variada de posición, esto es, a diferentes brazos de palanca, mediante el uso de un tornillo sin-fin. Es posible llevar a cabo determinaciones de torque con brazos de palanca hasta un máximo de 0.45 m o torques hasta 2.21 Nm. El torque transmitido por el

agitador al líquido, esto es, el torque de reacción (potencia suministrada) puede ser medido cuando el tanque flota, debido a la acción del cojinete neumático, tiende a girar sin restricción y transmite la fuerza de reacción a la de la celda de carga.

#### IV.2 DETERMINACION DE TORQUE Y NUMEROS DE POTENCIA

Las determinaciones de números de potencia, en condiciones aireadas y no aireadas se realizan de la siguiente manera:

- a) Se colocó el tanque sobre el cojinete neumático y el impulsor en la posición deseada. Se colocó la cantidad de líquido con que se trabajó. Se ajustó la velocidad de agitación y el flujo de aire deseados. Si era necesario, se midió la temperatura del líquido con un termómetro. Para los datos reportados en la presente tesis, en todos los casos se usó una altura de líquido igual al diámetro del tanque ( $H_L = T$ ). Para las determinaciones de números de potencia en condiciones no aireadas, el impulsor se colocó a una altura respecto al fondo del tanque de 0.25 veces el diámetro del tanque ( $C = T/4$ ) y cuando se determinó potencia en condiciones aireadas se utilizó  $C = T/3$ .
- b) Cuando las condiciones se estabilizaban (aproximadamente 10 s), se registraba la variación entre fuerza mínima y máxima que detectaba la celda de carga y se promediaba.

c) El torque se calculó de acuerdo a Holland y Chapman (1966), con la relación:

$$M = F \cdot B \cdot \sin \theta, \quad (4.1)$$

donde:

M es el torque (Nm)

F es la fuerza (Kg,  $\cdot 9.81$ ) (N)

B es el brazo de palanca usado (m)

$\theta$ , es el ángulo formado entre el brazo de palanca y la punta de la celda de carga de la balanza ( $^{\circ}$ )

Es importante hacer notar que se debe conocer de manera exacta el ángulo formado entre el brazo de palanca y la punta de la celda de carga, para poder evaluar correctamente el torque. En el presente estudio se tomó la precaución de ajustar este ángulo a  $90^{\circ}$  a todo lo largo del brazo de palanca. Por otro lado, debido a la deflexión de los metales en la celda de carga, cuando se realizan las mediciones, no se puede mantener de una forma estrictamente rigurosa un ángulo constante. Sin embargo, aún cuando se realizaban mediciones con la capacidad máxima de la balanza (0.5 Kg), la deflexión observada de los metales fue muy pequeña y por consiguiente se considero despreciable para la evaluación del torque.

Dado que  $\theta_0 = 90^\circ$ , la relación (4.1) se reduce a:

$$M = F \cdot B \quad (4.2)$$

En el caso de que las fricciones estáticas (y por tanto las pérdidas por torque) sean considerables, es decir, del mismo orden de magnitud de las lecturas realizadas, estas se deben de tomar en cuenta. En este caso la relación anterior se transforma en:

$$M = (F+f) \cdot B \quad (4.3)$$

donde:

$f$  es la fuerza debida a las pérdidas por fricción (N)

La potencia esta dada por la relación:

$$P = M \cdot \omega \quad (4.4)$$

donde:

$P$  es la potencia suministrada por el impulsor al líquido (W)

$\omega$  es la velocidad de desplazamiento angular ( $2\pi N$ ) ( $s^{-1}$ )

$N$  es la velocidad de agitación ( $s^{-1}$ )

Los números adimensionales que se usaron en la tesis fueron:

El número de potencia:

$$Po = P / \rho N^3 D^5 \quad (4.5a)$$

$$Pog = Pg / \rho N^3 D^5 \quad (4.5b)$$

donde:

$Po$  es el número de potencia (número de Newton, Euler o fricción) en condiciones no aireadas que representa la relación del flujo producido por diferencias de presión a fuerzas inerciales

$Pog$  es el número de potencia en condiciones aireadas, (adimensional)

$Pg$  es la potencia suministrada por el impulsor en condiciones de aireación (W)

$\rho$  es la densidad del líquido (Kg/m<sup>3</sup>)

$D$  es el diámetro del impulsor (m)

El número de Reynolds:

$$Re = \rho ND^2 / \mu \quad (4.6)$$

donde:

$Re$  es el número de Reynolds (adimensional), que representa la relación de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas.

$\mu$  es la viscosidad (dinámica) Newtoniana (Paes)

Para fluidos no-Newtonianos, pseudoplásticos que se comportan de acuerdo al modelo de la ley de la potencia (Apéndice A), el número de Reynolds es:

$$Re = \rho N^{2-n} D^n / K k_0^{n-1} \quad (4.7)$$

donde:

$n$  es el índice de flujo del modelo de la ley de la potencia (adimensional)

$K$  es el índice de consistencia del modelo de la ley de la potencia ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ )

$k_0$  es la constante de proporcionalidad entre la velocidad de rotación y la velocidad de deformación (adimensional)

El número de aireación:

$$Fl_0 = Q_0 / N_0 D^3 \quad (4.8)$$

donde:

$Fl_0$  es el número de aireación (adimensional), que relaciona el flujo de aire con la capacidad de bombeo del impulsor

$Q_0$  es el flujo volumétrico de aire ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )

El flujo de aire se estimó de acuerdo al procedimiento descrito en el apéndice B.

**NOTA:** Cuando se usaron líquidos con alta viscosidad, donde se consumía una cantidad considerable de potencia en el mezclado, la energía se disipó como calor y la mezcla se calentó relativamente rápido. En consecuencia, la viscosidad y la densidad cambiaron apreciablemente para estos líquidos. En estos casos la temperatura se registró al momento que se llevaron a cabo las lecturas de torque y de velocidad. Para los cálculos se utilizaron la viscosidad y densidad correspondientes a la temperatura del líquido.

#### **IV.2.2 DETERMINACION DE DENSIDAD**

Cuando así se requería, la densidad de diferentes soluciones, a las temperaturas a las cuales se realizaron los experimentos, se determinaron con la ayuda de una probeta de 25 ml o con un picnómetro para fluidos de baja y alta viscosidad y con una balanza analítica (Bosch, S2000). El procedimiento que se siguió fué el siguiente:

- 1.- Se secaba muy bien el picnómetro o probeta y se pesaban.
- 2.- Se colocaba un volumen conocido de agua, a la temperatura a la cual se determinaba la densidad de la solución y se pesaba.
- 3.- Se eliminaba el agua, secando el picnómetro o probeta, y se sustituía por una cantidad equivalente de la solución

problema, a la temperatura a la cual se determinaba la densidad del líquido, evitando al máximo que se introdujeran burbujas y se pesabar.

4.- La densidad de líquido problema, a la temperatura de la determinación, se calculó mediante la siguiente relación:

$$\rho_{\text{problema}} = \frac{\text{Peso del fluido}}{\text{Peso del agua}} \rho_{\text{agua}} \quad (4.9)$$

#### IV.4 DETERMINACION DE VISCOSIDAD Y PARAMETROS REOLOGICOS

Las determinaciones de viscosidad y de los parámetros reológicos, para fluidos Newtonianos altamente viscosos y para fluidos reológicamente complejos que se comportan de acuerdo al modelo de la ley de la potencia, se realizaron con un viscosímetro coaxial Brookfield LVT de agujas. Este tipo de viscosímetros están basados en el principio de la viscosimetría rotacional, es decir, que la viscosidad se mide a través del torque requerido para hacer girar, a una velocidad constante, una aguja que se encuentra sumergida en la solución problema. El torque requerido para girar la aguja es proporcional a la resistencia a fluir del fluido (viscosidad), que a su vez es causada por la fricción interna del fluido. En el apéndice A se describen algunos conceptos de reología que se consideraron pertinentes incluir en el presente trabajo.

El procedimiento que se siguió fué el siguiente:

- 1.- Se colocaban 0.5 L de la solución problema en un vaso de precipitados de 0.5 L.
- 2.- En el viscosímetro se instalaba la aguja que permitía realizar el mayor número de lecturas de torque a las velocidades disponibles en el viscosímetro, en este caso: 0.005, 0.010, 0.025, 0.05, 0.1 0.2, 0.5 y  $1 \text{ s}^{-1}$ . Se sumergía la aguja dentro de la muestra, presionando el embrague y se cuidaba que el nivel superior de la muestra coincidiera con la marca de inmersión de la aguja.
- 3.- Con el embrague libre, la aguja se giraba con la mano y se ajustaba el indicador de lecturas a cero. Se presionaba el embrague seleccionando la velocidad a la cual se efectuaba la medición y sosteniendo el embrague se ponía a funcionar el viscosímetro.
- 4.- Se sueltaba suave y lentamente el embrague. Cuando se estabilizaba el indicador de lecturas, se presionaba de nuevo el embrague. Se apagaba el viscosímetro cuando el indicador de lecturas pasaba por la mirilla y se tomaba la lectura indicada.
- 5.- La estimación del punto de cedencia se realizó mediante el método directo de "relajamiento de tensión" ("stress relaxation", Hanotte y Galindo, 1990). La cual se realizó de la siguiente manera: una vez que se había tomado la lectura de torque se sueltaba, suave y lentamente, el embrague y se

tomaban las lecturas residuales de torque hasta que estas eran prácticamente constantes. Esta última lectura se tomo como un indicativo del punto de cedencia,  $\tau_y$ .

Se desecharon las lecturas menores o iguales a 10% de la escala, debido a que en este intervalo de lecturas el error de las determinaciones es igual o mayor al 10% y la reproducibilidad de las lecturas, también se reduce (Brookfield Engineering Laboratories, Technical brochure, no fechado).

En el presente trabajo, todas las determinaciones se llevaron a cabo con las agujas cilíndricas LV#1 y #4, sin el protector y en un vaso de precipitados de 0.5 L. De esta manera se puede simular, con una muy buena aproximación, a un cilindro que gira en un medio "infinito". Adicionalmente, se evitan los efectos de pared que pudiesen existir debido al diámetro del contenedor. Para este caso, el esfuerzo de corte, en flujo laminar, esta dado por (Brookfield Engineering Laboratories, Technical brochure, no fechado; Skelland, 1967):

$$\tau = \frac{M \cdot (\text{Lectura}/100)}{2 \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot e \cdot L_0 \cdot 10^7} \quad (4.10)$$

donde:

$\tau$  es el esfuerzo de corte (Pa)

M es el torque aplicado por el instrumento (673.7  
dinas\*cm)

R, es el radio de aguja cilíndrica (m)

0.009421 m para la aguja #1

0.001588 m para la aguja #4

L, es la longitud efectiva de la aguja (m)

0.07493 m para la aguja #1

0.03396 m para la aguja #4

10<sup>7</sup> factor de conversión de dina/cm<sup>2</sup> a Pa

Bajo las condiciones de operación antes mencionadas, la velocidad de deformación en la superficie de la aguja que gira, está dada, con una exactitud razonable, por (Skelland, 1967):

$$\dot{\gamma} = 2\omega w / n \quad (4.11)$$

donde:

$\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación (s<sup>-1</sup>)

w es la velocidad de desplazamiento angular (2 $\pi$ N) (s<sup>-1</sup>)

n es el índice de flujo del modelo de la ley de la potencia (adimensional)

Debido a su sencillez y a su utilidad para caracterizar reológicamente a fluidos no-Newtonianos, incluyendo caldos de fermentación de polisacáridos y de microorganismos miceliales, se utilizó el modelo de la ley de la potencia (Apéndice A). El modelo de la ley de la potencia establece que:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (4.12)$$

donde:  $\tau$ , es el esfuerzo de corte (Pa)

$K$  es el índice de consistencia (Pa·s<sup>n</sup>)

Casi todas las curvas de flujo pueden ser ajustadas bastante bien al modelo de la ley de la potencia en un intervalo limitado de velocidades de deformación, pero es peligroso extrapolar fuera del intervalo de las mediciones.

Sustituyendo la ecuación (4.11) en la (4.12) y reordenando términos, se tiene:

$$\tau = K e^{(2/n) \cdot e \cdot w^n} \quad (4.13)$$

En un gráfico logaritmico de esfuerzo de corte ( $\tau$ ) vs velocidad angular ( $w$ ), la pendiente corresponde al índice de flujo ( $n$ ) y a partir del valor de la ordenada al origen ( $b$ ) se calculaba el valor del índice de consistencia ( $K$ ):

$$K = \frac{b}{(2/n)^n} \quad (4.14)$$

Encontrados los valores de  $n$  y  $K$ , estos se utilizan para elaborar la curva de flujo,  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$ , mediante el uso de las ecuaciones (4.10) y (4.11).

La viscosidad aparente del fluido se determina mediante la siguiente expresión:

$$\mu_{ap} = \tau / \dot{\gamma} \quad (4.15)$$

donde:

$\mu_{ap}$  es la viscosidad aparente (Pa·s)

#### IV.5 TECNICAS VISUAL, FOTOGRAFICA Y DE VIDEOGRABACION PARA EL REGISTRO DE CAVIDADES EN FLUIDOS NEWTONIANOS TRANSPARENTES

La observación visual de las cavidades de aire formadas en las palas de los impulsores, se realizaron con el auxilio de una lámpara estroboscópica (General Radio, 1531-1b STROBOTAC) colocada a la altura de la parte inferior del tanque en un plano perpendicular al del fondo del tanque y dirigiendo la luz hacia la parte inferior central del impulsor; todo ello en condiciones de oscuridad. Con el objeto de obtener el efecto visual de observar aparentemente estático al impulsor mientras este gira, la velocidad de la lámpara se sincronizó con la velocidad de rotación del impulsor. En el presente estudio, con los impulsores de seis palas la velocidad en la lámpara debe ser seis veces mayor que la velocidad de rotación del impulsor.

El registro con equipo de videograbación se llevó a cabo de manera similar al descrito en el párrafo anterior. Se utilizó una cámara de videograbación con formato para película de 8 mm (Sony HandycamPRO, CCD-V9/V90). El impulsor se enfocó con la ayuda del espejo localizado en la parte inferior del tanque con una inclinación aproximada de 45°. La cámara se conectó a un monitor de color (Sony Trinitron) de manera que se podía observar a través de este los cambios en la estructura de las cavidades conforme se cambiaban las condiciones de operación (agitación y/o aireación). Las fotografías se tomaron directamente del monitor con una cámara (Minolta XE-7) a una velocidad de obturación de 1/2 s, con una abertura de diafragma de 3.5 y con una película blanco y negro ASA 400.

#### IV.6 CONDICIONES UTILIZADAS PARA LLEVAR A CABO UNA FERMENTACION AEROBICA EN EL DINAMOMETRO

El medio de cultivo que se utilizó fué el siguiente:

Melaza y agua c.b.p.	12-13	°Bx
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	4.3	g/L
MgSO <sub>4</sub>	35	ppm
ZnSO <sub>4</sub>	80	ppm
pH inicial	4.5	

Para evitar problemas de contaminación, el medio se esterilizó previamente en autoclave a 121°C por 15 minutos. Una vez frío el medio, se colocó la cantidad suficiente en el sistema de medición de potencia para tener  $H_L = T$ .

Se utilizó un control automático del tipo abierto-cerrado para controlar la temperatura mediante la introducción de agua fría o caliente a la chaqueta cuadrada del tanque (figura 4).

Las condiciones de operación se fijaron a una velocidad de agitación de  $5 \text{ s}^{-1}$  y a velocidad de aireación de 1 vvm. Se inoculó con 6% (peso a volumen) de levadura activa seca de panificación (Levadura Safmex). Cada hora se determinó:

- a) La potencia.
- b) Los °Bx con un sacarímetro.
- c) Los azúcares reductores por el método del ácido dinitrosalísílico (Summer y Howell, 1935).
- d) La densidad óptica a 640 nm en un fotocolorímetro (Spectronic 20).
- e) El etanol producido de acuerdo al método descrito por Urióstegui (1989).

#### IV.7 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA Y TAMAÑOS DE CAVERNAS EN FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS CON PUNTO DE CEDENCIA

El fluido de prueba que se usó fué el Carbopol 940 (polimero de acrílico, carboxipolimetileno; Marca CBF GOODRICH) en concentraciones desde 0.2 hasta 0.35%. Las soluciones de Carbopol se prepararon colocando la cantidad de agua requerida para obtener la altura de líquido deseada (la cual fué igual al diámetro del tanque usado), agregando el Carbopol necesario para obtener la concentración deseada. Se tuvo cuidado de no permitir que se hidratara el Carbopol debido a que este es un polvo muy higroscópico. Con el objetivo de homogenizar perfectamente la solución de Carbopol, se dejó mezclando por lo menos 4 horas, y en ocasiones durante toda la noche. La solución homogénea se dejaba reposar o se agitaba a una velocidad muy baja ( $1 \text{ s}^{-1}$ ), para eliminar la mayor cantidad de aire que se pudiese haber atrapado en la solución. Debido a que el Carbopol 940 presenta condiciones estables y características de mayor viscosidad a valores de pH entre 4.5 y 11, el pH de la solución se ajustaba entre 4.5 y 5.5 con hidróxido de potasio al 50% (P/V) y con la ayuda de un potenciómetro (Conductronic pH20). En esta parte también se tuvo la precaución de evitar al máximo la entrada de burbujas a la solución. Cuando la solución estaba completamente homogénea se tomaban 0.5 L o más para realizar las determinaciones de densidad, de los parámetros reológicos y del punto de cedencia, de acuerdo a los procedimientos descritos en

las secciones IV.3 y IV.3, respectivamente

Los experimentos se llevaron a cabo a temperatura constante, en la mayoría de los casos se usó un brazo de palanca de 0.2 m. Para hacer visible la formación de las cavernas, previamente se inyectaba 1 ml de una solución de azul de metileno al 0.1%. La velocidad de agitación se incrementaba de manera gradual. Los números de potencia se calcularon de acuerdo al procedimiento descrito en la sección IV.2. El diámetro de la caverna se midió con la ayuda del espejo y de una regla instalada en la parte inferior externa del tanque. El registro fotográfico se realizó de manera similar al descrito en la sección IV.5, únicamente que en este caso la zona del impulsor se iluminó con dos lámparas de luz blanca de 500 W.

#### IV.6 DETERMINACION DEL TORQUE DE FRICCIÓN ESTÁTICA

El torque de fricción estática se estimó, utilizando un impulsor que proporcionaba suministros de potencia o torques pequeños, incrementando de manera gradual la velocidad de agitación hasta que el recipiente giraba. El torque de fricción estática se determinó usando el impulsor de turbina con un diámetro igual a 0.24 veces el diámetro del tanque (diámetro del tanque = 0.205 m, sin la base hueca) y como fluidos de prueba glicerol ( $\rho = 1260 \text{ Kg/m}^3$ ,  $\mu = 0.764 \text{ Paes a } 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) o agua como fluidos de prueba.

## V. RESULTADOS

El equipo se caracterizó realizando pruebas de operación del cojinete neumático y determinaciones de aspectos de mezclado e hidrodinámica, tales como: torque, potencia suministrada en fluidos Newtonianos y no-Newtonianos por varios impulsores de turbina, formación de cavidades de aire en fluidos Newtonianos, desarrollo de cavernas en fluidos no-Newtonianos y parámetros reológicos en un caldo de fermentación que presenta problemas de sedimentación. A continuación se describen y analizan cada una de las determinaciones realizadas.

### V.1 PRUEBAS DE OPERACION DEL COJINETE NEUMATICO

Con el objeto de que no hubiese contacto entre metales y tener una rotación libre del elemento flotante, se introducía aire a presión en el cojinete neumático (figuras 4 y 6). Para medir el claro de empuje necesario entre el elemento estático y el flotante se utilizó un medidor de precisión. Así mismo se determinó la presión mínima de aire necesaria para soportar una carga determinada sin que ocurriese contacto entre metales. Se encontró que el claro requerido para evitar contacto entre metales cuando se introduce aire a presión fué de  $1.7 \times 10^{-3}$  m. Requiriéndose una presión de aire suministrado al cojinete neumático (figura 4) de  $2.9 \times 10^5$  y  $5.1 \times 10^5$  Pa ( $9.0$  y  $5.2$  Kg $\cdot$ cm $^{-2}$ ) para soportar una carga de 25 y 60 Kg, respectivamente.

