

8
2 y.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“Diseño y construcción de un mezclador
para una fase”**



V N A M

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERA EN ALIMENTOS
P R E S E N T A
GUILLERMINA MUNIVE REYES

DIRECTOR:
I. G. ALVARO LEO RAMIREZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO 1989



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

C O N T E N I D O .

C A P I T U L O	P A G I N A
I.- INTRODUCCION	1
II.- INTRODUCCION A LA OPERACION UNITARIA	
. Definición del problema	4
. Generalidades	5
III.- OBJETIVOS	19
IV.- PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO	
. Análisis dimensional	21
. Nomenclatura	30
. Analisis y propuesta de alternativas geométricas, dinámicas y cinemáticas	32
V.- DESARROLLO DE ALTERNATIVAS GEOMETRICAS	
. Geometría del tanque	36
. Volúmen a manejar	37
. Dimensionamiento de baffles	38
. Selección de material para la construcción del tanque y baffles	44
VI.- DESARROLLO DE ALTERNATIVAS CINEMATICAS	
. Viscosidad del fluido	53
. Gravedad específica en sólidos	54
. Diseño del sistema impulsor	56
. Especificaciones de diseño de:	
Propela marina	62
Turbina tipo Rushtom	65
Turbina de hojas inclinadas	71

C A P I T U L O**P A G I N A**

. Velocidad Volumétrica	77
. Potencia requerida	77
VII.- DESARROLLO DE ALTERNATIVAS DINAMICAS	
. Velocidad de manejo	86
. Selección del eje	87
VIII.- ESPECIFICACIONES DE MONTAJE DEL EQUIPO	
. Sistema eléctrico	94
. Montaje del equipo	96
IX.- CONCLUSIONES	101
APENDICE	108
BIBLIOGRAFIA	110

I N D I C E D E F I G U R A S .

PAGINA

. Fig. 1	Tipos usuales de agitadores	7
. Fig. 2	Partes relevantes en un mezclador.	10
. Fig. 3	Impulsores con proporciones típicas.	15
. Fig. 4	Agitación de líquidos con y sin baffles de pared	17
. Fig. 5	Parámetros geométricos de un tanque estandar con fondo plano	40
. Fig. 6	Vista superior del tanque mezclador.	42
. Fig. 7	Rango de viscosidad para el trabajo de impulsores	57
. Fig. 8	Viscosidad de operación para mezcladores	58
. Fig. 9	Diámetro del impulsor controlado por la viscosidad de flujo	60
. Fig. 10	Relación nivel de líquido/diámetro de tanque	61
. Fig. 11	Propela marina	64
. Fig. 12	Esquema de una hoja del impulsor tipo Rushtom	68
. Fig. 13	Turbina Rushtom	70

	PAGINA
. Fig.14 Proporciones de una hoja de la turbina de hojas inclinadas	33
. Fig.15 N_Q para turbina de hojas inclinadas a varios Reynolds y relaciones D_i/D_t	74
. Fig.16 Turbina de hojas inclinadas	76
. Fig.17 Equipo mezclador y eléctrico	98
. Fig.18 Isométrico de la red de desagüe	99

T A B L A S

. TABLA I Propiedades mecánicas y físicas de acero inoxidable tipos 316 y 317.	47
. TABLA II Propiedades mecánicas y físicas de plásticos acrílicos variados	49
. TABLA III Propiedades y resistencia química de acrílicos a recubrimientos orgánicos	51

CAPITULO I.- I N T R O D U C C I O N

INTRODUCCION.

El mezclado es probablemente la más universal de todas las operaciones de proceso; es parte integral de la mayoría de los procesos alimenticios.

Con él, se pretende proporcionar una adecuada distribución, de dos o más componentes dentro de un espacio dado por medio del movimiento de flujo, así como también en algunas operaciones, lograr una adecuada transferencia de calor.

En comparación con otras operaciones unitarias, el mezclado no ha recibido una atención adecuada. Debido a la engañosa sencillez que exhibe, se ha venido empleando en forma empírica y en la mayoría de los casos es visto como un arte; sin embargo, de él depende en muchas ocasiones la obtención del producto en las condiciones deseadas (25).