El cojinete neumático permitió la libre rotación de cualquiera de los dos recipientes mostrados en la figura 5. El resto del equipo no presentó cargas de fricción dinámica, debido a que la flecha y el sistema de aireación no tocan al tanque.

Con un brazo de palanca de 0.2 m, el impulsor de turbina con un diámetro igual a 0.24 veces el diámetro del tanque (diámetro del tanque igual a 0.205 m, sin la base hueca) y usando glicerol ( $\rho = 1260 \text{ Kg m}^{-3}$ ,  $\mu = 0.764 \text{ Paes a } 24 \text{ }^\circ\text{C}$ ) o agua con fluidos de prueba, el torque de fricción estática que se determinó fue de  $4 \times 10^{-4} \text{ Nm}$ . En consecuencia, para minimizar los errores de las mediciones debido al torque de fricción estática se adoptó como criterio de torque mínimo aceptable  $5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ . De manera que para lecturas de torque pequeños, del orden de  $5 \times 10^{-3}$ , se tienen errores aproximadamente del 8%, causados por el torque de fricción estática. En todos los resultados, el torque mínimo que se tomó en consideración fue mayor a  $5 \times 10^{-3} \text{ Nm}$ .

## V.2 ESTIMACION DE LA INCERTIDUMBRE, PRECISION Y SENSIBILIDAD DE LOS DATOS OBTENIDOS CON EL DINAMOMETRO

### V.2.1 INCERTIDUMBRE

Desafortunadamente, como sucede con otros instrumentos, con el fin de evaluar la exactitud de las mediciones experimentales no

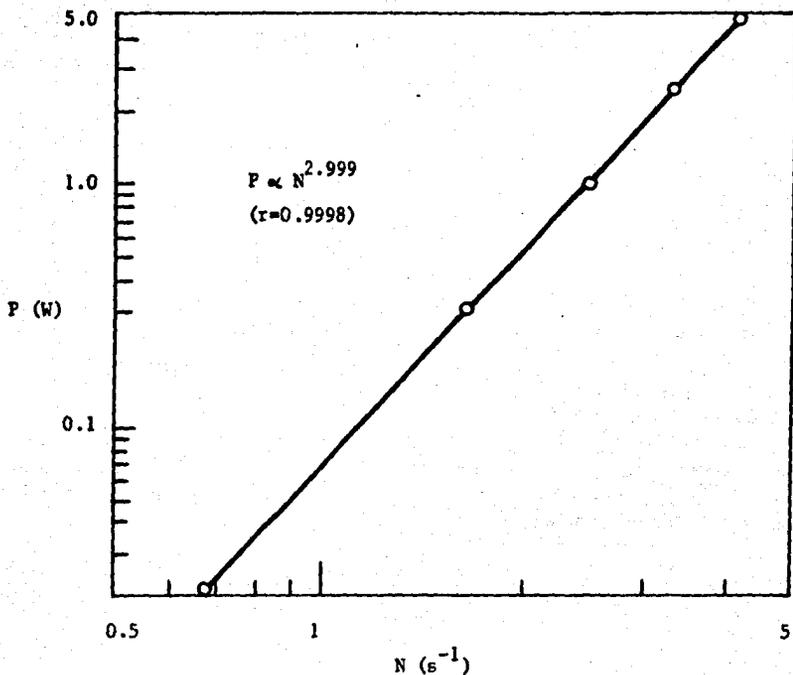
se puede suministrar un valor o patrón de referencia para compararlo con las lecturas del equipo. En tales casos es conveniente expresar los márgenes de incertidumbre del instrumento, con el fin de tener una idea de la desviación de los valores experimentales obtenidos (Holman, 1987).

De acuerdo al método descrito por Holman (1987), la incertidumbre se evaluó en base a las mediciones primarias de la instrumentación usada, la cual resultó ser de 1.1%, y de 0.2% en las mediciones mínimas y máximas de torque.

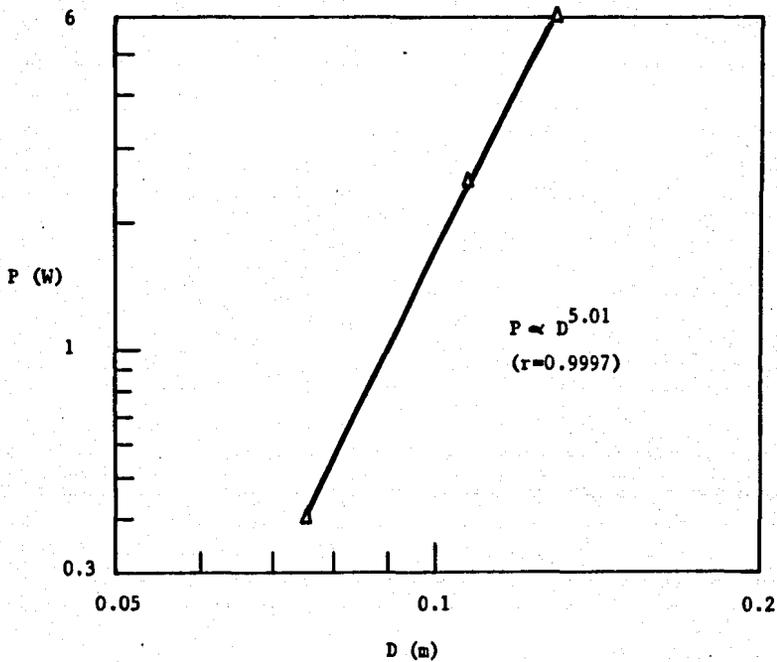
#### V.2.2 SENSIBILIDAD A PARAMETROS GEOMETRICOS Y OPERACIONALES

La sensibilidad, esto es, la respuesta de potencia al cambio en una variable operacional o geométrica, se estimó estudiando la respuesta de las mediciones al cambio en la velocidad de agitación y al cambio del diámetro del impulsor.

La figura 7 muestra la relación obtenida entre la potencia suministrada (en agua sin aireación) y la velocidad de agitación, para el impulsor de turbina con un diámetro de 0.52 veces el diámetro del tanque (antes de que se presente aspiración de aire por la superficie de líquido). La figura 8 muestra una gráfica logarítmica de potencia suministrada por tres diferentes diámetros de impulsores de turbina a una velocidad de agitación fija. Como se esperaba y de acuerdo al análisis dimensional



**Figura 7** Sensibilidad de la potencia suministrada en agua a la velocidad de agitación. Diámetro del impulsor de turbina = 0.53 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Régimen turbulento.



**Figura 8** Sensibilidad de la potencia suministrada en agua al diámetro de impulsor. Impulsores de turbina. Diámetro del tanque = 0.205 m. Velocidad de agitación = 3.33 s<sup>-1</sup>, régimen turbulento.

(Rushton et al., 1950a), la potencia resulto ser proporcional al cubo de la velocidad de agitación y a la quinta potencia del diámetro del impulsor. Estas dos determinaciones, junto con los altos coeficientes de correlación obtenidos (mayores a 0.999), permiten concluir que el sistema de medición de torque es capaz de detectar sensiblemente variaciones geométricas y operacionales.

### V.2.3 PRECISION, EFECTO DEL BRAZO DE PALANCA Y DE LA BASE HUECA

Con el objetivo de determinar si el brazo de palanca no tenía efecto sobre las determinaciones de  $P_o$ , se llevaron a cabo experimentos con un impulsor de turbina (diámetro de impulsor = 0.36 veces el diámetro del tanque) utilizando varios brazos de palanca (0.20 - 0.45 m), a una velocidad de agitación de  $5s^{-1}$ . Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4. Como puede observarse, las desviaciones estándar de los  $P_o$  obtenidos a diferentes brazos de palanca son bajas, lo que permite concluir que no existe un efecto del brazo de palanca.

Para determinar si la caja hueca tenía algún efecto sobre los valores de potencia, se realizaron diez series de determinaciones al azar de números de potencia, tres sin la base y ocho con la base hueca, a diez diferentes velocidades de agitación. Adicionalmente estas determinaciones se utilizaron para determinar la precisión de las mediciones (capacidad de un

**Tabla 4** Determinaciones de números de potencia con diferentes brazos de palanca a velocidad de agitación constante.

Impulsor: T6PP D = 0.36T  
 T = 0.205 m H<sub>L</sub> = T C = T/4  
 Fluido: agua  
 Brazos de palanca: desde 0.2 a 0.45 m  
 con incrementos de 0.025 cm

Cada Po representa el promedio de once determinaciones llevadas a cabo a once diferentes brazos de palanca.

N	Po	$\sigma$	E
(s <sup>-1</sup> )	(—)	(±)	(%)
3	4.648	0.1061	2.28
4	5.019	0.0704	1.40
5	5.026	0.0671	1.33
6	5.119	0.0723	1.41
7	5.121	0.1054	2.06

**Tabla 5** Determinaciones de Po con y sin la caja hueca a velocidad de agitación constante.

Impulsor: T6PP D = 0.36T  
 T = 0.205 m H<sub>L</sub> = T C = T/4  
 Fluido: agua  
 Brazo de palanca: 0.2

Cada Po representa el promedio de diez determinaciones, tres sin la base y siete con la base hueca.

N	Po	E
(s <sup>-1</sup> ) (rpm)	(—)	(%)
2.5 150	4.26	5.67
2.92 175	4.52	2.83
3.33 200	4.65	2.23
3.75 225	4.71	2.68
4.17 250	4.91	1.03
4.58 275	4.92	1.47
5.00 300	4.90	1.60
5.83 350	5.06	1.04
6.67 400	5.13	1.15
7.50 450	5.08	1.10

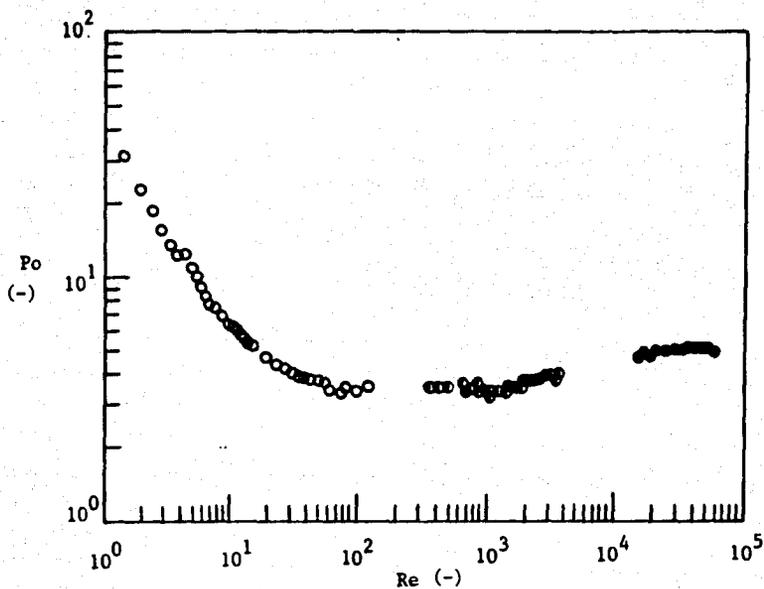
instrumento para reproducir cierta lectura con una exactitud dada). Como puede observarse en la tabla 5, en el peor de los casos, el porcentaje de error entre las determinaciones fué de 5.67, pero generalmente menor de 2.5%. Por consiguiente, se pudo concluir que con o sin la base se obtienen los mismos valores de Po.

Adicionalmente, la celda de carga se calibró de acuerdo a las indicaciones proporcionadas por el fabricante (Directions for Use and Maintenance de balanzas PORT-O-GRAM OHAUS, no fechado). La calibración se repitió tres veces durante un periodo de doce meses y no se encontró ninguna desviación.

#### V.2.4 CONCLUSIONES

La incertidumbre de las mediciones de torque, debida a las mediciones primarias de la instrumentación usada, fue de        y de        en las mediciones de torque.

Se demostró que el sistema de medición de torque es capaz de detectar variaciones geométricas y operacionales con una gran sensibilidad, debido a que de acuerdo al análisis dimensional, en el régimen turbulento la potencia resultó ser proporcional al cubo de la velocidad de agitación y a la quinta potencia del diámetro del impulsor.



**Figura 9** Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos. Turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.36 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Fluidos utilizados: (o) melaza, (e) soluciones de azúcar y (a) agua.

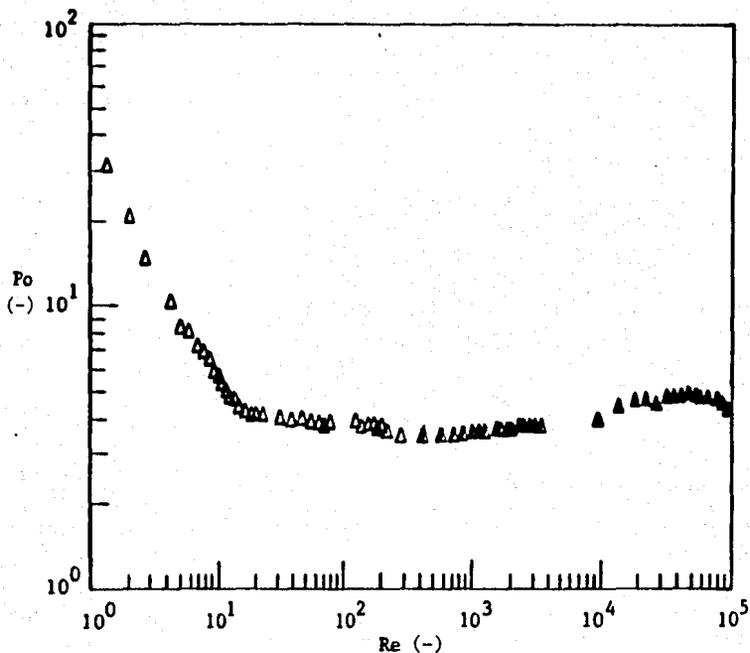


Figura 10 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos. Turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.52 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Fluidos utilizados: ( $\Delta$ ) melaza, ( $\Delta$ ) soluciones de azúcar y ( $\Delta$ ) agua.

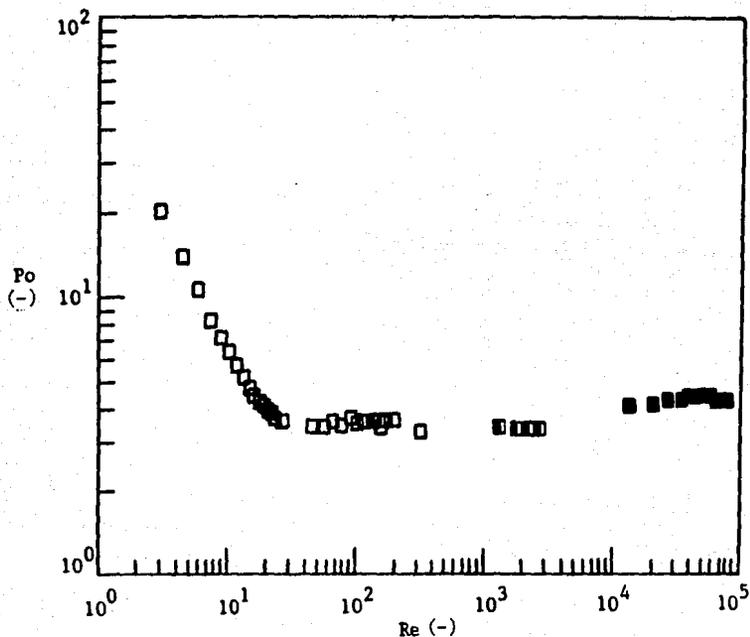


Figura 11 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos. Turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.63 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Fluidos utilizados: (□) melaza, (□) soluciones de azúcar y (■) agua.

Las pruebas realizadas permiten concluir que: a) no existe un efecto de brazo de palanca, debido a que las desviaciones estándar de los números de potencia obtenidos a diferentes brazos de palanca son bajas; b) con o sin la base se obtienen prácticamente los mismos valores de números de potencia; y c) la reproducibilidad de las lecturas obtenidas es mayor, en la mayoría de los casos, al 97.5%.

### V.3 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA SIN AIREACION CON FLUIDOS NEWTONIANOS

Con el propósito de determinar si el equipo era capaz de detectar cambios en las propiedades de los fluidos, en este caso de la viscosidad (reología), se llevaron a cabo varias determinaciones de suministro de potencia desde el régimen laminar al turbulento. Los fluidos empleados fueron agua, soluciones de azúcar al 60 y 80% y melaza, con viscosidades desde  $1 \times 10^{-3}$  hasta 15.8 Paes. Los experimentos se llevaron a cabo con los impulsores indicados en la tabla 2, a temperatura constante. Las figuras 9 a 12 muestran los resultados obtenidos. Las curvas presentan el comportamiento "típico" o esperado de la relación que existe entre el número de potencia y el número de Reynolds.

## V.8.1 CURVAS DE POTENCIA EN EL REGIMEN LAMINAR

De acuerdo a Rushton et al (1950a) y al análisis dimensional, en el intervalo de número de Reynolds de 1 a 10 existe una relación lineal, en coordenadas logarítmicas, entre el número de potencia y el número de Reynolds, cuya pendiente vale -1 (Apendice C, ecuación C.1)

Tomando los datos de las figuras 9 a 11 se obtuvieron la tabla 6 y la figura (12). En la tabla 6 se reportan los valores de las constantes obtenidas para la relación (C.1) para los impulsores usados, en la figura 12 se comparan gráficamente los resultados obtenidos en el régimen laminar. Como puede observarse, por los altos coeficientes de correlación obtenidos, la pendiente ( $m$ ) y la ordenada en el origen ( $c$ ) dependen del diámetro del impulsor. En todos los casos se obtuvo una  $m$  mayor de -1 y  $c$  menor que la curva original reportada por Rushton (1950a).

Además, de acuerdo al análisis dimensional (Rushton et al, 1950a) en el régimen de flujo laminar se debería cumplir que: la potencia fuese directamente proporcional al cuadrado y al cubo de la velocidad de agitación y del diámetro del impulsor, respectivamente. De los resultados presentados en las figuras 7 a 10 se obtuvieron los datos que se muestran en la tabla 7. Debido a que hay una desviación considerablemente grande entre el valor esperado y el valor encontrado experimentalmente de la relación

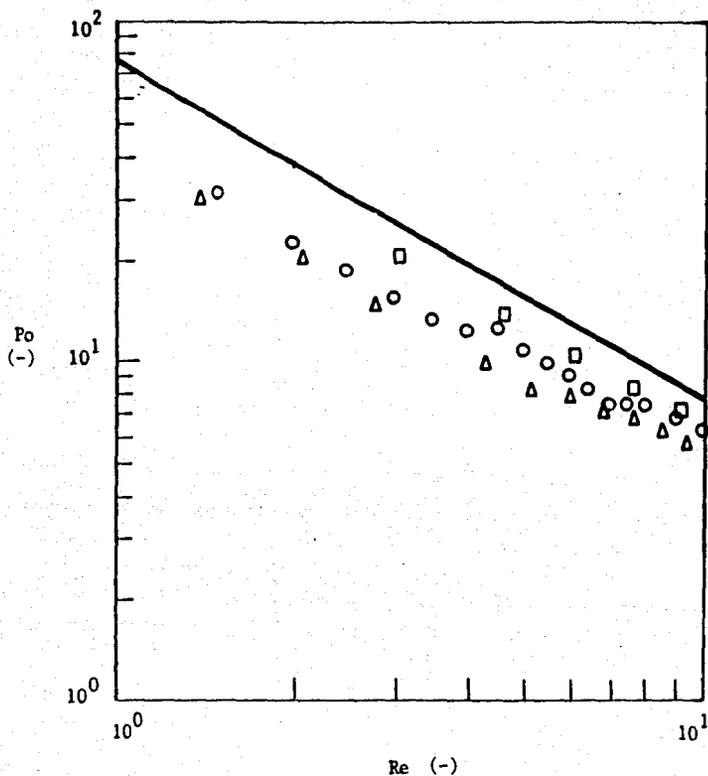


Figura 12 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos en el régimen laminar. Turbinas de seis palas planas. Diámetro del tanque = 0.205 m. Fluido utilizado: melaza. D/T = relación de diámetro de impulsor a diámetro de tanque.