Por lo anterior, es de gran importancia investigar y/o estudiar los principios básicos sobre esta operación mecánica dentro de la carrera del Ingeniero en Alimentos, dándole el enfoque, que permita un estudio sistemático de su aplicación en diferentes áreas de procesos alimenticios, ya sea a nivel laboratorio o a nivel industrial.

El diseño y la construcción de este equipo, tienen como propósito poder revisar los parámetros que intervienen en la operación de mezclado, con la perspectiva del Ingeniero en Alimentos.

**CAPITULO II.- INTRODUCCION A LA OPERA
CION UNITARIA**

DEFINICION DEL PROBLEMA.

Debido a la gran cantidad de aplicaciones que tienen los equipos mezcladores, la poca estandarización, la relativa complejidad existente dentro de los procesos industriales alimenticios, no es posible el desempeño de un criterio preciso para el diseño y/o selección (22).

Hay que tener en cuenta que el desarrollo de un equipo mezclador a nivel laboratorio va a permitir la selección y diseño de dispositivos a nivel industrial.

En esta tesis se propone el diseño de un equipo mezclador modelo para mezclas en una fase (líquido-líquido).

Este diseño no se realizó para la solución de un problema específico, pero se delimitó mediante algunas alternativas de diseño, deducidas de un análisis dimensional y un ba lance de masa-momentum.

En las siguientes páginas se delimitará al problema medante algunos conceptos que influyen en una mezcla.

- Generalidades

En general el término de agitación y mezcla son intercambiables. Algunos autores usan el término agitación para la mezcla de líquidos y lechosidades. Por lo que se toma como agitación a la actividad, movimiento y turbulencia -- generada en líquidos. Mezcla, se define como el entremezclado de dos o más materiales diferentes logrando una uniformidad en el producto final, ya sea física o química.

El grado de mezcla deseado, sólo se puede determinar -- mediante un muestreo, y establecer pruebas físicas o pruebas de percepción visual.

Dentro del término mezcla, existen ciertos términos específicos como el amasado, la dispersión y emulsificación.

El amasado se refiere al trabajo de masas plásticas y es un proceso de golpeo entre los productos.

Los términos dispersión y emulsificación se refieren -- generalmente a la mezcla de sustancias coloidales. La dispersión es aplicada a mezclas entre sólidos-líquidos o sólidos-sólidos; la emulsificación se denomina a la mezcla de fluidos inmiscibles.

METAS EN UN MEZCLADO.

- Producir uniformidad de composición. Esto se aplica a la mezcla de líquidos y pastas.

- Generar una reacción química o física. En reacciones químicas, el mezclado es fundamental en operaciones como -- transferencia de gases, destilación, absorción, dilución y -- floculación.

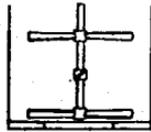
- Promover cambios físicos entre fases. Esto incluye algunas operaciones como dispersión de fluidos miscibles, extracción, emulsificación, evitar el crecimiento de cristales y dispersión de gas en un líquido.

Dentro de la mezcla de líquidos y pastas, puede decirse en forma general y sencilla que existen tres tipos básicos, donde se contemplan mezcladores de baja, media y alta consistencia; el objetivo común a los tres tipos es crear un producto final homogéneo, por medio de la generación de flujo de los componentes. A continuación se da una breve explicación de estos sistemas.

TIPO 1: Para mezclas de baja consistencia, es decir, mezclas líquidas de baja viscosidad, suspensiones líquido-sólido y dispersiones de gases en líquidos, se requiere de recipientes estacionarios, que tengan ensamblados un agitador paleta, o impulsor(es) sobre un eje rotatorio. El eje se monta generalmente en posición vertical dentro del tanque - Fig. 1 a)

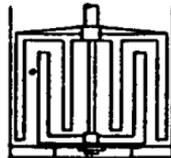
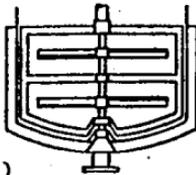
TIPO 2: Para mezclas de mediana consistencia, líquidos viscosos, masas, grasas. Se requiere de un recipiente estacionario con paletas móviles, aspas, cuchillas, rejas, hélices, que van montados al centro del recipiente sobre un eje rotatorio Fig. 1 b) y c).

TIPO 3: Mezclas de alta consistencia, tales como pastas, materiales plásticos y polvos secos, en general se usa un recipiente en movimiento, equipado con paletas en movimiento o estacionarias, aspas, cuchillas, rejas o hélices. Fig. 1 d).



a) AGITADOR SIM-
PLE DE PALETAS

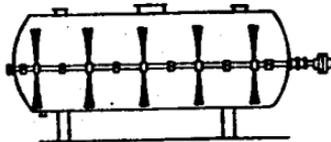
a)



AGITADORES
DE
b) ASPAS
c) REJAS

b)

c)



d) MEZCLADOR
HORIZONTAL DE
MÚLTIPLES PA-
LETAS.

d)

TIPOS USUALES DE
AGITADORES

FIG. N.º
1

CHARLES S. QUILLEN (25)

COMPONENTES PRINCIPALES DE UN MEZCLADOR PARA LIQUIDOS.

La mayoría de los líquidos se mezclan en tanques cilíndricos en posición vertical; el tanque puede ser abierto o cerrado, y sus proporciones varían en un rango amplio dependiendo de la naturaleza de la(s) fase(s) a mezclar. La FIG.2 corresponde a un mezclador simple, el cual consta de las siguientes partes principales (11).

- * Impulsor, montado sobre un eje .
- * Eje, montado al centro del tanque y acoplado directamente al motor, algunas veces va acoplado a un reductor de velocidades.
- * Baffles, que pueden ser fijos o desmontables en caso de requerirlo.
- * Termopares, para el caso en que se requiera un control de la temperatura durante el proceso de mezclado.
- * Válvula de desagüe.

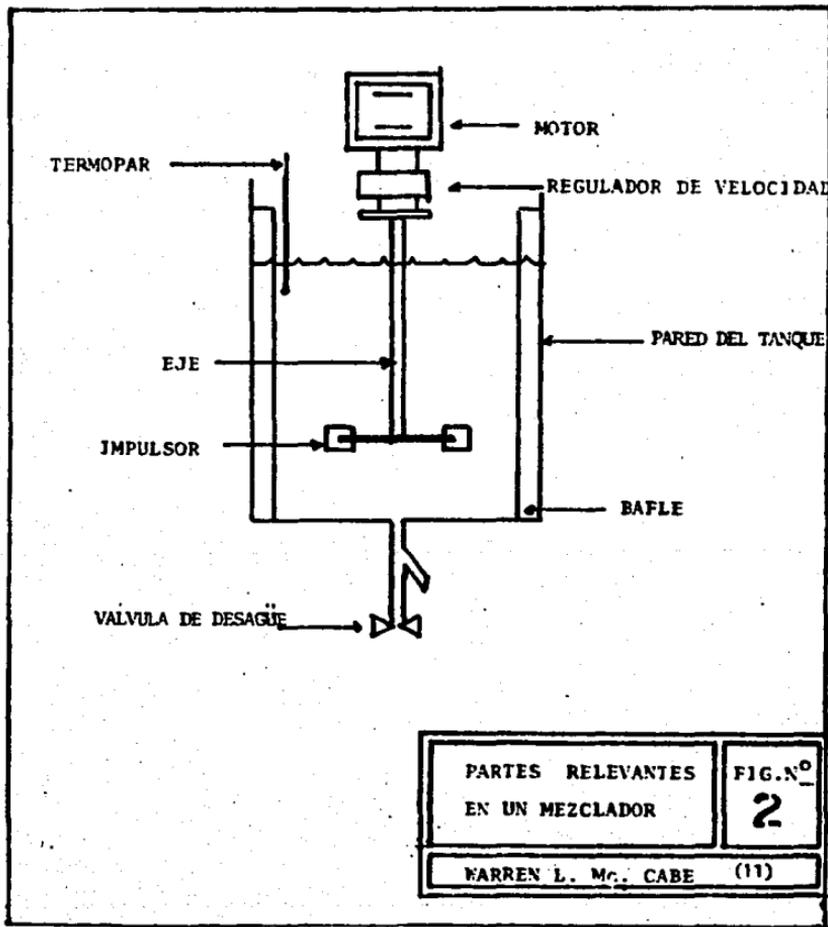
FACTORES QUE DETERMINAN UN BUEN MEZCLADO.