Símbolo

D/T

(o)

0.36

(Δ)

0.52

(□)

0.63

(-)

Fluido Newtoniano Rushton  
et al, 1950b

$D = 0.353T$   $T = 0.216$  m

$H_L = 1.31T$   $C/T = 0.46$

**Tabla 6** Relación de Po-Re en el régimen laminar.  
 Impulsores: T6PP  
 $T = 0.205 \text{ m}$   $H_L = T$   $C = T/4$

D/T	Fluido	T (°C)	$\mu$ (Pa·s)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$c$ (---)	$n$ (---)	$r$ (---)	Re (----)	No. de datos	Desviación respecto a la $n$ esperada (%)
0.36	melaza	30.5-30.5	8.25	1365	43.0	- 0.89	- 0.8929	0.99-9.94	19	11
0.52	melaza	28.5-30.8	7.70	1370	36.88	- 0.84	- 0.8930	1.39-9.42	11	16
0.63	melaza	30.5-31.0	6.25	1365	61.41	- 0.97	- 0.9997	3.05-10.68	5	3

**Tabla 7** Relación de la potencia suministrada con la velocidad de agitación y el diámetro del impulsor en el régimen laminar.

Relación teórica:  $P \propto N^3$  y  $P \propto D^5$

$P \propto N^3$  y  $P \propto D^5$

Impulsor	D/T	$n$	$r$	Desviación respecto a la $n$ esperada (%)	$\beta$ a: $(r=0.99)$	Desviación respecto a la $\beta$ esperada (%)
T6PP	0.36	2.18	0.9762	9.0	3.4	13
T6PP	0.52	2.01	0.9968	0.5		
T6PP	0.63	2.03	0.9999	1.5		

entre el número de potencia y el diámetro del impulsor (tabla 7), se puede asumir que existe un efecto del diámetro del impulsor sobre el número de potencia en el régimen laminar. Respecto a la velocidad de agitación, se observa un efecto poco remarcable debido a que solo los datos para la turbina con diámetro igual a 0.36 veces el diámetro del tanque muestran una desviación alta.

Allisford (1985) también encontró un efecto del diámetro del impulsor sobre los números de potencia utilizando jarabe de maíz (viscosidad igual a 5 Paes) en un tanque con un diámetro de 0.61 m. Este autor postuló que la influencia del diámetro del impulsor sobre el valor de  $c$  se debe, entre otras cosas, a las limitaciones del análisis dimensional, a los cambios en ciertas relaciones geométricas, como la relación que existe del diámetro del tanque y la posición del impulsor respecto al diámetro del impulsor, que decrecen conforme el diámetro del impulsor se incrementa. El incremento en el diámetro del impulsor, y por consiguiente en la longitud de las palas de este, lo cual resulta en alteraciones del patrón de flujo laminar y se genera una zona con vórtices mayores y en consecuencia se requiere suministrar una mayor cantidad de energía para el giro del impulsor. Debido a que las condiciones de flujo laminar cambian a causa de los factores antes mencionados, este fenómeno generaría curvas de potencia con  $n$  menores conforme el diámetro del impulsor se incrementa. Como puede observarse, en la tabla 6, únicamente la turbina con diámetro igual a 0.63 veces el diámetro del tanque

(0.205 m) se encuentra fuera del comportamiento señalado. Puede concluirse que el valor de  $c$  y  $m$  dependen de la configuración geométrica del sistema y de cuanto se pueda aproximar a la condición verdadera de flujo laminar (Allsford, 1985).

### V.3.2 CURVAS DE POTENCIA EN EL REGIMEN TRANSIENTE

En las figuras 9 a 12 se presenta el comportamiento que tiene el número de potencia en función del número de Reynolds para las turbinas, abarcando valores de número de Reynolds de  $10$  a  $10^4$ . De acuerdo a Rushton et al (1950b) esto corresponde al régimen transiente. Como era de esperarse, para valores del número de Reynolds entre  $10$  y cerca de  $100$ , la pendiente negativa de la relación logarítmica entre el número de potencia y el número de Reynolds tiende a hacerse más pequeña hasta llegar a un valor de cero, en donde se observa un mínimo del número de potencia entre números de Reynolds de  $100$  y  $600$  (tabla 8). Estos valores presentan muy buena concordancia con los reportados por Rushton et al (1950b) y Bates et al (1963) quienes, en este régimen, obtuvieron el mínimo del número de potencia a valores del número de Reynolds cercanos a  $200$ . A números de Reynolds por arriba de los correspondientes a los números de potencia mínimos, la pendiente de la curva cambia: se vuelve positiva y se incrementa gradualmente hasta que de nuevo tiende a ser casi prácticamente cero, para números de Reynolds entre  $10^3$  y  $10^4$ .

Tabla 8 Números de potencia mínimos para fluidos Newtonianos en el régimen transiente

Impulsores: T6PP

T = 0.205 m H<sub>L</sub> = T C = T/4

D/T (---)	FLUIDO*	$\rho$ (Kg·m <sup>-3</sup> )	$\mu$ (Pa)	Po. <sub>min</sub> (---)	Re (----)
0.24	SA 80%	1315	0.085	1.96	177
0.36	SA 80%	1315	0.085	3.52	563
0.52	MELAZA	1342	0.800	3.52	226
0.63	MELAZA	1342	0.800	3.4	164

\* SA = solución de azúcar

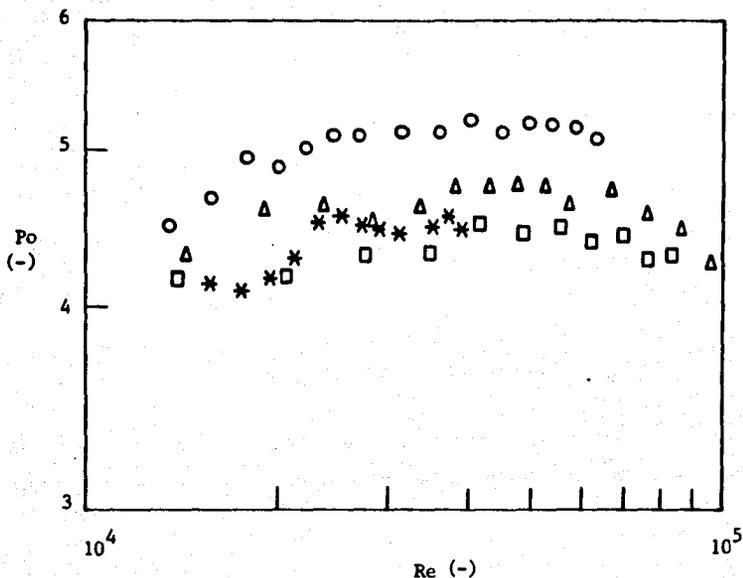
### V.3.3 CURVAS DE POTENCIA EN EL REGIMEN TURBULENTO

En la figura 13 se presentan en una escala ampliada, los resultados obtenidos para los impulsores de turbina de disco en el régimen turbulento. Como puede observarse, los números de potencia en el régimen turbulento dependen del diámetro del impulsor (D) y de la escala (T). Los resultados presentan las tendencias previamente reportadas en la literatura (Nienow y Miles, 1971; Bujalski et al, 1986a y 1986b), esto es: a menor escala menores son los números de potencia; y a menor relación de diámetro de impulsor a diámetro de tanque, para una misma escala, menor es el valor de los números de potencia. Esta tendencia no se presentó con la turbina de diámetro igual a 0.36 veces el diámetro del tanque y no se tiene una explicación para este fenómeno.

### V.3.4 CONCLUSIONES

Se obtuvieron curvas del número de potencia vs el número de Reynolds para turbinas de disco con fluidos Newtonianos. Los resultados muestran el comportamiento "típico" de esta relación para números de Reynolds que abarcan los regímenes laminar, transiente y turbulento.

Se encontró, que en el régimen laminar, la curva de número de potencia vs número de Reynolds depende del diámetro del impulsor,



**Figura 13** Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos en el régimen turbulento. Turbinas de seis palas planas. Diámetro del tanque = 0.205 m. Fluido utilizado: agua. D/T = relación de diámetro de impulsor a diámetro de tanque.

Símbolo	D/T
(o)	0.36
(Δ)	0.52
(□)	0.62
(*)	0.46

‡ Diámetro de Tanque = 0.1067 m

debido a que en todos los casos se obtuvo una pendiente mayor de -1, es decir, mayor a la que predice el análisis dimensional.

En el régimen transiente, los resultados presentan buena concordancia con los datos reportados en la literatura.

Los resultados obtenidos en el régimen turbulento presentan las tendencias previamente reportadas en la literatura, esto es: a menor escala menores son los números de potencia; y con impulsores de menor diámetro, para la misma escala, menor es el valor de los números de potencia.

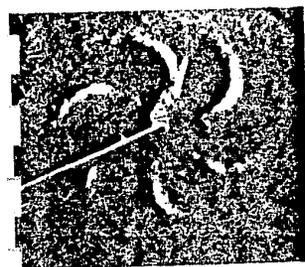
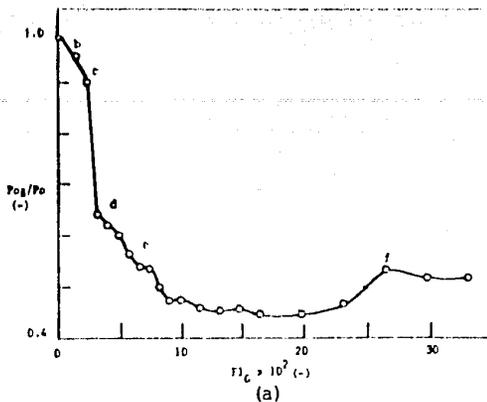
#### **V.4 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA CON AIREACION EN FLUIDOS NEWTONIANOS CON TURBINAS DE DISCO Y CON DIFERENTES ASPERSORES**

En este trabajo se determinó experimentalmente la relación de potencia consumida en condiciones aireadas,  $P_{og}$ , a diferentes números de aireación,  $Fl_a$ , manteniendo constante ya sea el flujo de aire o bien la velocidad de agitación. Se usó el impulsor de turbina con un diámetro igual a 0.36 veces el diámetro del tanque, empleando varios de los difusores de aire construidos.

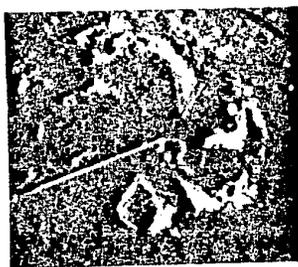
#### V.4.1 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL REGISTRO DE CAVIDADES DE AIRE EN FLUIDOS NEWTONIANOS TRANSPARENTES

En el desarrollo del presente trabajo se realizaron varios esfuerzos para lograr la observación visual y el registro de las cavidades de aire que se forman en la parte posterior de las palas de los impulsores de turbina, cuando se suministra aire en fluidos Newtonianos transparentes. Para lograr este objetivo, se utilizó agua como fluido de prueba. Las técnicas con las que se tuvo mayor éxito son las que se describen en la sección IV.5. La técnica visual fué la más fácil de llevar a cabo y también en la cual fué posible observar con mayor claridad la evolución y características de las cavidades formadas. Sin embargo, para el análisis posterior y para la presentación de trabajos es necesario contar con un registro. En el registro de las cavidades, mediante la técnica de videograbación-fotográfica (descrita en la sección IV.5) se pierde claridad y se deforman las imágenes, debido a que las fotografías se tomaron de un monitor que no es plano. No obstante, se cuenta con fragmentos de películas que muestran la evolución de las cavidades de aire y en el siguiente párrafo se presentan algunos de los registros obtenidos con la técnica fotográfica.

En la figura 14 se presentan los valores obtenidos de la relación de potencia consumida en condiciones aireadas a potencia consumida en ausencia de aireación,  $P_{og}/P_o$ , vs el número de



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 14** Cavidades de aire formadas en relación con la curva de potencia a velocidad de agitación constante y flujo de aire variable. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.36 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Aspersor de orificio. Velocidad de agitación =  $5 \text{ s}^{-1}$ . Fluido utilizado: agua. (a) curva de potencia; (b) cavidades vortice; (c) cavidades adherentes; (d) cavidades con estructura 3-3; (e) cavidades grandes; (f) inundación del impulsor.

aireación, cuando se mantiene una velocidad de aireación constante y se incrementa de manera gradual la velocidad de agitación. También se presentan cinco tipos de cavidades representativas. Como se observa, la relación encontrada de  $P_{og}/P$  para números de aireación bajos fué ligeramente menor de uno y se detectó la formación de cavidades "vórtice" (figura 14b). A medida que la relación  $P_{og}/P$  disminuyó, se presentaron las cavidades "adherentes" (figura 14c). Incrementos adicionales del número de aireación ocasionaron que se formaran cavidades con la estructura "3-3" (figura 14d), lo cual originó decrementos sustanciales de la relación  $P_{og}/P$ . Las cavidades "grandes" (figura 14e) se presentaron con incrementos adicionales del número de aireación, en la parte en la que cambió la concavidad de la curva y en la cual se presentó una relación, prácticamente constante, entre la relación  $P_{og}/P$  y el número de aireación. A números de aireación altos (mayores a 0.25) se presentó el fenómeno de "inundación" del impulsor (figura 14f).

#### V.4.2 CURVAS DE POTENCIA A VELOCIDAD DE AGITACION CONSTANTE Y FLUJO DE AIRE VARIABLE

En la figura 15 se presentan los valores obtenidos de la relación de  $P_{og}/P_o$  vs el número de aireación cuando se mantiene una velocidad de agitación constante y se incrementa de manera gradual el flujo del aire, y empleando los aspersores de anillo (con diámetros del aspersor iguales a 0.77 y 1.1 veces el

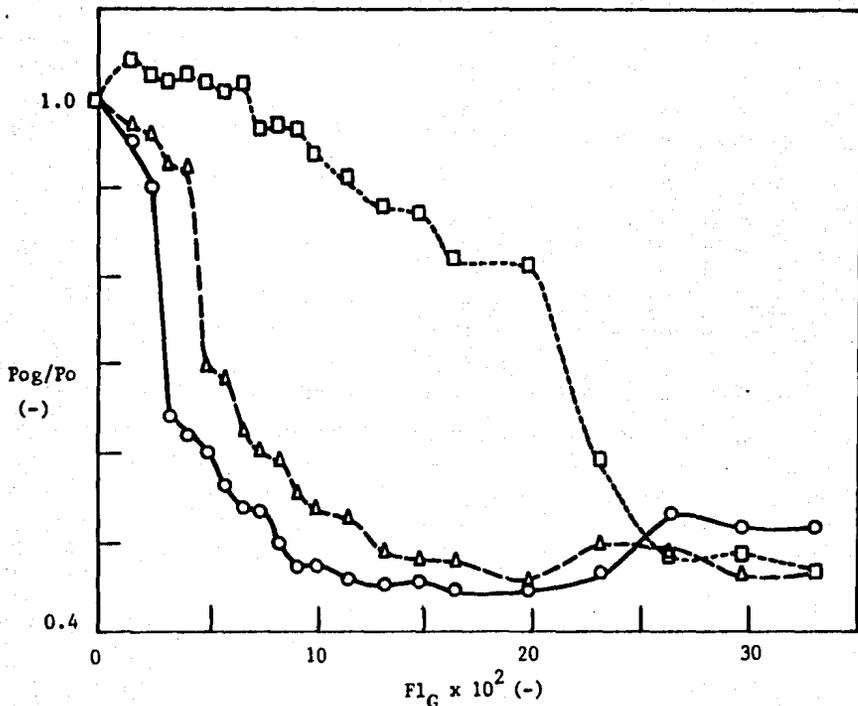


Figura 15 Curvas de potencia con diferentes aspersores, a velocidad de agitación constante y flujo de aire variable. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.36 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Velocidad de agitación = 5 s<sup>-1</sup>. Fluido utilizado: agua. D<sub>s</sub>/D = relación de diámetro de aspersor a diámetro de impulsor.

Símbolo	Aspersor	D <sub>s</sub> /D
(o)	orificio	—
(Δ)	anillo	0.77
(◻)	anillo	1.10

diámetro del impulsor) y el de orificio. Las curvas para el aspersor de anillo con diámetro de 0.77 veces el diámetro del impulsor y con el aspersor de orificio presentan un comportamiento muy similar, aunque la curva para el aspersor de orificio esta por debajo de la curva del aspersor de anillo, en casi todo el intervalo de los números de aireación probados. Este comportamiento se caracteriza por una caída leve de la relación  $P_{og}/P$  a números de aireación cercanos a cero; un decremento mayor hasta llegar a un punto donde cambia la concavidad de la curva; para llegar a una relación en la que el valor de  $P_{og}/P_o$  es independiente del número de aireación .

Como puede observarse (figuras 14f y 15) el impulsor se inundó a un número de aireación de 0.265 cuando se utilizó el aspersor de orificio. Este fenómeno también se observa en la grafica con un incremento de  $P_{og}/P_o$ . El estado hidrodinámico de inundación del impulsor aparentemente no se presentó cuando se utilizaron los aspersores de anillo. Adicionalmente, en la mayor parte del intervalo del número de aireación experimentado, se suministra una mayor cantidad de potencia con el aspersor de anillo, cuyo diámetro es mayor al diámetro del impulsor. Este comportamiento, que ha sido previamente reportado por (Nienow et al., 1986), puede tener ventajas operativas, debido a que se pueden obtener coeficientes de transferencia de masa mayores a una misma velocidad de agitación y aireación. Es decir, que si se compara con los otros aspersores, el aspersor de anillo de diámetro mayor

al diámetro del impulsor, se pueden obtener relaciones de potencia por unidad de volumen mayores, y por lo tanto, de transferencia de masa mayores a menores velocidades de agitación.

Adicionalmente, y de manera general se puede decir que la velocidad de agitación a la cual se llevan a cabo las determinaciones de potencia determinan los valores y forma de la relación  $P_{og}/P$  vs el número de aireación, de manera que a una velocidad de agitación mayor, corresponde un valor menor de la relación  $P_{og}/P_o$  a un mismo número de aireación (figura 16).

#### V.4.3 CURVAS DE POTENCIA A FLUJO DE AIRE CONSTANTE Y VELOCIDAD DE AGITACION VARIABLE

En la figura 17 se presenta la relación del número de potencia en condiciones aireadas,  $P_{og}$ , vs número de aireación cuando se mantiene una velocidad de aireación constante y se incrementa la velocidad de agitación de manera gradual, utilizando los diferentes aspersores. Para el aspersor de orificio y de anillo con diámetro igual a 0.77 veces el diámetro del impulsor, los valores de  $P_{og}$  son muy similares, aunque los del aspersor de anillo permanecen siempre arriba del de orificio. Ambas curvas presentan un mínimo, el cual corresponde a la velocidad de agitación necesaria para alcanzar la condición de flujo de dispersión completa,  $N_{c0}$ , (Nienow et al., 1977; Allisford, 1985).