A continuación se mencionan algunos factores que influyen en forma directa sobre la eficiencia de un proceso de mezclado.

- * Configuración del recipiente de mezclado.
- * Propiedades físicas de los componentes a mezclar, desde aquellos correspondientes a líquidos de baja viscosidad, hasta pastas de alta viscosidad, inclusive polvos.

* Energía efectiva requerida para promover el fluido de los componentes (adecuada provisión de energía).

* Diseño del medio mecánico (eje, propelas) que se usan para transmitir la energía mecánica a los medios a mezclar.



PARTES RELEVANTES EN UN MEZCLADOR	FIG. N.º 2
WARREN L. Mc. CABE (11)	

EJEMPLOS DE MEZCLADO EN EL PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS.

Los ejemplos que a continuación se presentan, dan una idea de la utilización de equipos mezcladores de los tres tipos antes mencionados.

FLUIDOS DE BAJA VISCOSIDAD.

Se tiene este tipo de material durante la manufactura de grasas(su co-cción), dilución de soluciones concentradas, manufactura de fruta molida, preparación de mezclas azúcar-agua para dulce, preparación de sopas y salmueras con baja viscosidad, hidratación de productos secos como la leche, disolución de tinturas en polvo. En estos casos se recomienda un mezclador de tanque fijo y con impulsores montados sobre un eje rotatorio al centro de este Ref.(2).

FLUIDOS DE ALTA VISCOSIDAD.

Se presentan durante la preparación y manejo de mezclas de masa para pan, pasteles, galletas, preparación de pastas de carne y mariscos, manufactura de chocolates y sub productos, margarinas, mantequilla, cremas batidas, quesería y cremas artificiales. En estos casos se recomienda el uso de un mezclador tanque tipo cazo, mezcladoras de hoja -Z- y mezcladoras con impulsores de rejas Ref. (2).

SOLIDOS SECOS.

Se presentan en la mezcla de granos previamente a su molienda, mezclas de harinas y la incorporación de aditivos a estas, preparación de leches en polvo, mezclas para pasteles, mezclas para sopas secas, incorporación de aditivos a productos.

secos. Para el proceso de estas mezclas, se recomienda el uso de mezcladores de tipo volteo y con hélices, mezclador estático con rejillas, y mezcladores que permitan forzar al producto a través de una serie de obstrucciones (por ejemplo; hélices, placas perforadas, rejillas, parrillas, etc.) obteniéndose una mayor acción mecánica. FIG. 1.

CARACTERISTICAS GENERALES DE SISTEMAS IMPULSORES COMUN MENTE UTILIZADOS PARA MEZCLAS LIQUIDAS.

Debido a la gran variedad de impulsores de este tipo, y la no existencia de normas para su diseño y/o selección, es necesario este breve resumen Ref.(11).

Tomando en cuenta, que el mezclado se origina con la creación de turbulencia y la inducción del líquido hacia esa zona, dando por resultado una transferencia de cantidad de movimiento, los dispositivos comúnmente utilizados con los que producen corrientes y turbulencia son: impulsores giratorios como la hélice marina, turbina y paleta plana, mismos que a continuación se describen.

AGITADOR DE TURBINA

Se muestran algunos de los tipos que existen en la Fig. 3 b) y c) Ref. (2), (11). Generalmente constan de un impulsor con más de cuatro hojas, montadas sobre un mismo patrón, el cual está fijo a un eje rotatorio. La mayoría de estos agitadores, giran a velocidades del rango de 30 - 500 RPM.