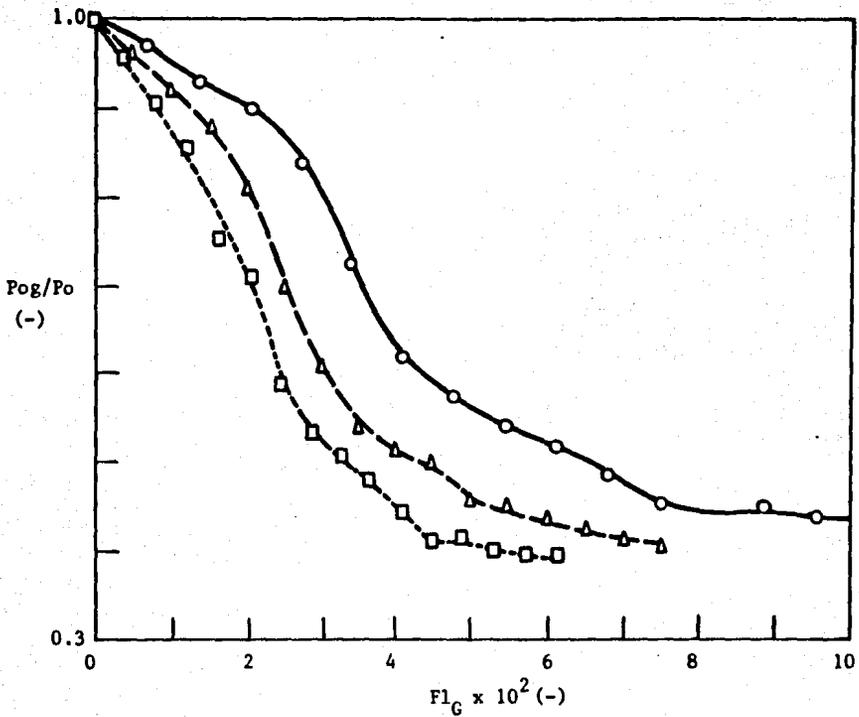
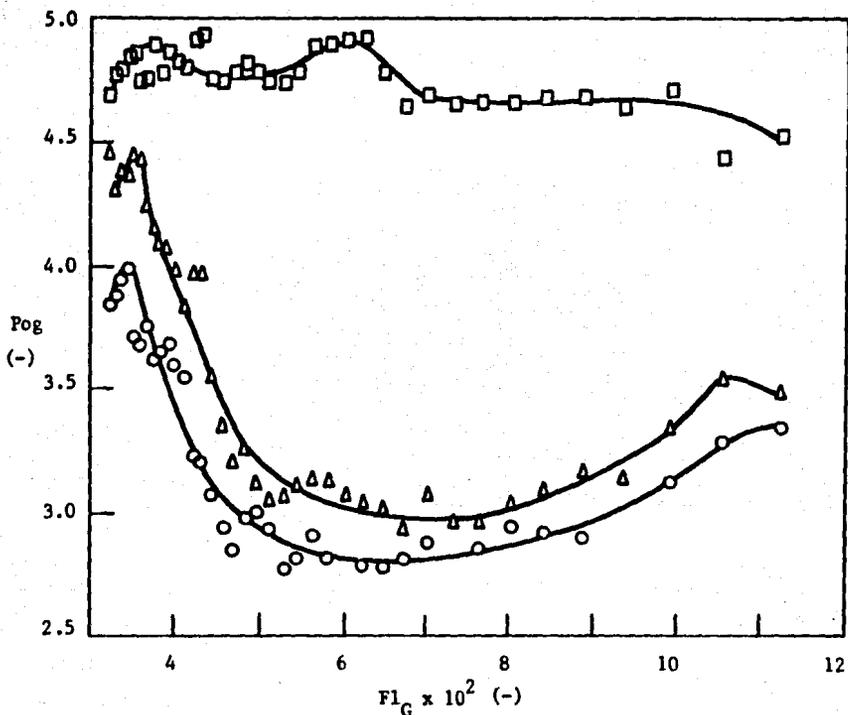


Figura 16 Curvas de potencia a diferentes velocidades de agitación. Para cada curva: velocidad de agitación constante y flujo de aire variable. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.53 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Aspersor de anillo con diámetro igual a 0.75 veces el diámetro del impulsor. Fluido utilizado: agua.  $N$  = velocidad de agitación.

Símbolo	$N$ ( $s^{-1}$ )
(a)	5.67
(b)	7.72
(c)	9.43



**Figura 17** Curvas de potencia con diferentes aspersores de aire, a flujo de aire constante y velocidad de agitación variable. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.36 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Flujo de aire = 1 vvm. Fluido utilizado: agua.  $D_s/D$  = relación de diámetro de aspersor a diámetro de impulsor.

Símbolo	Aspersor	$D_s/D$
(o)	orificio	----
(Δ)	anillo	0.77
(□)	anillo	1.10

La curva de  $Pog$  vs número de aireación (figura 17) obtenida para el aspersor que tiene un diámetro mayor al diámetro del impulsor, resultó muy diferente a la obtenida con el aspersor de orificio y con el aspersor de anillo de diámetro menor al diámetro del impulsor. En la mayor parte del intervalo estudiado, el impulsor suministra alrededor de 55% más de energía cuando se utiliza un aspersor con diámetro mayor al del impulsor respecto a los otros aspersores, a número de aireación similares. Ello puede tener ventajas operativas debido a que, a la misma velocidad de agitación y flujo de aire, cuando se usa el aspersor de anillo con diámetro mayor al diámetro del impulsor, se puede suministrar mayor cantidad de potencia y en consecuencia, esto produciría coeficientes de transferencia de masa mayores (Nienow *et al.*, 1986).

#### V.4.4 POSIBILIDADES DE EXPERIMENTACION CON FERMENTACIONES EN EL DINAMOMETRO

Con el propósito de probar si se podía llevar a cabo algún tipo de fermentación y al mismo tiempo realizar determinaciones de potencia, se decidió probar el aspersor de orificio y el de anillo con el diámetro del aspersor igual a 1.1 veces el diámetro del impulsor, en una fermentación aeróbica para la producción de levadura de panificación. Los métodos para llevar a cabo esta experimentación se describen en las secciones IV.2, IV.3, IV.4 y IV.6.

La densidad promedio del caldo de fermentación fué de 1020 Kg $\cdot$ m<sup>-3</sup> con una viscosidad aproximada de 0.001 Pa $\cdot$ s. No se observaron variaciones significativas en estos parámetros durante el transcurso de las fermentaciones. Desafortunadamente, no fué posible lograr un buen control de temperatura en las fermentaciones y esta vario entre 26.5 y 32.0 °C.

La potencia suministrada que se obtuvo fué prácticamente constante a lo largo de toda la fermentación para ambos tipos de aspersores ( $P_{og}/P_o$  igual a 0.56 y 0.96 para el aspersor de orificio y para el aspersor de anillo respectivamente). Estos valores presentaron una magnitud similar a los obtenidos para agua en condiciones similares (figura 15). Los experimentos se realizaron por duplicado y los promedios de los resultados se presentan en la figura 12. La cinética de consumo de sustrato fué muy similar para ambos casos. En lo que respecta a la cinética de crecimiento, la velocidad específica de crecimiento fué de 0.186 y 0.153 h<sup>-1</sup> para el aspersor de anillo y de orificio, respectivamente (21% mayor para el aspersor de anillo). En el caso del alcohol, las cinéticas presentaron comportamientos muy diferentes y se obtuvo una producción mayor cuando se utilizo el aspersor de orificio. Aunque estrictamente el objetivo de esta parte experimental no fué el discernir cual de los sistemas resulta mejor, es evidente por los datos de biomasa, por las velocidades de crecimiento y por el alcohol producido que los

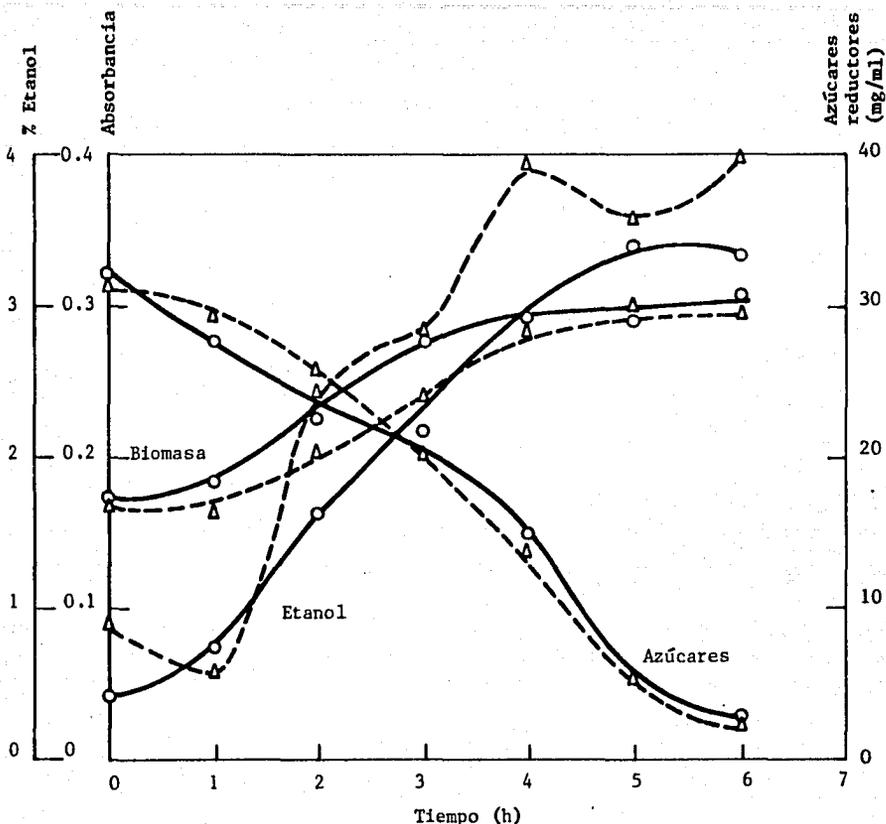


Figura 18 Cinética de un cultivo de levaduras realizado en el dinamómetro con diferentes aspersores. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.36 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Velocidad de agitación =  $5 \text{ s}^{-1}$ . Flujo de aire = 1 vvm. Fluido utilizado: caldo de fermentación.  $D_s/D$  = relación de diámetro de aspersor a diámetro de impulsor.

Símbolo	Aspersor	$D_s/D$
(--Δ--)	orificio	----
(_o_)	anillo	1.10

datos son congruentes con la potencia consumida. Con el impulsor de anillo se introdujo más potencia (y por consiguiente el coeficiente de transferencia de oxígeno debió ser mayor) y se logró una velocidad de crecimiento mayor, una mayor cantidad de biomasa y una menor producción de alcohol.

Aunque resulto algo difícil, complicado y laborioso, se logró demostrar que es posible llevar a cabo fermentaciones en condiciones ascépticas en el equipo y se pudo determinar in situ la potencia suministrada por el sistema de agitación al fluido de fermentación.

#### V.4.5 CONCLUSIONES

La técnica visual fué la más fácil de llevar a cabo y también en la cual se pudieron observar con mayor claridad los cambios y características de las cavidades de aire formadas en las palas del impulsor. En la técnica de videograbación, no obstante que se pierde algo de claridad, se logró obtener un registro continuo de las cavidades. En el registro fotográfico de las cavidades, se pierde claridad y se deforman las imágenes, debido a que las fotografías se tomaron de un monitor que no es plano.

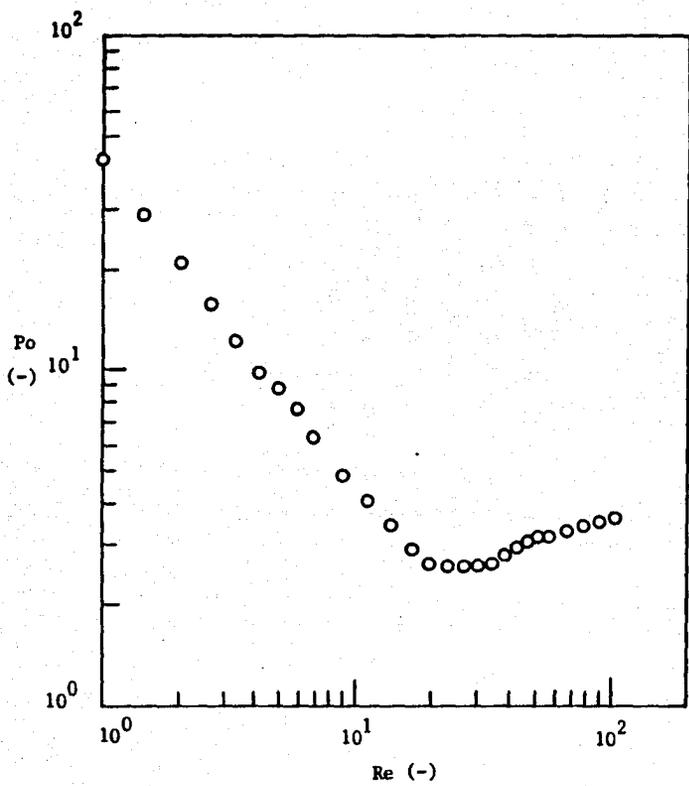
Las curvas de potencia en condiciones aireadas vs el número de aireación para los aspersores de orificio y el de anillo de diámetro menor al diámetro del impulsor presentan un

comportamiento muy similar. En la mayor parte del intervalo de los números de aireación experimentados, se suministra una mayor cantidad de potencia con el aspersor de anillo, cuyo diámetro es mayor al diámetro del impulsor.

La curva del número de potencia en condiciones aireadas vs el número de aireación obtenida para el aspersor que tiene un diámetro mayor al diámetro del impulsor, resultó muy diferente a la obtenida con el aspersor de orificio o con el aspersor de anillo de diámetro menor al diámetro del impulsor. En la mayor parte del intervalo estudiado, el impulsor suministra alrededor de 55% más de energía cuando se utiliza un aspersor con diámetro mayor al del impulsor respecto a los aspersores de orificio y de anillo con diámetro menor al diámetro del impulsor, a números de aireación similares.

#### V.5 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA Y TAMAÑOS DE CAVERNAS SIN AIREACION EN FLUIDOS PSEUDOPLASTICOS CON PUNTO DE CEDENCIA

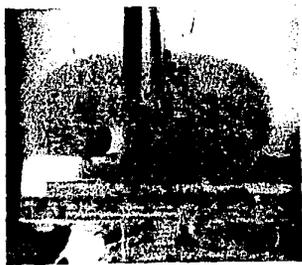
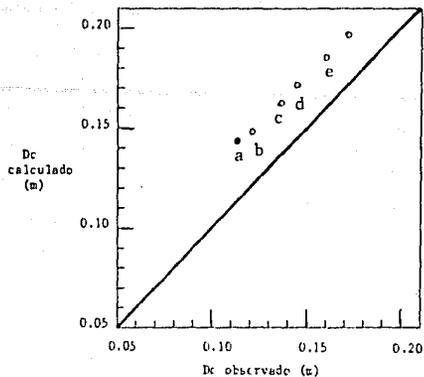
La figura 19 muestran los resultados obtenidos para la determinación de números de potencia con un fluido no-Newtoniano. En primera instancia, se calibró el impulsor de turbina con diámetro igual a 0.36 veces el diámetro del impulsor, para obtener el valor de la constante de proporcionalidad entre la



**Figura 19** Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para un fluido pseudoplástico. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.36 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Fluido utilizado: Carbopol al 0.35% pH = 4.6.  $\tau = 64.12 \times 0.24$ ,  $k_s = 7.89$

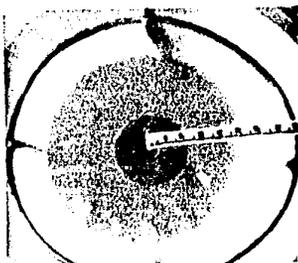
velocidad de deformación y la velocidad de agitación,  $k$ . (Apéndice A y sección V.6.1.2). Se obtuvo un valor de  $k_c = 7.89$  usando Carbopol al 0.35% a un pH de 4.8 (figura 19). Los resultados obtenidos tienen la tendencia que se ha reportado para este tipo de fluidos, es decir una relación lineal con pendiente negativa entre el número de potencia y el número de Reynolds en el intervalo de Reynolds de 1 a 10, un cambio de pendiente hasta llegar a un mínimo y posteriormente un cambio con pendiente positiva en el régimen transiente (Metzner y Otto, 1957; Calderbank y Moo-Young, 1959; Galindo, et al 1988).

En la figura 20a se muestra la comparación del diámetro de caverna observado,  $D_c$ , que se obtuvo con la técnica del azul de metileno (descrita en la sección IV.7) y el Diámetro de caverna calculado de acuerdo a la correlación propuesta por Elson et al (1986) (ecuación 2.1). En las figura 20b a 20e se muestran los resultados fotográficos que se obtuvieron para cada uno de los puntos experimentales mostrados en la figura 20a. Los diámetros de caverna observados son consistentemente menores que los calculados. La diferencia entre el diámetro de caverna calculado y el observado es en promedio 0.03 m. Esta diferencia se puede deber a errores de paralaje o bien a las diferentes formas en que se determinaron los puntos de cedencia en el presente trabajo y el trabajo de Elson et al (1986). Como puede observarse en las fotografías, la técnica con el azul de metileno permite observar con buena resolución y con gran nitidez las dimensiones de las cavernas formadas.

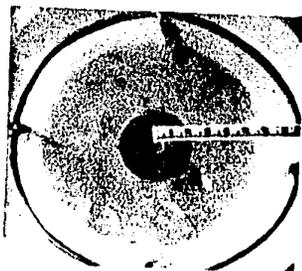


(a)

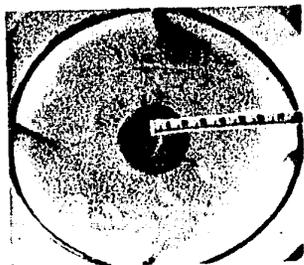
vista lateral



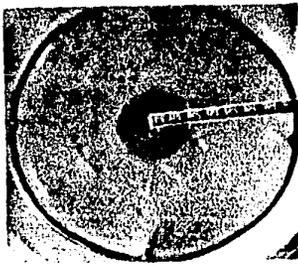
(a)



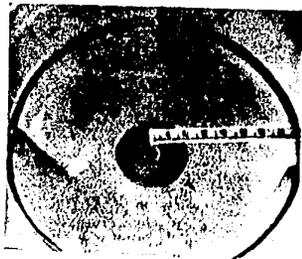
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 20 Comparación del diámetro de caverna determinado experimentalmente con el calculado por la correlación de Elson *et al* (1986). Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.36 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. Fluido utilizado: Carbopol al 0.25% pH = 5.2.  $\tau = 37.12$  y  $0.33$ ,  $k_s = 11.5$ ,  $\tau_y = 23.79$

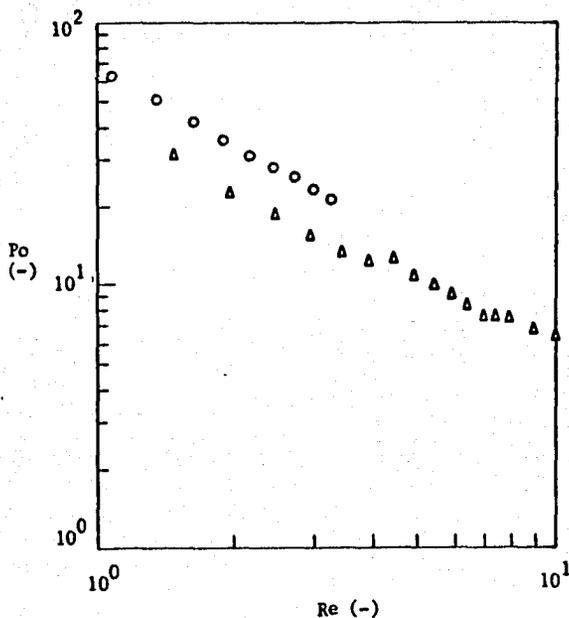
## V.6 DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS Y NUMEROS DE POTENCIA EN FLUIDOS QUE PRESENTAN PROBLEMAS DE SEDIMENTACION

La metodología que se siguió para la determinación de los parámetros reológicos, en muestras que presentan problemas de sedimentación, es la que plantearon originalmente los investigadores de la Universidad de Delf (Bongenaar *et al*, 1973; Roels *et al*, 1974; Mets *et al*, 1979) y que se describe en detalle en el apéndice C. En el presente caso, solo se realizaron ajustes inherentes al sistema de medición de torque. Adicionalmente, para determinar el régimen bajo el cual se realizaron las mediciones, se hicieron ajustes de acuerdo al método propuesto por Metzner y Otto (1957) y por Calderbank y Moo-Young (1959)

### V.6.1 CALIBRACION DEL SISTEMA DE MEDICION DE TORQUE

#### V.6.1.1 CONSTANTE $c$

En la figura 21 se presenta la gráfica de número de potencia vs número de Reynolds, en escala logarítmica, obtenida para el aceite Brookfield 5000 y para la melaza. Para el aceite Brookfield la pendiente de la gráfica obtenida fué de  $-0.97$  ( $n-1$ ) y la constante  $c = 69.1$  ( $r = -0.9993$ ). Para la melaza se obtuvo una pendiente de  $-0.8889$  y la constante  $c = 43$  ( $r = -0.9929$ ). Además, ajustando los datos de torque, para las determinaciones



**Figura 21** Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds, para fluidos Newtonianos en el régimen laminar. Turbinas de seis paletas planas.  $D/T$  = relación de diámetro de impulsor a diámetro de tanque.