La turbina simple de hojas rectas, genera fuertes corrientes de flujo en dirección radial y rotacional. Se utilizan baffles en las paredes del tanque para evitar los remolinos formados por el flujo del líquido dentro del tanque Ref(11). Los agitadores de turbina son efectivos sobre un amplio rango de viscosidades Fig. 7 (7).

AGITADOR DE PROPELAS.

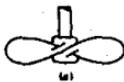
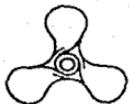
Consiste básicamente de un impulsor de hojas cortas tipo marino, montadas en un eje generalmente con ajuste inclinado, aunque en ocasiones pueden montarse cuatro hojas (2), (11). Usualmente son colocados al centro del tanque, y con la ayuda de baffles (pantallas) para la disminución del efecto de remolino, también pueden ir montadas cerca de la pared del recipiente en posición vertical o formando un ángulo con la pared del tanque, Fig. 3 a).

Es un impulsor de alta velocidad para líquidos de bajas viscosidades. Las propelas pueden girar a la velocidad máxima del motor, entre 1150 y 1750 RPM; algunas más grandes giran a velocidades de 400 a 800 RPM. Este tipo de impulsor causa vigorosos cortes en el líquido, por lo que persisten las corrientes de flujo propias para la dispersión de sólidos y formación de emulsiones (15).

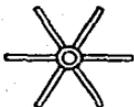
AGITADOR DE PALETAS.

Se utilizan en problemas de agitación relativamente sencillos; constan generalmente de dos y cuatro hojas planas fijadas a un eje rotatorio, el cual va al centro del tanque. Las paletas giran en un rango de velocidades de baja-moderada (20-150RPM), ocasionalmente pueden manejarse a altas velocidades (mayores a 1500RPM), pero con poca carga.

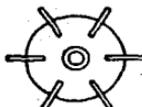
Con este tipo de paletas, el líquido se mueve en dirección radial y rotacional, y en el caso de agitadores con paletas de hojas inclinadas, se generan corrientes de flujo en dirección tangencial.



a) PROPULSOR TIPO MARINO



b)



c)

b), c) PROPULSORES TIPO TURBINA

IMPULSORES CON -
PROPORCIONES TI -
PICAS.

FIG. N^o

3

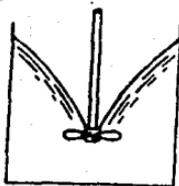
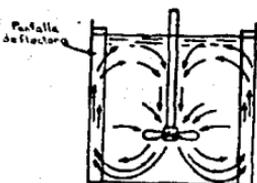
ROBERT E. TREYBAL (14)

CARACTERISTICAS GENERALES SOBRE BAFLES.

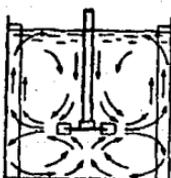
En el proceso de mezclado de líquidos de baja o alta viscosidad, en tanque cilíndrico de pared lisa y con un solo impulsor, se generan turbulencias que "canalizan" paquetes relativamente grandes de (moléculas) las sustancias a mezclar. Esto se debe a que la corriente es circular y prácticamente no hay movimiento alguno en dirección vertical Ref(3) Fig.(4).

En estas condiciones el mezclado no tiene la máxima eficiencia, por eso es necesaria la utilización de baffles o pantallas que reduzcan este efecto, y favorezcan la interacción de las sustancias en el tanque.

Los baffles (pantallas deflectoras), son placas que están espaciadas simétricamente una de otra; se sitúan sobre la superficie interior del tanque y están dirigidas hacia su eje (2), el ancho que pueden tener va de $1/10$ a $1/20$ el diámetro del tanque (2). Conforme se aumenta la viscosidad del líquido, disminuye el ancho del baffle a utilizar (15), dependiendo también del tipo de impulsor utilizado (11).



IMPULSOR MARINO



TURBINA DE DISCO DE HOJAS PLANAS

AGITACION DE LIQUIDOS CON  SIN BAFLES DE PARED.

FIG. N^o

4

ROBERT E. TREYBAL (14)

CAPITULO III.- O B J E T I V O S

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL.