Simbolo	Fluido	$D/T$	$T$ (s)
(o)	Aceite Brookfield 5000 a 25°C $\tau = 4.92 \frac{g}{s}$	0.69	0.1067 (sin mamparas)
(Δ)	Melaza a 30.5°C $\tau = 6.25 \frac{g}{s}$	0.37	0.205

antes mencionadas, a la ecuación (C.18) se obtuvo  $n=1$ , lo cual indica, al igual que las determinaciones llevadas a cabo con el viscosímetro, que los fluidos usados son Newtonianos.

#### V.6.1.2 CONSTANTE $k$ .

##### V.6.1.2.1 DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS CON EL VISCOSIMETRO

El fluido de referencia que se usó para la caracterización reológica fué Carbopol 940 a una concentración de 0.2% (peso a volumen) en agua,  $\text{pH} = 5.14$ . La curva de flujo de este fluido se determinó a  $21^{\circ}\text{C}$ . Se encontraron valores de  $n = 0.221$  y de  $K = 18.8 \text{ Pa.s}^n$ . Con el fin de estimar la constante  $k$ , para el sistema de medición de potencia, se usó Carbopol 940 a una concentración de 0.35% (peso a volumen) en agua,  $\text{pH} = 4.8$ . La curva de flujo de este fluido se determinó a  $21^{\circ}\text{C}$ . Se encontró que  $n = 0.241$  y  $K = 64.1 \text{ Pa.s}^n$ .

##### V.6.1.2.2 DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS Y $k$ , CON EL SISTEMA DE MEDICION DE TORQUE

En la figura 22 se presentan los resultados para el fluido de calibración no-Newtoniano en el sistema de medición de torque. Los valores calculados de las constantes reológicas, fueron:  $n = 0.224$  y  $A = 1.443 \cdot 10^{-2}$  ( $r = 0.9893$ ). La desviación entre el

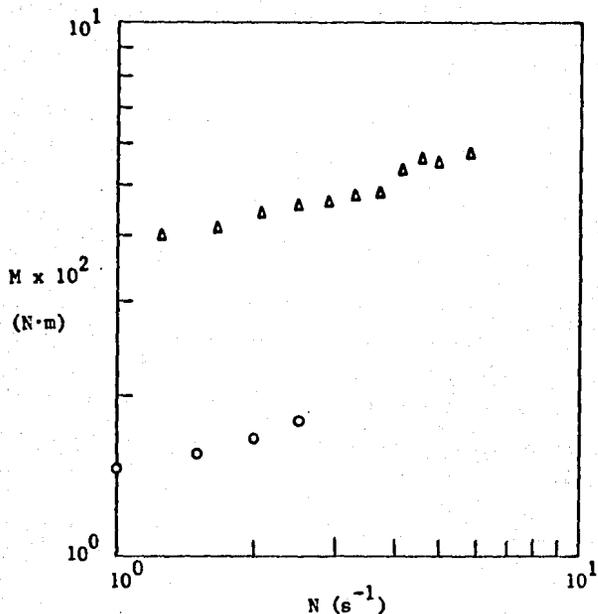


Figura 22 Relación del torque con la velocidad de agitación para fluidos Newtonianos en la región de flujo laminar.  $D/T$  = relación de diámetro de impulsor a diámetro de tanque.

Símbolo	Fluido	$D/T$	$T$ (m)
(o)	Carbopol 940 al 0.25% a pH = 5.14, 25°C $\tau = 18.77 \times 10^{-24}$ $k_s = 9.5$	0.69	0.1067 (sin mamparas)
(Δ)	Carbopol 940 al 0.35% a pH = 4.8, 21°C $\tau = 64.12 \times 10^{-24}$ $k_s = 7.9$	0.37	0.205

índice de flujo obtenido con el viscosímetro y el obtenido con el sistema de medición de torque fué de - 0.003 (Error = -1.36%), el cual no es significativo. A partir de los valores de las constantes  $c$  y  $A$  y de la ecuación (C.20) se obtiene un valor de  $k_s = 9.5$ .

Con el sistema de medición de potencia se obtuvo una  $n = 0.244$  y  $A = 3.69 \cdot 10^{-2}$  ( $r = 0.9554$ ). La desviación entre el índice de flujo obtenido en el viscosímetro y el obtenido en el sistema de medición de potencia fué de - 0.003 (Error = - 1.25%), el cual tampoco es significativo. En este caso, el valor de  $k_s$  fué de 7.9. Además, los datos de torque obtenidos para los fluidos de calibración Newtonianos, también se ajustaron a la ecuación (C.18) para obtener el índice  $n$ , de donde se obtuvo  $n = 1$ . Lo cual indica que el equipo permite determinar con buena aproximación el comportamiento reológico, al menos de fluidos Newtonianos y de fluidos pseudoplásticos.

### V.6.3 DETERMINACION DE PROPIEDADES REOLOGICAS DE UN CALDO DE FERMENTACION DE Streptomyces lincolnensis

Las muestras problema fueron proporcionadas por la empresa Upjohn S.A. de C.V. de Jiutepec, Morelos. Consistieron de caldos de fermentación de 24, 48 y 72 horas de edad, provenientes del proceso de producción de lincomicina, usando Streptomyces lincolnensis y tratadas con formaldehído para inactivar a las

células. Con el fin de eliminar el aire presente en el fluido, las muestras se dejaron reposar durante un día y se agitaron a  $5 \text{ s}^{-1}$  durante 20 minutos, antes de realizar las determinaciones.

En la figura 23 se presentan las curvas de flujo y en la tabla 9 los valores de los parámetros reológicos de la ley de la potencia, obtenidos para los caídos de fermentación. Los datos se estimaron ajustando los valores de torque contra la velocidad de agitación (en el régimen laminar), de acuerdo a las ecuaciones (C.18) y (C.19). El cálculo de  $\tau_w$  y  $\dot{\gamma}_w$  se llevó a cabo mediante el uso de las ecuaciones (C.11.a) y (C.9) respectivamente.

A pesar de que se realizaron únicamente tres determinaciones en el régimen laminar para cada curva de flujo, el sistema de medición de torque es sensible y capaz de detectar el cambio de tipo de fluido y de los parámetros reológicos. Conforme transcurre el tiempo de fermentación (tabla 9), los valores de los parámetros reológicos cambian, siendo más no-Newtoniano el fluido a las 48 horas. Los micelios fueron tratados con formaldehído y se almacenaron por lo menos un día, por consiguiente los valores de los parámetros reológicos no son del todo absolutos y no reflejan necesariamente las propiedades reológicas durante el proceso de fermentación, esto se debe a que la morfología del microorganismo se modifica con el tratamiento con formaldehído y se sabe que, en estos fluidos, la reología depende de la morfología de los micelios (Roels *et al.*, 1974;

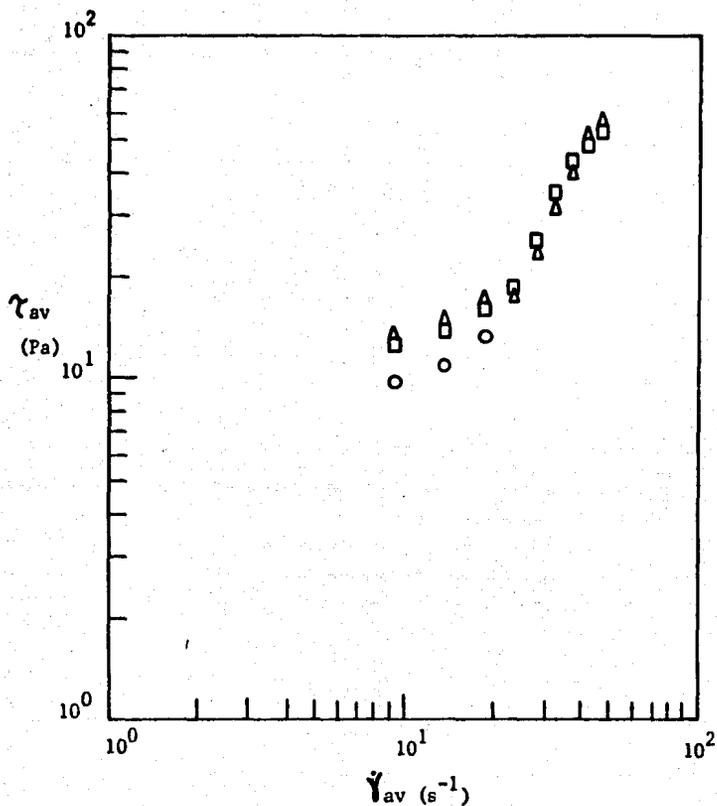


Figura 23 Curvas de flujo para los caldos de fermentación de lincomicina obtenidos con el dinamómetro.

(o) 24 horas de fermentación,  $\tau=3.690$   $\dot{\gamma}^{0.429}$   
 (Δ) 48 horas de fermentación,  $\tau=6.569$   $\dot{\gamma}^{0.320}$   
 (□) 72 horas de fermentación,  $\tau=5.918$   $\dot{\gamma}^{0.334}$

**Tabla 9** Valores experimentales de los parámetros reológicos para la fermentación de lincomicina.

Tiempo de fermentación	n	K
(horas)	( <u>    </u> )	Paes <sup>n</sup>
24	0.429	3.690
48	0.320	6.569
72	0.334	5.916

Charles, 1978; Metz et al, 1979). Además, dado que las mediciones se llevaron a cabo en condiciones de flujo laminar, el intervalo de velocidades de corte consideradas es muy estrecho y, en la mayoría de las condiciones de fermentación, no son relevantes (Reuss, et al 1980).

Otro punto importante a considerar es que la reología de un fluido que contiene micelios no es únicamente función de la concentración celular, sino muy importantemente de la morfología del micelio, de la edad del cultivo, del tiempo que se haya almacenado el fluido y de la inactivación que se haga a los micelios. Por ejemplo, micelios de Streptomyces avermitilis tratados con formaldehído mostraron decrementos de viscosidad (Cooke, et al 1988).

#### V.6.4 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA EN AUSENCIA DE AIREACION EN UN CALDO DE FERMENTACION DE Streptomyces lincolnensis

La dependencia del número de potencia en función del número de Reynolds en condiciones no aireadas para caldos de S. lincolnensis, se presenta en la figura 24. En la misma figura se presentan, a manera de comparación, datos experimentales y de la literatura para soluciones Newtonianas y no-Newtonianas y para un fluido micelial. El desplazamiento de las curvas obtenidas experimentalmente para los fluidos pseudoplásticos (figura 24)

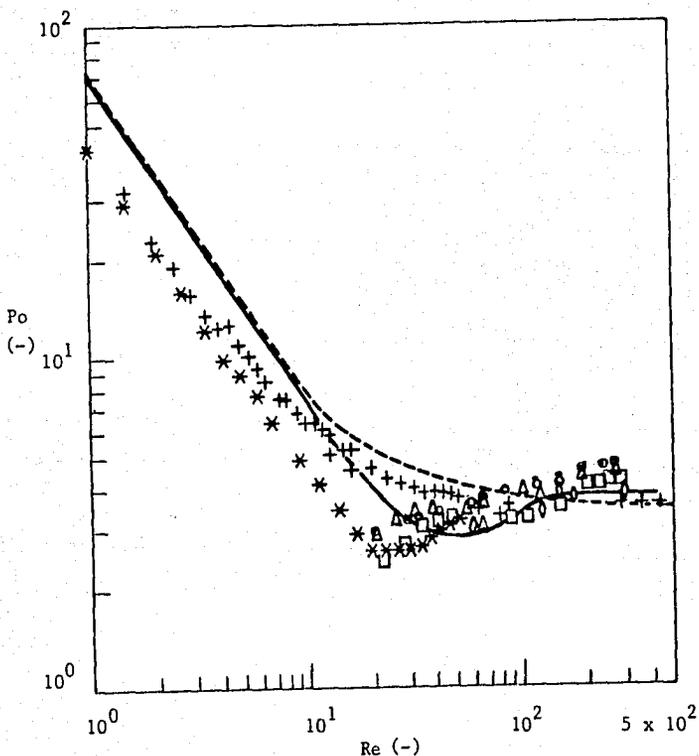


Figura 24 Relación entre el número de potencia y el número de Reynolds para caldos de *Streptomyces lincolnensis*. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.37 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m.

Símbolo	Fluido
(o)	micelio 24 horas
(Δ)	micelio 48 horas
(□)	micelio 72 horas
(*)	Carbopol 0.35%
(+)	Melaza
(---)	fluido Newtoniano (Rushton <i>et al</i> , 1950b)
(—)	fluido no-Newtoniano (Metzner y Otto, 1957)
(◇)	<i>A. foetidus</i> (Baker <i>et al</i> , 1988)

hacia el eje de las ordenadas, se debe al valor de  $k$ , encontrado para este impulsor en particular, el cual es menor al utilizado en la mayoría de los trabajos de mezclado ( $k$ , = 11.5, Metzner y Otto, 1957; Calderbank y Moo-Young, 1959; Nagata, 1975). Sin embargo, se sabe (Allsford, 1985) que el valor de  $k$ , es una función compleja de la geometría del sistema, del impulsor y del fluido usado. En consecuencia, se recomienda calibrar específicamente cada sistema de agitación.

Debido a las limitaciones de torque y velocidad de agitación, solo fue posible obtener datos en el régimen transiente. Sin embargo, las curvas presentan el comportamiento típico de fluidos pseudoplásticos (Metzner y Otto, 1957; Calderbank y Moo-Young, 1959; Nienow, et al 1983; Allsford, 1985; Galindo et al, 1988). Como normalmente ocurre en el régimen transiente, las curvas de número de potencia vs número de Reynolds (figura 24) tienden a ser una misma, independientemente de las características reológicas de los fluidos. Los resultados obtenidos del presente trabajo tienen una buena concordancia con los obtenidos por de Baker et al (1988) para otro fluido micelial.

#### V.6.5 DETERMINACION DE NUMEROS DE POTENCIA CON AIREACION EN UN CALDO DE FERMENTACION DE Streptomyces lincolnensis

Para el proceso de producción de lincomicina, sin duda los datos con aireación son más interesantes. Como puede observarse en las

figuras 25-27, la aireación tiene efecto sobre la potencia suministrada por el impulsor únicamente cuando los flujos de aire son muy bajos (números de aireación menores a 0.025). Los valores del número de potencia en condiciones aireadas,  $P_{og}$ , muestran una dependencia con el número de Reynolds (o con la velocidad de agitación) y con las propiedades reológicas de los caldos de fermentación.

En casi todo el intervalo de números de aireación probados, la caída de potencia es independiente de la velocidad de aireación. En general, se presenta una mayor caída de  $P_{og}$  (o el mínimo de  $P_{og}$  es menor) conforme se incrementa la edad del cultivo; es decir, conforme las características reológicas son más no-Newtonianas (Tabla 9). Esta tendencia también ha sido reportada previamente para fluidos no-Newtonianos altamente viscosos, como los caldos que contienen biopolímeros y caldos de fermentación con fluidos miceliales (Taguchi y Miyamoto, 1966; Galindo *et al.*, 1988; Nienow *et al.*, 1983). Esto se debe principalmente a que la formación de cavidades estables de aire en la parte trasera de las palas del impulsor son independientes de la velocidad de aireación suministrada (Nienow *et al.*, 1985b).

Aunque no se midió (no se puede medir con la instrumentación disponible en el laboratorio), se sabe (Allsford, 1985; Nienow *et al.*, 1985b) que el fenómeno de viscoelasticidad estabiliza las cavidades de gas, aire, que se forman en la parte trasera de las

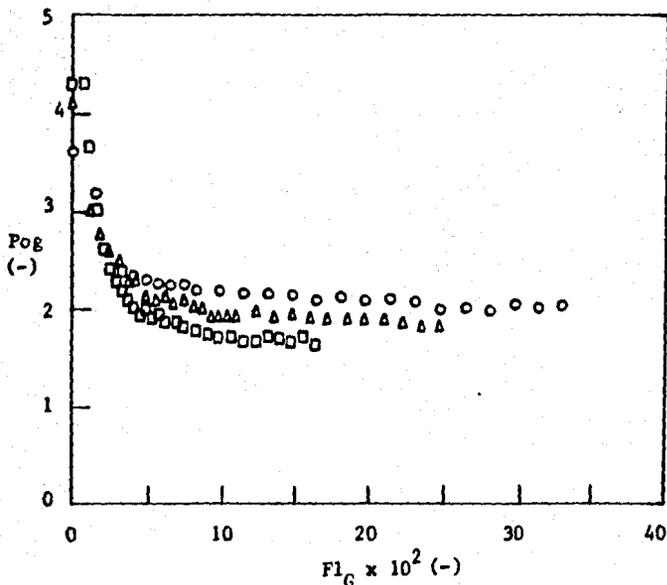


Figura 25 Relación entre el número de potencia y el número de aireación para el caldo de *S. lincolnsis* de 24 horas a velocidad de agitación constante. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.37 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m.

Símbolo	$N$ (s <sup>-1</sup> )
(o)	5.0
(Δ)	6.6
(□)	10.0

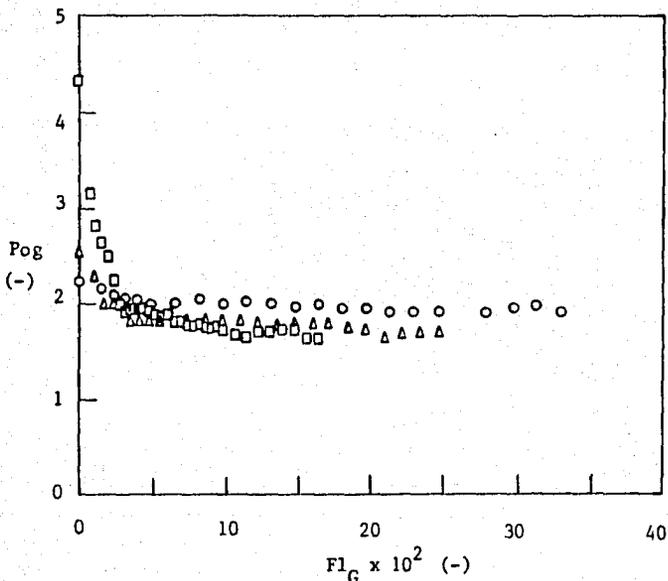


Figura 26 Relación entre el número de potencia y el número de aireación para el caldo de *S. lincolniensis* de 48 horas a velocidad de agitación constante. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.37 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m.

Símbolo	N (s <sup>-1</sup> )
(o)	5.0
(Δ)	6.6
(□)	10.0

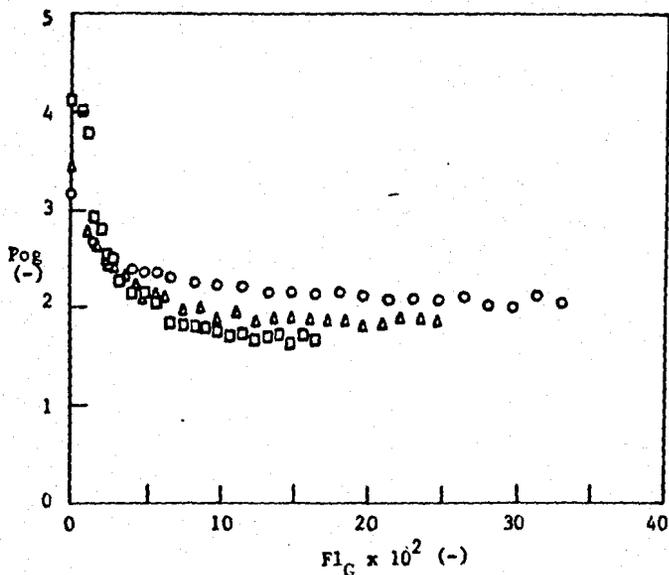


Figura 27 Relación entre el número de potencia y el número de aireación para el caldo de *S. lincolniensis* de 72 horas a velocidad de agitación constante. Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.37 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m.

Símbolo	$N$ (s <sup>-1</sup> )
(o)	5.0
( $\Delta$ )	6.6
( $\square$ )	10.0

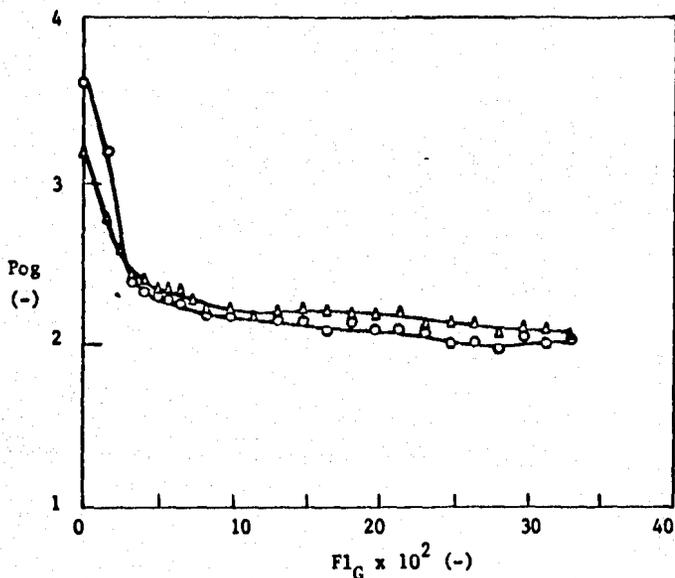


Figura 28 Relación entre el número de potencia y en número de aireación con incrementos y decrementos graduales del flujo de aire, para el caldo de *S. lincolniensis* de 24 horas a velocidad de agitación constante:  $5 \text{ s}^{-1}$ . Impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro = 0.37 veces el diámetro del tanque. Diámetro del tanque = 0.205 m. (o) Incremento del flujo de aire; ( $\Delta$ ) Decremento del flujo de aire.

palas de un impulsor de turbina. Esta característica se puede inferir a partir de la figura 29, donde se presenta la dependencia que existe entre  $P_{og}$  y el número de aireación, cuando de manera gradual se eliminó el suministro de aire en el caldo de fermentación (con una edad de 24 horas). Al eliminar de manera gradual la aireación, el valor de  $P_{og}$  no regresa a su valor original en ausencia de aireación. Este fenómeno se puede deber a la formación de cavidades estables en la parte trasera de las palas del impulsor (Allsford, 1985; Nienow *et al.*, 1985b). Este mismo efecto fué observado previamente para fluidos miceliales por Baker *et al.* (1988), quienes, independientemente de la velocidad de agitación, encontraron una relación de  $P_{og}/P_o$  constante (alrededor de 0.65, con una relación de diámetro de impulsor a diámetro de tanque igual a 1/2) después de quitar la aireación. La relación de  $P_{og}/P_o$  que se obtiene de la figura 29 es de 0.89, la cual es más alta que la observada por Baker *et al.* (1988), debido probablemente a las diferencias en las relaciones de diámetros, a los fluidos miceliales usados y a su reología.

#### V.6.6 CONCLUSIONES

Las bajas desviaciones entre los índices de flujo, para los fluidos de calibración, obtenidos en el viscosímetro y los obtenidos en el dinamómetro, indican que el equipo permite determinar el comportamiento reológico de fluidos Newtonianos y de fluidos no-Newtonianos pseudoplásticos.

Las curvas de flujo obtenidas con el sistema de medición de torque para los caldos de fermentación que contiene S. lincolnsis, muestran que conforme transcurre el tiempo de fermentación (de las 24 a las 72 horas) los valores de los parámetros reológicos cambian, siendo pseudoplástico y más viscoso el fluido a las 48 horas.

Las curvas de potencia obtenidas con el caldo de fermentación de S. lincolnsis muestran que el flujo de aire tiene efecto sobre la potencia suministrada por el impulsor únicamente cuando las velocidades de aireación son muy bajas. Además, los valores de del número de potencia en condiciones aireadas muestran una dependencia con el número de Reynolds y con las propiedades reológicas de los caldos de fermentación.

## VI. CONCLUSIONES GENERALES

El dinamómetro es versátil y de carácter multipropósito, debido a que se pueden realizar, entre otros, estudios de caracterización de impulsores, de consumo de potencia, de hidrodinámica y de caracterización reológica de fluidos Newtonianos, e incluso fluidos viscosos que presentan con problemas de sedimentación.

Se observó que la operación del equipo y en particular del cojinete neumático es libre de momentos, lo que permite la libre rotación del tanque. El equipo no presenta cargas de fricción dinámica.

El claro que se requiere para evitar contacto entre metales, en el cojinete neumático, cuando se introduce aire a presión es de  $1.7 \times 10^{-3}$  m y una presión de  $2.9 \times 10^5$  y  $5.1 \times 10^5$  Pa ( $3.0$  y  $5.2$   $\text{Kg/cm}^2$ ) para soportar una carga de 25 y 60 Kg, respectivamente. La colocación de una carga adicional, como es la base hueca para estudios de hidrodinámica, no afecta la alta estabilidad ni la libre operación del equipo.

El equipo tiene un torque de fricción estática de  $4 \times 10^{-4}$  N.m. Para minimizar los errores debido a este parámetro se adoptó como criterio de torque mínimo aceptable el valor de  $5 \times 10^{-3}$  N.m. Los errores causados por la fricción estática son del orden del 8% para lecturas de torque pequeñas, alrededor de  $5 \times 10^{-3}$  N.m. El torque máximo que se puede medir es de 2.21 N.m.

La incertidumbre, debida a la incertidumbre de la instrumentación usada, fue de 1.1%, y de 0.2% en las mediciones extremas de torque.

El sistema de medición de torque es capaz de detectar variaciones geométricas y operacionales con una gran sensibilidad. En el régimen turbulento, la potencia resultó proporcional al cubo de la velocidad de agitación y a la quinta potencia del diámetro del impulsor, tal y como lo predice el análisis dimensional.

Las pruebas realizadas con el dinamómetro permiten concluir que: a) no existe un efecto de brazo de palanca, debido a que las desviaciones estándar de los número de potencia obtenidos a diferentes brazos de palanca son bajas; b) con o sin la base se obtienen prácticamente los mismos valores de  $P_0$ ; y c) los errores que se obtienen se pueden considerar despreciables, debido a que los errores de las mediciones obtenidas son, en la mayoría de los casos, menores al 2.5%.

Se obtuvieron curvas de números de potencia vs. números de Reynolds para turbinas de disco con fluidos Newtonianos. Los resultados muestran el comportamiento "típico" de esta relación para número de Reynolds que abarcan los regímenes laminar, transiente y turbulento.

- a) En el régimen laminar se encontró que la curva de número de potencia vs número de Reynolds depende del diámetro del impulsor.
  
- b) En el régimen transiente, los resultados presentan buena concordancia con los datos reportados en la literatura.
  
- c) Los resultados obtenidos en el régimen turbulento presentan las tendencias previamente reportadas en la literatura, esto es: a menor escala menores son los números de potencia; y a menor relación de diámetro de impulsor a diámetro de tanque, para la misma escala, menor es el valor de los números de potencia.

Para observar la formación de cavidades de aire en la región del impulsor, la técnica visual fué la más fácil de llevar a cabo y también en la cual se pudieron observar con mayor claridad los cambios y características de las cavidades de aire. En la técnica de videograbación, no obstante que se pierde algo de claridad, se logró obtener un registro continuo de las cavidades. En el registro fotográfico de las cavidades, se pierde claridad y se deforman las imágenes, debido a que las fotografías se tomaron de un monitor que no es plano.

Las curvas de potencia vs el número de aireación, obtenidas con diferentes tipos de aspersores, muestran que en la mayor parte del intervalo de los números de aireación experimentados, se suministra una mayor cantidad de potencia con el aspersor de anillo cuyo diámetro es mayor al diámetro del impulsor.

Se lograron llevar a cabo fermentaciones con levadura de panificación en condiciones asépticas y se pudo determinar in situ la potencia suministrada por el sistema de agitación al fluido de fermentación.

Se montó una técnica, con azul de metileno, la cual permite determinar con buena resolución y con gran nitidez los contornos de diámetro y altura de las cavernas formadas en fluidos no-Newtonianos pseudoplásticos transparentes.

Las desviaciones entre los índices de flujo, para los fluidos de calibración, obtenidos en el viscosímetro y los obtenidos en el dinamómetro, indican que con el dinamómetro se puede determinar el comportamiento reológico de fluidos Newtonianos y de fluidos no-Newtonianos pseudoplásticos viscosos.

Se comprobó que el dinamómetro permite evaluar las características reológicas de caldos de fermentación altamente viscosos que presentan problemas de sedimentación. Las curvas de flujo obtenidas con el sistema de medición de torque para los

caldos de fermentación que contienen Streptomyces lincolnensis tratados con formaldehído, muestran que conforme transcurre el tiempo de fermentación (de las 24 a las 48 horas) los valores de los parámetros reológicos cambian, siendo pseudoplástico y más viscoso el fluido a las 48 horas.

Las curvas de potencia obtenidas con el caldo de fermentación de S. lincolnensis muestran que la aireación tiene efecto sobre la potencia suministrada por el impulsor únicamente cuando el flujo del aire es muy bajo. Además, los valores de potencia muestran una dependencia con el número de Reynolds y con las propiedades reológicas de los caldos de fermentación.

## VII. RECOMENDACIONES PARA FUTUROS TRABAJOS

Después de haber mostrado las características, intervalos de aplicación, sensibilidad, reproducibilidad y versatilidad del dinamómetro, y en base a los resultados obtenidos se recomienda realizar investigación más profunda y con mayor detalle en aspectos tales como:

a) caracterización de impulsores que se utilizan en los fermentadores y de otros tipo de impulsores que tengan aplicaciones, específicas o generales, en procesos de agitación y mezclado en el área de bioingeniería.

b) realizar trabajo extenso para postular correlaciones que permitan predecir números de potencia para fluidos Newtonianos, principalmente en presencia de aireación, y relacionarlas con aspectos de hidrodinámica, de manera que las predicciones sean confiables.

c) evaluar la evolución y formación de cavidades y cavernas con fluidos modelo que sean de interés práctico para el área de bioingeniería.

d) realizar determinaciones de potencia, aunado a hidrodinámica, de fluidos reales que se presentan comúnmente en procesos de fermentación.

e) continuar con el trabajo de caracterización reológica de fluidos miceliales y relacionarlos con morfología y metabolismo de los microorganismos.

f) realizar determinaciones de potencia e hidrodinámica estudiando parámetros geométricos, operacionales y de características de las soluciones, en condiciones idénticas a las utilizadas comúnmente en la investigación y en la industria de fermentaciones.

## VIII. NOMENCLATURA

A	constante definida en la ecuación (C.11)	[Nem s <sup>o</sup> ]
b	constante definida en la ecuación (4.14)	[dimensional]
B	ancho de la mampara	[m]
c	constante definida en la ecuación (c.1)	[dimensional]
C	altura del impulsor respecto al fondo del tanque	[m]
c <sub>o</sub>	distancia entre la mampara y la pared del tanque	[m]
D	diámetro del impulsor	[m]
D <sub>c</sub>	diámetro de la caverna	[m]
D <sub>d</sub>	diámetro del disco de un impulsor de turbina	[m]
D <sub>s</sub>	diámetro del aspersor de anillo	[m]
D <sub>e</sub>	diámetro de la flecha	[m]
d	diámetro del buje del cojinete neumático	[m]
F	fuerza	[N]
Fl	número de aireación ( $Q_a/ND^3$ )	[dimensional]
Fr	número de Froude ( $N^2D/g$ )	[dimensional]
g	constante gravitacional	[9.81 ms <sup>-2</sup> ]
H <sub>t</sub>	altura total del tanque	[m]
H <sub>l</sub>	altura del líquido	[m]
H <sub>u</sub>	altura de líquido arriba del aspersor de aire	[m]
K	índice de consistencia del modelo de la ley de la potencia	[Paes <sup>o</sup> ]
k	constante de proporcionalidad entre la velocidad de deformación y la velocidad de rotación del impulsor	[dimensional]
L	largo de la paleta del impulsor	[m]
L <sub>u</sub>	longitud efectiva de la aguja cilíndrica del viscosímetro Brookfield	[m]
l <sub>a</sub>	longitud efectiva de la flecha (de la punta inferior al balero)	[m]
M	torque	[Nem]
m	pendiente	[dimensional]
N	velocidad de agitación	[s <sup>-1</sup> ]
n	índice de flujo del modelo de la ley de la potencia	[dimensional]
P	potencia	[W]
P <sub>g</sub>	potencia consumida en condiciones aireadas	[W]
P	presión	[Pa]
P <sub>o</sub>	número de potencia ( $P/N^3D^5$ )	[dimensional]
Pog	número de potencia en condiciones aireadas ( $P_g/N^3D^5$ )	[dimensional]
P <sub>1</sub>	presión absoluta de aire en el medidor de flujo másico	[Pa]
P <sub>2</sub>	presión absoluta de aire a la salida del aspersor	[Pa]
Q <sub>a</sub>	flujo de aire	[m <sup>3</sup> es <sup>-1</sup> ]
R <sub>u</sub>	radio de la aguja cilíndrica del viscosímetro Brookfield	[m]

Re	número de Reynolds a) para fluidos Newtonianos $D^2 N / \mu$ b) para fluidos no-Newtonianos $\rho N^{0.7} D^2 / K_k \rho^{-0.1}$	[adimensional]
r	coeficiente de correlación	[adimensional]
rpm	revoluciones por minuto	[ $\text{min}^{-1}$ ]
T	diámetro del tanque	[m]
t	ancho del buje del cojinete neumático	[m]
V	volumen	[ $\text{m}^3$ ]
vvm	(volumen de aire/min)/volumen de líquido	[ $\text{m}^3 \text{em}^{-3} \text{emin}^{-1}$ ]
W	ancho de la paleta del impulsor	[m]
w	velocidad angular ( $2\pi N$ )	[ $\text{s}^{-1}$ ]
x	espesor del disco de la turbina	[m]
Z	constante definida en la ecuación C.11	[ $\text{m}^{-2}$ ]

### Griegas

$\dot{\gamma}$	velocidad de deformación	[ $\text{s}^{-1}$ ]
$\mu$	viscosidad dinámica	[Paes]
$\mu$	velocidad específica de crecimiento	[ $\text{h}^{-1}$ ]
$\rho$	densidad	[ $\text{kgem}^{-3}$ ]
$\tau$	esfuerzo de corte	[Pa]
$\tau_c$	punto de cedencia	[Pa]
$\theta_n$	ángulo formado entre el brazo de palanca y la punta de la celda de carga de la balanza	[ $^\circ$ ]

### Subíndices

a <sub>p</sub>	aparente
a <sub>at</sub>	atmosférica
a <sub>v</sub>	promedio
c	casson
c <sub>d</sub>	dispersión completa
f	inundación
h	hidráulica
h <sub>s</sub>	Herschel-Bulkley
m <sub>man</sub>	manométrica
r	recirculación

## IX. REFERENCIAS

- Aiba, S., Humphrey, A.E. y Millis, N.F. (1973) *Biochemical Engineering*. Academic Press, New York, 209-211.
- Allsford, K.V. (1985) Gas-liquid dispersion and mixing in mechanically agitated vessels with a range of fluids. PhD Thesis. University of Birmingham, U.K.
- Baker, M.R., Emery, A.N. y Nienow, A.W. (1988) Mass transfer and power characteristics of a simulated filamentous fermentation broth exhibiting biological activity. *Proc. 2nd Int. Conf. on Bioreactor Fluid Dynamics*. BHRA Fluid Engineering, Cambridge, 79-93.
- Bar, R., (1987) Measuring power distribution in multi-impeller fermentors: a breakthrough in bioreactor fluid dynamics?. *Trends Biotechnol.*, 5, 85-86.
- Bates, R.L., Fondy, P.L. y Corpstein, R.R. (1963) An examination of some geometric parameters of impeller power. *I&EC Proc. Design and Development*, 2, 4, 310-314.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. y Lightfoot, E.N. (1987) *Fenómenos de transporte*. Ed. Reverté, S.A. México, 1-3 a 1-34.
- Bongenaar, J.J.T.M., Kossen, N.W.F., Metz, B. y Meijboom, F.W. (1973) A method for characterizing the rheological properties of viscous fermentation broths. *Biotechnol. Bioeng.*, 15, 201-208.
- Brookfield Engineering Laboratories, Inc. More solutions to sticky problems, a guide to getting more from your Brookfield viscometer. Technical brochure (no fechado).
- Brown, D., (1977) The measurement of fermenter power input. *Chem. Ind.*, 16, 684-688.
- Bruijn, W., Riet, K. van't y Smith, J. M. (1974) Power consumption with aerated Rushton turbines. *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 52, 88-104.
- Bujalski, W., Nienow, A. W., Chatwin, S., y Cooke, M., (1986a) The dependency on scale and material thickness of power numbers of different impeller types. *Actes du Colloque Agitation Mécanique, Toulouse*. 1-37 a 1-46.
- Bujalski, W., Nienow, A. W., Chatwin, S., y Cooke, M., (1986b) The dependency of scale of power numbers of Rushton disc turbines. *Chem. Eng. Sci.*, 41, 1-10.
- Calderbank, P.H. (1958) Physical rate processes in industrial fermentation. Part I: The interfacial area in gas-liquid contacting with mechanical agitation. *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, 36, 443-463.
- Calderbank, P.H. y Moo-Young, M.B. (1959) The prediction of power consumption in the agitation of non-Newtonian fluids. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 37, 26-33.
- Cahue, A.C. (1987) *Etude des transfer d'oxygene en cuves agitees mecaniquement*. Tesis Doctoral Ecole Nationale Superieure des Industries Agricoles et Alimentaires, ENSIA, France.
- Charles, M., (1978) Technical aspects of the rheological properties of microbial cultures. *Adv. Biochem. Eng.*, 8, 1-62.

- Cooke, M., Middleton, J.C. y Bush J.R. (1988) Mixing and mass transfer in filamentous fermentation. *Proc. 2nd Int. Conf. on Bioreactor Fluid Dynamics*. BHRA Fluid Engineering. Cambridge, 37-64.
- Elson, T.P., Cheesman, D.J. y Nienow, A.W. (1986) X-ray studies of cavern sizes and mixing performance with fluids possessing a yield stress. *Chem. Eng. Sci.*, 41, 10, 2555-2562.
- Elson, T.P. (1988) Mixing of fluids possessing a yield stress. *Proc. 6th European Conference on Mixing*, 485-492.
- Galindo, E. (1989) *Bioingeniería de la fermentación para la producción de goma xantana*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Galindo, E., Nienow, A.W. y Badham, R.S. (1988) Mixing of simulated xanthan gum broths. *Proc. 2nd Int. Conf. on Bioreactor Fluid Dynamics*. R. King. (Ed.), 65-78.
- Gbewongo, K., Dimasi, D. y Buckland, B.C. (1987) Characterization of oxygen transfer and power absorption of hydrofoil impellers in viscous mycelial fermentations. En: *Biotechnology Processes. Scale-up and Mixing*. Ho, C. y Oldshue, J. Y. (Ed.) American Institute of Chemical Engineers, New York, 128-134.
- Hanotte, M. y Galindo, E. (1990) Yield stress estimation in xanthan gum solutions and fermentation broths by low-cost viscosimeters. *Sometido al Biochem. Eng. J.*
- Holman, J. P. (1987) Análisis de la información experimental. En: *Métodos Experimentales para ingenieros*. Capítulo 3. MacGraw-Hill, México. D.F., 51-102.
- Holland, F. A., and Chapman, F. S., (1966) Power requirements in liquid mixing. En: *Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks*. Reinhold Publishing New York, 42-49.
- Kemblowski, Z. y Kristiansen, B. (1986) Rheometry of fermentation liquids. *Biotechnol. Bioeng.*, 28, 1474-1483.
- King, R. L., Hiller, R. A., and Tattersson, G. B. (1988) Power consumption in a mixer *AIChE J.*, 34 (1988) 3, 508 - 509.
- Kuboi, R., Nienow, A.W. y Allsford, K.V. (1983) A multipurpose stirred tank facility for the flow visualization and dual impeller power measurement. *Chem. Eng. Commun.*, 22, 29-39.
- Märkl, H. y Bronnenmeter, R. (1985) Mechanical stress and microbial production. *Fundamentals of Biochemical Engineering*. En: "Biotechnology". Vol. 2. Capítulo 18. H. J. Rehm y G. Reed (Ed.). Verlag-Chemie, Federal Republic of Germany, 369-392.
- Metz, B., Kossen, N.W.F. y Van Suijdam, J.C. (1979) The rheology of mould suspensions. *Adv. Biochem. Eng.*, 11, 103-156.
- Metzner, A.B. y Otto, R.E. (1957) Agitation of non-Newtonian fluids. *A.I.Ch.E. J.*, 3, 1, 3-10.
- Michel, B.J. y Miller, S.A. (1962) Power requirements of gas-liquid agitated systems. *AIChE J.*, 8, 2, 262-266.
- Middleton, J.C. (1985) Gas-Liquid dispersion and mixing. En: "Mixing in the process industries". Capítulo 17. N. Harnby, M.F. Edwards y A.W. Nienow (Ed.). Butterworth & Co. (Pub.),

- Ltd. United Kingdom, 322-355.
- Midoux, N. y Charpentier, J.C. (1984) Mechanically agitated gas-liquid reactors. Part 1. Hydrodynamics. *Ins. Chem. Eng.*, 24, 2, 249-287.
- Nagata, S., (1975) *Mixing. Principles and Applications*, J. Wiley & Sons, New York
- Nienow, A. W. y Miles, D., (1969) A dynamometer for the accurate measurement of mixing torque *J. Sci. Instrum.*, 2, 994-995.
- Nienow, A. W. y Miles, D., (1971) Impeller power numbers in closed vessels. *Ind. Eng. Chem. Process. Des. Develop.*, 10, 1, 41-43.
- Nienow, A.W. y Wisdom, D.J. (1974) Flow over disc turbine blades. *Chem. Eng. Sci.*, 29, 1994-1997.
- Nienow, A.W., Wisdom, D.J. y Middleton, J.C. (1977) The effect of scale and geometry on flooding, recirculation, and power in gassed stirred vessels. *Proc. 2nd European Conf. on Mixing. England, F1-1 a F1-16.*
- Nienow, A.W., Wisdom, D.J., Solomon, J., Machon, V. y Vlcek, J. (1983) The effect of rheological complexities on power consumption in an aerated agitated vessel. *Chem. Eng. Commun.* 19, 273-293.
- Nienow, A.W., Edwards, M.F. y Harnby, N. (1985a) Mixing in the process industries. En: "Mixing in the Process Industries" Capitulo 1. N. Harnby, M.F. Edwards y A.W. Nienow (Ed.). Butterworth & Co. (Pub.), Ltd. United Kingdom, 1-21.
- Nienow, A.W. y Ulbrecht, J.J. (1985b) Gas-liquid mixing in high viscosity systems, En: "Mixing of liquid by mechanical agitation" Capitulo 6. J.J. Ulbrecht y G.K. Patterson (Ed.), New York, Gordon and Breach Science Publishers, 203-235.
- Nienow, A.W., Haozhong, W., Huoxing, C. y Allsford, K.V. (1986) The advantage of using large ring spargers with standard Rushton turbines in gassed reactors. *World Congress III of Chemical Engineering. Vol. III, 354-357.*
- Nienow, A. W. y Elson, T.P. (1988) Aspects of mixing in rheologically complex fluids. *Chem. Eng. Res. Des.*, 68, 5-15.
- OHAUS, PORT-O-GRAM, Electronic Balance. Directions for use and maintenance (no fechado).
- Oldshue, J.Y. (1983) Power correlations and the effects of mixing environment. En "Fluid mixing technology" Capitulo 3. *Chemical Engineering. Mc-Graw Hill Pub. Co. New York, U.S.A.*,
- Golman, T. y Yu D. (1987) A model for the dynamic rheological behavior of pelleted microbial suspensions. En: *Biotechnology Processes. Scale-up and Mixing. Ho, C. y Oldshue, J. Y. (Ed.) American Institute of Chemical Engineers, New York, 36-42.*
- Oosterhuis, N. M. G., Kossen, N. W. F., (1981) Power input in a production scale bioreactor. *Biotechnol. Lett.* 3, 11, 645-650.
- Reuss, M., Bajpai, R.K., Lenz, R., Niebelschütz, H. y Papalexiou,

- A. (1980) Scale-up strategies based on the interaction of transport and reaction. *Procc. 6th Int. Fermentation Symposium*. Ontario. 1-30.
- Roels, J.A., Van Den Berg, J. y Voncken, R.M. (1974) The rheology of mycelial broths. *Biotechnol Bioeng*, 16, 181-208.
- Rushton, J.H., Costich, E.W. y Everett, H.J. (1950a) Power characteristics of mixing impellers, Part I. *Chem. Eng. Progress.*, 46, 8, 395-404.
- Rushton, J.H., Costich, E.W. y Everett, H.J. (1950) Power characteristics of mixing impellers, Part II *Chem. Eng. Progress.*, 46, 9, 467-478.
- Scragg, A.H., Bond, P.A. y Fowler, M.W. (1988) Bioreactor performance, mixing and shear in the large scale growth of plant cells. *Procc. 6th European Conf. on Mixing*, 457-464.
- Skelland (1967) en: Charles, M., (1978) Technical aspects of the rheological properties of microbial cultures. *Adv. Biochem. Eng.*, 8, 1-62.
- Solomon, J., Elson, T.P. y Nienow, A.W. (1981) Cavern sizes in agitated fluids with a yield stress. *Chem. Eng. Commun.*, 11, 143-164.
- Solomons, G. L., (1969) Instrumentation. *En Materials and Methods in Fermentation*. Academic Press. London, 281-284.
- Summer, J.B. y Howell, S.F. (1935) A method for determination of saccharase activity. *J. Biol. Chem.*, 108, 51-53.
- Taguchi, H. y Miyamoto, S. (1986) Power requirement in non-Newtonian fermentation broth. *Biotechnol. Bioeng.* 8, 43-54.
- Urióstegui, B. (1989) Efecto de la temperatura y el pH en la producción de Kluyveromyces fragilis en cultivo continuo. Tesis Licenciatura. Universidad Autónoma de Guerrero. 25-28.
- Wichterle y Wein (1978) En: Solomon, J., Elson, T.P. y Nienow, A.W. (1981) Cavern sizes in agitated fluids with a yield stress. *Chem. Eng. Commun.*, 11, 143-164.
- Warmoeskerken, M. M. C. G., Feijen, J. y Smith, J. M. (1981) Hidrodinamics and power consumption in stirred gas-liquid dispersions. I. *Chem. E. Symp. Series No. 64*, J1-J14.

## X. APENDICES

### APENDICE A. CONCEPTOS DE REOLOGIA

Los datos que se obtienen experimentalmente de un viscosímetro o reómetro, normalmente se presentan en forma de una curva de flujo, esto es, una gráfica de esfuerzo de corte ( $\tau$ ) contra velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ). En los fluidos Newtonianos existe una relación lineal entre  $\tau$  y  $\dot{\gamma}$ , de manera que la viscosidad ( $\mu$ , resistencia a fluir causada por la fricción interna del fluido) es constante e independiente de  $\dot{\gamma}$ . Aparte de los fluidos Newtonianos, existen otras categorías de fluidos con reología (comportamiento de flujo de material) diferente, de interés para los procesos biotecnológicos.

a) Fluidos pseudoplásticos. En este tipo de fluidos la viscosidad decrece conforme se incrementa el esfuerzo de corte. La viscosidad tiende a ser baja en las cercanías del impulsor y alta en otras partes del recipiente. De manera que en la región del impulsor se tiene un buen mezclado, con regiones casi estancadas en la parte restante del tanque. Esta propiedad es exhibida por un amplio número de materiales en la industria biológica, de los alimentos y de los polímeros.

b) Fluidos plásticos. Este tipo de fluidos se caracterizan por presentar punto de cedencia. Esto es, que se requiere de un esfuerzo mínimo para romper la estructura, lo suficientemente antes de que ocurra cualquier movimiento. En este caso, la región mezclada, que se encuentra en la periferia del impulsor, ha sido denominada como "caverna" y puede estar acompañada por zonas donde el fluido se encuentra totalmente estancado (Solomon *et al.* 1981).

Debido a su sencillez, el modelo de la ley de la potencia es muy utilizado para caracterizar reológicamente a fluidos no-Newtonianos, incluyendo caldos de fermentación de polisacáridos y de microorganismos miceliares. El modelo de la ley de la potencia es:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (A.1)$$

donde:  $\tau$  es el esfuerzo de corte (Pa)

$K$  es el índice de consistencia (Pa·s<sup>n</sup>)

$n$  es el índice de flujo (adimensional)

Casi todas las curvas de flujo pueden ser ajustadas bastante bien al modelo de la ley de la potencia sobre un intervalo limitado de velocidades de deformación. Sin embargo, es peligroso extrapolar fuera del intervalo de las mediciones.

Si  $n < 1$  el fluido es pseudoplástico; si  $n = 1$  es Newtoniano y  $K = \mu$ ; si  $n > 1$  es dilatante.

Para fluidos plásticos con punto de cedencia comunmente se usa el modelo de Herschel-Bulkley (HB):

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}_{HB}^n \quad (A.2)$$

donde:  $\tau_y$  es el punto de cedencia (Pa)

También se ha encontrado que el modelo de Casson (C) se ajusta bien a caldos de fluidos de fermentación (Metz et al, 1979)

$$\tau^{0.5} = \tau_c^{0.5} + K \dot{\gamma}_C^{0.5}$$

Es necesario resaltar que la determinación precisa del punto de cedencia es extremadamente difícil. La curva de flujo, obtenida con un reómetro frecuentemente indica un punto de cedencia finito. Sin embargo, el valor de  $\tau_y$  dependerá de las velocidades de deformación que se puedan aplicar controladamente de manera que  $\tau$  aún se pueda medir (Nienow et al, 1985a).

## APENDICE B. DETERMINACION DEL FLUJO DE AIRE

El flujo de aire,  $Q_0$ , se estimó tomando en consideración la presión hidráulica,  $P_H$ , o altura de líquido que existe arriba de los orificios del aspersor de aire,  $H_{L1}$ . Por ejemplo, para agua se tiene:

$$\begin{aligned} H_{L1} &= (0.205 - 0.051) \text{ m} = 0.154 \text{ m} \\ P_H &= \rho g H_{L1} = 0.0151 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (0.0154 \text{ Kg/cm}^2) \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

A la salida de aire en el aspersor se tiene:

$$P_2 = P_{atm} + P_H \quad (\text{B.2})$$

donde:

- $P_2$  es la presión absoluta del aire en el o los orificios del aspersor (Pa)
- $P_{atm}$  es la presión atmosférica, Pa (635 mm de Hg, 0.8633 Kg/cm<sup>2</sup> o 0.8466 x 10<sup>5</sup> Pa)

En la entrada de aire, al nivel del medidor de flujo másico se tiene que:

$$P_1 = P_{atm} + P_{man} \quad (\text{B.3})$$

donde:

- $P_1$  es la presión absoluta de aire en el medidor de flujo másico (Pa)
- $P_{man}$  es la presión manométrica del aire suministrado (Pa) (1 Kg/cm<sup>2</sup> o 0.98066 x 10<sup>5</sup> Pa)
- $P_1 = 1.82726 \times 10^5 \text{ Pa}$  (1.8633 Kg/cm<sup>2</sup>)

A partir de la ley general de los gases se tiene:

$$\frac{(P_1 Q_1)_1}{(P_1 Q_1)_2} = \frac{(nRT)_1}{(nRT)_2} \quad (\text{B.4})$$

donde:

- $n$  es el número de moles (moles)
- $R$  es la constante de la ley de los gases (m<sup>3</sup>·Pa·mol<sup>-1</sup>·°K<sup>-1</sup>)
- $Q_1$  es el flujo de aire medido en el medidor de flujo másico (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>)
- $Q_2$  es el flujo de aire a la salida del aspersor (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>)

Dado que los experimentos se llevaron a cabo a temperatura constante, se puede asumir  $T_1 = T_2$  y que  $(nRT)_1 = (nRT)_2$ . De manera que:

$$Q_{o2} = \frac{P_1}{P_2} Q_{o1} \quad (B.5)$$

$Q_{o1}$  se puede calcular sabiendo que el 100% de la escala digital del medidor de flujo másico corresponde a  $3.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (20 L·min<sup>-1</sup>.)

**APENDICE C. METODOLOGIA PARA LA DETERMINACION DE PARAMETROS REOLOGICOS EN MUESTRAS QUE PRESENTAN PROBLEMAS DE SEDIMENTACION**

**C.1 TEORIA**

Con el propósito de determinar la curva de flujo de un fluido, cuando se emplea un equipo con un impulsor, se deben determinar los valores promedio de esfuerzo de corte ( $\tau_{s,v}$ ) y de velocidad de corte ( $\dot{\gamma}_{s,v}$ ) a diferentes velocidades de rotación del impulsor. Además, se debe respaldar en una adecuada calibración, utilizando para ello líquidos Newtonianos y no-Newtonianos de propiedades reológicas conocidas.

En la región de flujo laminar, el suministro de potencia en un sistema de mezclado, para fluidos Newtonianos, está dado por la siguiente ecuación (Rushton et al., 1950a):

$$Po = c/Re^m \quad (C.1)$$

donde: Po es el número de potencia (adimensional)  
Re es el número de Reynolds (adimensional)  
c es una constante o factor de forma, cuando  $Re = 1$ , que depende de la geometría del sistema  
m es la pendiente de un gráfico logarítmico de Po vs Re en el régimen laminar

El número de potencia está definido por:

$$Po = P/\rho N^3 D^5 \quad (C.2)$$

donde: P es la potencia suministrada por el sistema de agitación (W)  
 $\rho$  es la densidad del líquido (Kg/m<sup>3</sup>)  
N es la velocidad de agitación (s<sup>-1</sup>)  
D es el diámetro del impulsor (m)

y el número de Reynolds por:

$$Re = \rho N D^2 / \mu \quad (C.3)$$

donde:  $\mu$  es la viscosidad (dinámica) Newtoniana, (Pa·s)

Para fluidos no-Newtonianos, el número de Reynolds es:

$$Re = \rho N D^2 / \mu_a \quad (C.4)$$

donde:  $\mu_a$  es la viscosidad aparente (dependiente del esfuerzo de corte) (Pa·s)

Sustituyendo la ecuación (C.2) y (C.4) en la (C.1) y conociendo que  $m \approx -1$ , se obtiene:

$$\mu_s = P/cN^2D^3 \quad (C.5)$$

Dado que para el sistema de medición de torque, la potencia está dada por:

$$P = 2\pi NM \quad (C.6)$$

donde: M es el torque (Nem)

entonces, la ecuación (B.5) se transforma en la siguiente expresión:

$$\mu_s = 2\pi M/cND^3 \quad (C.7)$$

La viscosidad, por definición, es igual a la relación (puntual) de esfuerzo de corte a velocidad de deformación, que en términos de valores promedio es:

$$\mu_s = \tau_{s,v} / \dot{\gamma}_{s,v} \quad (C.8)$$

De acuerdo a Metzner y Otto (1957) y Calderbank y Moo-Young (1959), la velocidad de corte en la vecindad del impulsor es:

$$\dot{\gamma}_{s,v} = k_s N \quad (C.9)$$

donde:  $k_s$  es la constante de proporcionalidad, adimensional, entre la velocidad de rotación de un impulsor y la velocidad de corte.  $k_s$  es dependiente de la geometría y del fluido usado

Combinando las ecuaciones (C.8) y (C.9) se obtiene lo siguiente :

$$\tau_{s,v} = \mu_s k_s N \quad (C.10)$$

Sustituyendo la ecuación (C.7) en la (C.10) :

$$\tau_{s,v} = 2\pi k_s M/cD^3 \quad (C.11.a)$$

ó

$$\tau_{s,v} = ZM \quad (C.11.b)$$

donde:  $Z = 2\pi k_s /cD^3$

De manera que las ecuaciones (C.9) y (C.11) son expresiones que definen la velocidad de deformación y el esfuerzo de corte, respectivamente.

## C.2 MATERIALES Y METODOS

Con el fin de determinar los valores de  $X_{.v}$  y  $\tau_{.v}$ , para el sistema de medición de torque, se deben evaluar las constantes  $c$  (ecuación C.1) y  $k$ , (ecuaciones (C.9) y (C.11)), así como valores de torque a diferentes velocidades de agitación.

Como fluido de referencia, con el recipiente de diámetro igual a 0.1067, se usó el un aceite Brookfield (Fluid 5000, lote:42985,  $\rho = 995 \text{ Kg/m}^3$ ,  $\mu = 4.92 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  a  $25^\circ\text{C}$  y  $n = 1$ ). En el sistema de medición de potencia, diámetro igual a 0.205 m, se usó melaza con una densidad de  $1365 \text{ Kg/m}^3$  y una viscosidad de  $6.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  a  $30.5^\circ\text{C}$  ( $n = 1$ ) (sección V.3.1).

### C.2.1 SISTEMA DE MEDICION DE TORQUE

Para realizar las determinaciones de las propiedades reológicas, se usó un recipiente cilindrico con un diámetro igual a 0.1067 m (fig. 5b) acoplado con un impulsor de turbina de seis palas planas con un diámetro igual a 0.0737m, cuyas dimensiones se describen en la tabla 2. En este caso, el recipiente estaba desprovisto de mamparas. Para realizar las determinaciones de potencia se usó el tanque que se describe en al figura 5a y el impulsor de turbina de seis palas planas con diámetro igual a 0.0753 m cuyas dimensiones se presentan en la tabla 2. Las determinaciones de torque se realizaron de acuerdo al procedimiento descrito en la sección IV.2

### C.3 CONSTANTES $c$ , $k$ , Y $K$

El sistema se debe calibrar determinando la constante  $c$  (ecuación (C.1)) y la constante  $k$ , (Metzner y Otto, 1957; Calderbank y Moo-Young, 1959) con un fluido Newtoniano y uno no-Newtoniano en el régimen laminar, mediante el uso de líquidos de densidad y comportamiento reológico conocidos.

En el presente estudio, por sus características de simplicidad y aplicación, se escogió el modelo de Ostwald-de Walle (Bird et al, 1987) o ley de la potencia, ecuación A1:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (\text{C.13})$$

con el fin de evaluar los valores promedio, la ecuación (C.13) se transforma en:

$$\tau_{.v} = K \dot{\gamma}_{.v}^n \quad (\text{C.14})$$

De manera que, la viscosidad aparente es :

$$\mu_a = \tau_{.v} / \dot{\gamma}_{.v} = K (\dot{\gamma}_{.v})^{n-1} \quad (\text{C.15})$$

Sustituyendo la ecuación (C.7) y (C.9) en la (C.15), se obtiene :

$$2\pi M / cND^3 = K (k_s N)^{n-1} \quad (C.16)$$

Reordenando la ecuación (C.16):

$$M = cKD^3 k_s^{n-1} N^n / 2\pi \quad (C.17)$$

o:

$$M = AN^n \quad (C.18)$$

donde:

$$A = cKD^3 k_s^{n-1} / 2\pi \quad (C.19)$$

reordenando :

$$k_s = (2\pi A / cKD^3)^{1/(n-1)} \quad (C.20)$$

De esta forma, si se construye un gráfico logarítmico de torque, M, versus velocidad de agitación, N, (en el régimen laminar), la pendiente será igual al índice de flujo de la ley de la potencia y el valor de la constante A permite determinar el valor de la constante  $k_s$ , de acuerdo a la ecuación (C.20).

Para los fluidos que presentan problemas de sedimentación, K se puede estimar, una vez que se conoce  $k_s$ , despejándolo de la ecuación (C.19):

$$K = 2\pi A / cD^3 * k_s^{n-1} \quad (C.21)$$

#### C.4 VISCOSIMETRO

El viscosímetro que se utilizó para realizar las determinaciones de viscosidad y de las curvas de flujo, para los fluidos que no presentan problemas de sedimentación, fué el Brookfield LVT con la aguja No. 4. La estimación del esfuerzo de corte, de la velocidad de deformación y de los parámetros reológicos (K y n) se llevaron a cabo de acuerdo al método descrito en la sección IV.2.3.

APENDICE D      MANUSCRITO ACEPTADO PARA SU PUBLICACION EN: Chem. Eng. Technol. 1990.

En las siguientes paginas se presenta la versión aceptada para publicación, en la revista Chemical Engineering & Technology de Alemania Federal, de un articulo constituido por la descripción del dinamómetro y su caracterización. El diseño, y construcción del dinamómetro, que constituye la primera parte del articulo, fué realizado por colaboración entre personal académico del Centro de Instrumentos y del Centro de Investigaciones sobre Ingeniería Genética y Biotecnología. La segunda parte del articulo está constituida por datos de caracterización del dinamómetro, los cuales son resultado del trabajo realizado en la presente tesis.

Chemie-Ingenieur-Technik  
Redaktion  
Boschstraße 12  
6940 Weinheim  
Telefon (06201) 606-117  
Telex 465516 vchwhd  
Telefax (06201) 606-184

# Engineering and Technology

Published on behalf of:  
Gesellschaft Deutscher Chemiker  
DECHEMA Deutsche Gesellschaft  
für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik  
und Biotechnologie  
GVC - VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik  
und Chemieingenieurwesen

Editorial Office:  
Pappelallee 3  
D-6940 Weinheim  
Bundesrepublik Deutschland  
Federal Republic of Germany  
Telex 465 516 vchwh d  
Telefax (06201) 602-328  
Telefon  
Vermittlung/Operator:  
(06201) 602-0  
Durchwahl/Direct dialing:  
(06201) 602-324

Chemical Engineering and Technology, Postfach

Dr. E. Galindo  
Centro de Investigaciones sobre  
Ingeniería Genética y Biotech-  
nología  
Department of Bioengineering  
Universidad Nacional Autónoma  
de Mexico, A.P. 510-3,  
Cuernavaca, Mor. 62271/Mexico

Ihre Zeichen  
Your reference

Ihre Nachricht vom  
Your letter of

Unsere Zeichen  
Our reference

Datum  
Date

We/kr

April 10, 1990

Publication of your paper "A new pneumatic bearing dynamometer for power-input measurement in stirred tanks"

Dear Dr. Galindo,

We are pleased to inform you that the above-mentioned paper has been reviewed by the advisory board of our journal and accepted for publication.

Your manuscript will be sent to Dr. Sawistowska, our English editor in London for editing and language polishing. The edited manuscript will then be forwarded to you so that you can answer questions that may arise.

Please return the manuscript 7 days on receipt so that it can be sent to the typesetter.

Editorial Office  
Chemical Engineering  
and Technology

*J. Wellhausen*  
(Dr. G. Wellhausen)



TEMPERARIO

**A NEW PNEUMATIC BEARING DYNAMOMETER FOR  
POWER-INPUT MEASUREMENT IN STIRRED TANKS**

Roberto Reséndiz\*, Alfredo Martínez°,  
Gabriel Ascanio° and Enrique Galindo°

\* B.Sc R. Reséndiz and B.Sc G. Ascanio, Centro de Instrumentos,  
Mechanical Engineering Department, Universidad Nacional  
Autónoma de México, A. P. 70-186, México, D. F. 04510.

° M.Phil. A. Martínez and Dr. E. Galindo, Centro de  
Investigaciones sobre Ingeniería Genética y Biotecnología,  
Department of Bioengineering, Universidad Nacional Autónoma  
de México, A. P. 510-3, Cuernavaca, Mor. 62271. México.

## ABSTRACT

Turntable dynamometer for the accurate measurement of power input and for mixing applications in stirred tank bench reactors was built. The main feature of this device is a pneumatic bearing with complementary conical parts. The conical pneumatic bearing permitted to have eccentric loads without affecting its stability. The static friction torque in the pneumatic bearing was very small,  $4 \times 10^{-4}$  N.m, and can be neglected in the experimental ranges of measured torques, i.e. from  $5 \times 10^{-3}$  to 2.21 N.m. In accordance with the instrumentation used, the uncertainty obtained with the apparatus is less than 10% at low torque readings. At moderate torque values, uncertainties lower than 1% can be routinely obtained. Several power input measurements show that the scatter of the data obtained is lower than 2.5%. The power input response in the turbulent regime is in agreement with the dimensional analysis: the dependency of the power input to the impeller rotation was to the cubic power. Additionally, data obtained with a turbine impeller under ungasged conditions agree with the predictions of a published correlation, which takes into account several geometrical parameters.

## 1. INTRODUCTION

The accurate knowledge of the power-input, in a specific stirred tank reactor, is necessary for scale-up and scale-down procedures, process characterization, modeling, mixing performance as well as mass transfer, heat transfer and fluid dynamics studies in a bioprocess. The success of a fermentation process at bench, pilot and production scale depends strongly on the energy transmitted by the impeller(s) to the liquid in the bioreactor tank. Nevertheless, the majority of the power data published has been obtained in tanks whose geometrical relationships are not normally found in fermentors.

There are several methods to measure the impeller power-input to agitated vessels. In large tanks, the use of a wattmeter or ammeter is accepted [1, 2]. At pilot scale, the use of torsion dynamometers placed on the shaft, is very usual [1, 3]. For bench scale tanks several configurations have been used, namely: motor dynamometers, either mounted in radial load bearings, motor supported from a shaft extension [1] or air bearing dynamometers [4]. Torsion dynamometers and strain gauges can be used in all scales [1, 2].

Recently, the measuring of the exact temperature increment during agitation in the liquid of an isolated vessel permitted a power-input computation based in heat balance [5]. A coil

spring coupled with a magnetized turbine has been developed [6], making possible the individual turbine power input measurement in multiple impeller fermentors.

Dynamometers with bearings which support a mixing vessel have been used in order to measure the power input in bench scale stirred tank reactors [7]. This kind of dynamometer allows to determine the reaction torque due to the rotation of the impeller in a specific fluid. Nienow and Miles [4] reported a pneumatic bearing, for torque measurement with low frictional losses. With this type of dynamometer, Nienow and Miles [4] obtained a stable and trouble free operation, and they claimed that frictional losses have been reduced to an absolute minimum.

In general, from the data included in the papers reporting power measurement devices is rather difficult to judge about the accuracy of the measurements. It is now well known that the pioneering work of Rushton neglected important friction losses. However, even in relatively recent papers using apparatus claimed as accurate, no characterization of the equipment itself has been reported. This makes very difficult a strict comparison of results between different experimental rigs.

In view of the importance of power input in a bioreactor tank, this work concerns with the construction and characterization of an equipment for the accurate measurement of power-input and suitable for mixing studies at bench scale, with a geometry normally found at bench scale bioreactors. In order to make it very stable, trouble free, of easy alignment and without oscillations, a conical pneumatic bearing was designed.

## 2. DESCRIPTION OF THE EQUIPMENT

Figure 1 shows a schematic diagram of the system including all the ancillary equipment used in the construction of the dynamometer. The conical pneumatic bearing, placed under the transparent acrylic vessel, induces vessel flotation when pressurized air is introduced across air jets (figure 2). Design considerations were similar to those postulated originally by Nienow and Miles [4]. One of the fundamental differences is the conicity of the pneumatic bearing, which was introduced to obtain axial and radial resultants at the same plane (figure 2). The pneumatic bearing has two elements: one static (lower) and the other one floating (upper). The static element has a conical cavity, which function is to provide an axial thrust component and a central cylindrical part which provides a radial thrust component to the journal bearing. The floating element has a conical surface and a central cavity that complements the static element.

The diametral clearance between the central cylindrical part of the static element and the central cavity of the floating element was specified as  $5 \times 10^{-3}$  m. The cavity fits the static component like a journal bearing. The static element of the pneumatic bearing has eight equidistant zones for the axial thrust component, and the central cylindrical part has six equidistant zones for the radial thrust. The dimensions are shown in figure 2. In this way, the thrust and journal bearing action coincide in one plane. The floating element can tilt lightly without suffering metal contact, because the ratio between the journal bearing (t) and the journal bearing diameter (d) is lower than 1/10 (figure 2).

The flat bottom vessel used for the mixing tank have the same vessel geometry of a bench scale fermentor, with a diameter (T) of 0.205 m, a total height of 0.48 m and four baffles of 0.1T width (figure 1). This allows to make measurements which are usually impossible to make in closed fermentors. As shown in figure 1, a squared jacket can be used optionally for temperature control. The drive system (figure 1) consists in a direct current motor with a nominal power of 186 watts. The impeller speed is controlled by an electrical potentiometer, measured with a magnetic pick-up (Power Instruments, Inc., Model 892-1800 OHM-SXC), a gear (60 teeth) and a tachometer (Power Instruments, Inc., Model 1715VR), with a maximum

variation of  $1/60 \text{ s}^{-1}$ . When air is introduced to the liquid, a mass flowmeter with a precision of  $\pm 0.2$  liters per minute is used (Brooks, Model 5850C). The hollow box (figure 1) acts like a vessel support, and permits to observe and record the gas dispersion at the impeller region.

In one side of the hollow box, a rigid arm punctually pushes against a load cell tip transducer (figure 1) of a commercial electronic balance (OHAUS, Model C501 with an uncertainty of  $\pm 7 \times 10^{-5}$  Kg), placed perpendicular to the arm. Additionally, the balance has interface capabilities (RS232). The load cell can be set by a worm screw at any position from the rotary axis of the vessel to a maximum distance of 0.45 m, allowing to carry out measurements at different arm lengths. The torque transmitted by the agitator to the liquid can be measured when the vessel floats and tends to turn without restriction.

### **3. CHARACTERIZATION OF THE EQUIPMENT**

With the aid of a precision dial indicator, it was found a thrust clearance of  $1.7 \times 10^{-5}$  m in order to have a free rotation between the static and the floating element, when pressurized air is introduced to the pneumatic bearing. The weight of the whole vessel, including the hollow box and water with a level equal to the tank diameter, is about 18 Kg.

Operating pressures were found to be  $2.9 \times 10^5$  and  $5.1 \times 10^5$  Pa to support a mass of 25 and 60 Kg, respectively. In order to eliminate any effect induced by the weight of the rig, the operational air pressure at the pneumatic bearing was specified as  $4 \times 10^5$  Pa.

The operation of the pneumatic bearing is free of moments, with respect to any perpendicular plane from that of rotation; therefore, no deflection occurs. The pneumatic bearing permits the free rotation of the vessel; the rest of the equipment does not present dynamical friction load, because the impeller shaft and the air sparger do not touch the tank. The static friction torque, i.e. minimum torque required to rotate the floating vessel, was determined using water or glycerol as testing fluids and a turbine impeller with a diameter of 0.0492 m. The value found for the static friction torque was  $4 \times 10^{-4}$  N.m. However, the equipment can be considered practically frictionless from  $5 \times 10^{-3}$  N.m, which corresponds to the minimum torque measured experimentally. Furthermore, the pneumatic bearing stability and eccentric load capacity allows to install auxiliary instrumentation without affecting its free operation and stability.

In accordance with the procedure described by Holman [8] and with the uncertainty of the primary measurements, i.e. the arm

length ( $\pm 0.001$  m) and force ( $\pm 7 \times 10^{-5}$ ), the highest uncertainty of torque measurements was about 9.8%, for the lowest experimental measurable torque ( $5 \times 10^{-3}$  N.m) and the smallest available arm length (0.05 m). It should be pointed out that at moderate torque readings ( $5 \times 10^{-3}$  - 0.8 N.m) and by manipulating the arm length, the measurements were done with uncertainties lower than 1%.

In order to validate the data obtained with this equipment, several power-input measurements, under ungasged conditions, were carried out at Reynolds numbers between  $10^2$  and  $10^5$  with the impeller shown in figure 1. The fluids used were tap water and a sucrose solution. The experiments were carried out at room temperature. First of all, the power data agree with that predicted by the dimensional analysis, because the relationship between the power consumption and the impeller speed was to the cubic power at the turbulent regime. Figure 3 shows the experimental results and also the prediction of the correlation of Brauer [9]. This correlation is especially useful because takes into consideration a wide range of geometrical parameters. The agreement between the experimental data and Brauer's correlation is quite satisfactory in the Reynolds number range experimented. The Reynolds numbers at which unstable operation is reached, for every Galilei number, as defined by Brauer [9], are indicated in the figure by arrows.

When working with water, this  $Re$  was very well predicted. In the more viscous solution, this value was not reached deliberately.

Measurements of power input under ungasped conditions at ten different stirred speeds were repeated aleatory ten times. The scatter of the data obtained is in the worst of the cases about 5% of the mean value and normally lower than 2.5%.

The equipment can also be used to study flow patterns and the behavior of air cavities. As an example, figure 4 shows a photograph of a vortex cavity, that was taken when air was introduced to the vessel.

**Acknowledgements.** This work was partially supported by the International Foundation for Science (Grant G/1395-1). The participation of M. Ocampo in correcting the English style is acknowledged.

Received \_\_\_\_\_"

#### SYMBOLS USED

- b : baffle width, m  
b' : distance between baffle and vessel wall, m  
C : distance between impeller and tank bottom, m  
D : impeller diameter, m  
Ds : gas sparger ring diameter, m  
d : journal bearing diameter, m  
g : acceleration due to gravity,  $m.s^{-2}$   
Ga : Galilei number,  $(\rho^2 g D^3 / \mu^2)$ , dimensionless  
H : liquid height, m  
L : impeller blade length, m  
N : agitator speed,  $s^{-1}$   
P : ungasged power, W  
Po : power number,  $(P / \rho N^3 D^5)$ , dimensionless  
Re : Reynolds number,  $(\rho N D^2 / \mu)$ , dimensionless  
T : tank diameter, m  
t : journal bearing width, m  
w : impeller blade width, m  
x : disc thickness, m

#### GREEK

- $\rho$  : liquid density,  $Kg.m^{-3}$   
 $\mu$  : viscosity, Pa.s

## 5 REFERENCES

- [1] Brown, D., **Chem. Ind.**, **16** (1977) pp. 684 - 688.
- [2] Holland, F. A., and Chapman, F. S., **Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks**. Reinhold Publishing, New York, 1966.
- [3] Solomons, G. L., **Materials and Methods in Fermentation**. Academic Press. London, 1969.
- [4] Nienow, A. W. and Miles, D., **J. Sci. Instrum.**, **2** (1969) pp. 994 - 995.
- [5] Oosterhuis, N. M. G. Kossen, N. W. F., **Biotechnol. Lett.** **3**, 11 (1981) pp. 645 - 650.
- [6] Bar, R., **Trends Biotechnol.**, **5** (1987) pp. 85 - 86.
- [7] Nagata, S., **Mixing. Principles and Applications**, J. Wiley & Sons, New York, 1975.
- [8] Holman, J.P. **Experimental Methods for Engineers**. McGraw-Hill, Tokyo, 1971.
- [9] Brauer, H., **Adv. Biochem. Eng.**, **13** (1979) pp. 87-120.

#### FIGURE CAPTIONS

Figure 1. Schematic diagram of the torquemeter, ancillary equipment and impeller geometry employed in the pneumatic bearing dynamometer.

Figure 2. Diagram and dimensions of the conical pneumatic bearing (dimensions in mm).

Figure 3.  $P_o$  vs.  $Re$  for 0.52T turbine impeller:

(o)  $Ga = 2.92 \times 10^4$ ; ( $\Delta$ )  $Ga = 1.22 \times 10^6$ ; (-) Brauer's correlation [9]. Arrows indicate  $Re$  number when unstable operation occur as predicted by the equation postulated by Brauer [9].

Figure 4. Photograph of a vortex cavity.

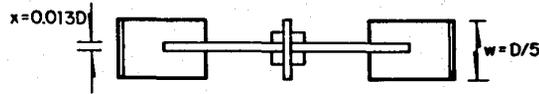
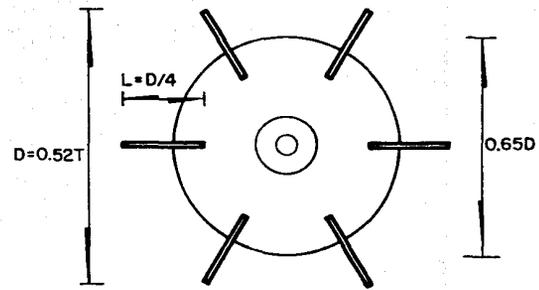
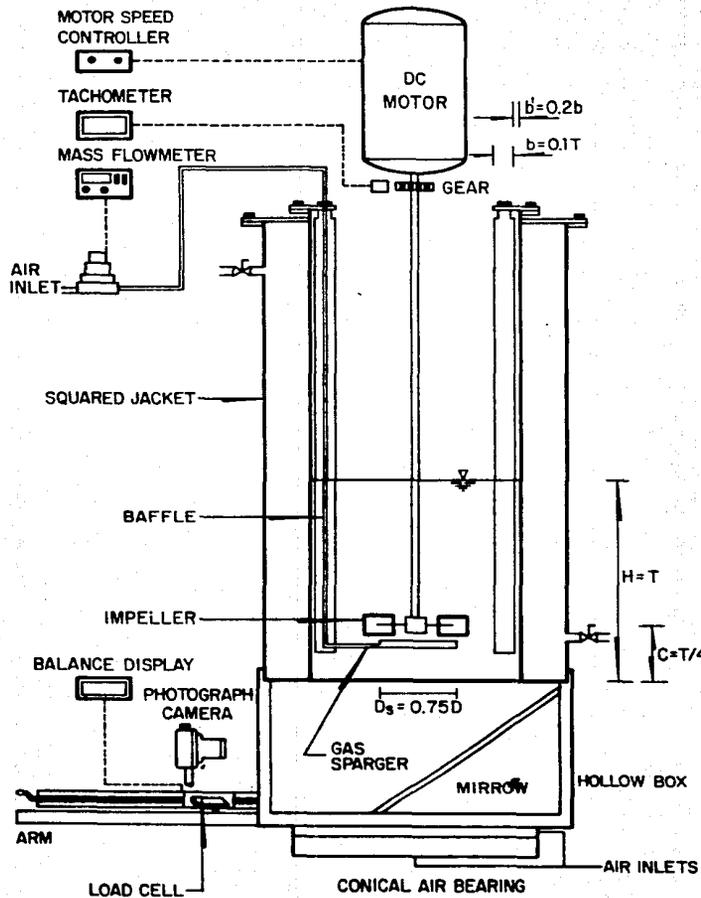


Fig. 1

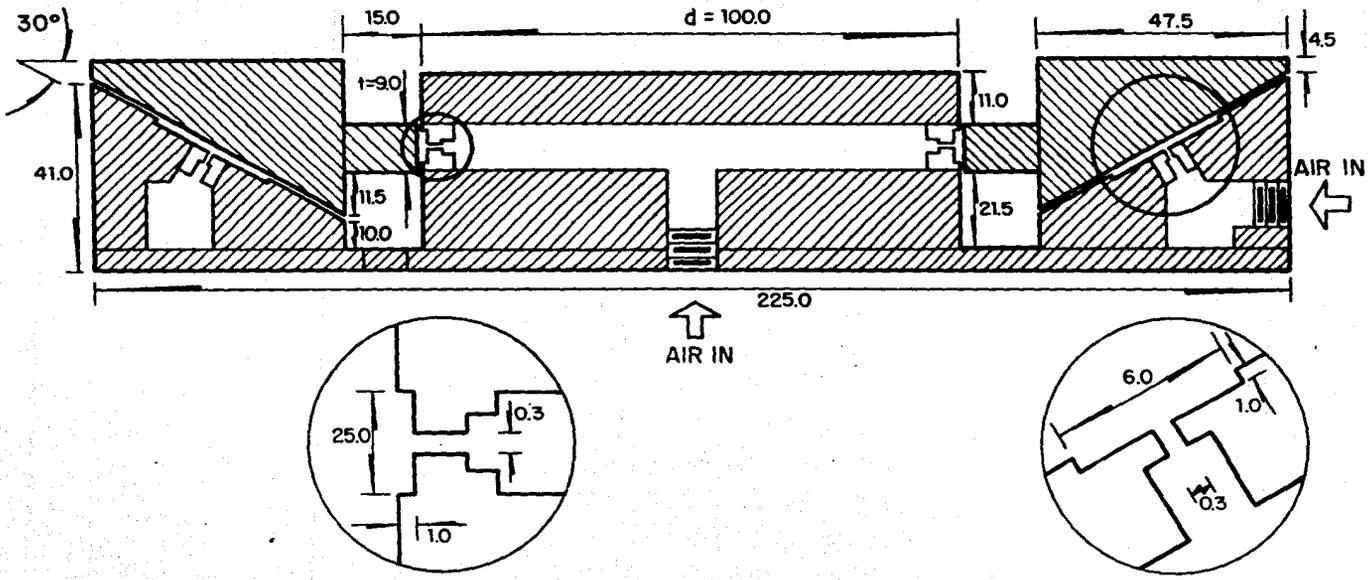


Fig. 2