Diseño y construcción de un equipo mezclador modo
lo para mezclas en una fase (líquido-líquido).

OBJETIVOS PARTICULARES.

Establecimiento de los parámetros de trabajo del
equipo mezclador.

Diseño y construcción de un tanque mezclador estandar
para mezclas en una fase.

NOTA: Tomando la consideración de referencias bibliográficas.

Diseño, selección y construcción de pantallas, impulsos
y eje para mezclas en una fase (líquido-líquido).

CAPITULO IV.- PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO

PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO.

En términos totalmente analíticos, la descripción de una mezcla no es fácil, por lo que un análisis dimensional va a permitir el estudio del problema en variables independientes cualitativas. Debido al gran número de variables físicas, geométricas y de operación que se presentan dentro de una mezcla, es necesario delimitar algunas de estas variables mediante un balance de masa-momentum; analizando las de mayor influencia en la mezcla de líquidos y delimitar así las alternativas de diseño para el presente modelo.

ANÁLISIS DIMENSIONAL.

Para el análisis dimensional, se debe considerar un tanque mezclador de líquidos, donde la potencia del agitador depende solamente de las siguientes variables.

- ° Velocidad rotacional del agitador (N)
- ° Diámetro del agitador (Di)
- ° Densidad del líquido (ρ)
- ° Viscosidad del líquido (μ)
- ° Aceleración gravitacional (g)

Considerando que el diámetro del agitador se relaciona estrictamente con las dimensiones lineales como la altura del líquido, diámetro del tanque, número y posición de pantallas; la potencia requerida para mezclas líquidas que dará expresada de la siguiente forma:

$$P = f (N, D_i, \rho, \mu, g) \quad (1)$$

De la ec.(1) no es posible deducir una ecuación diferencial aplicable al caso, por lo que el desarrollo de un método general que enliste las variables importantes del problema, determinará los parámetros adimensionales que resulten de la combinación de variables.

Por esto, el teorema de Buckingham enuncia que las relaciones funcionales contenidas en un problema, pueden expresarse en términos fundamentales, esto es, los términos de la ec.(1) pueden ser expresados en unidades de masa M, longitud L, y tiempo T y las unidades variables (N, D_i, ρ, μ, g) para que sean adimensionales se elevan a ciertos exponentes como a, b, c, etc.

Así la ec.(1) quedará expresada de la siguiente forma:

$$P = f (N^a, D_i^b, \rho^c, \mu^d, g^e) \quad (2)$$

Sustituyendo en la ec(2) los términos de masa M, longitud L y tiempo T en cada una de las unidades variables, la ec. (2) quedará expresada de la siguiente forma:

$$\frac{M L^2}{T^3} = \left(\frac{1}{T}\right)^a \left(\frac{L}{1}\right)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{M}{LT}\right)^d \left(\frac{L}{T^2}\right)^e \quad (3)$$

rearrgando términos:

$$\begin{aligned} M & : 1 = c + d \\ L & : 2 = b + (-3) - d + e \\ T & ; -3 = -a - d - 2e \end{aligned}$$

despejando:

$$\begin{aligned} c & = 1 - d \\ b & = 5 - 2e - e \\ a & = 3 - d - 2e \end{aligned}$$

expresando la potencia en términos de exponentes.

$$P = C (N^{3-d-2e} Di^{5-2d-e} \rho^{1-d} \mu^d g^e) \quad (4)$$

arreglando en función de los exponentes:

$$P = C \rho N^3 Di^5 \left(\frac{\mu}{\rho N Di^2} \right)^d \left(\frac{g}{N^2 Di} \right)^e \quad (5)$$

rearrgando términos:

$$\frac{P}{N^3 Di^5} = C \left(\frac{Di^2 N \rho}{\mu} \right)^{-d} \left(\frac{N^2 Di}{g} \right)^{-e} \quad (6)$$

sustituyendo $-d = x$, $-e = y$

$$\frac{P}{N^3 \rho Di^5} = C \left(\frac{Di^2 N \rho}{\mu} \right)^x \left(\frac{N^2 Di}{g} \right)^y \quad (7)$$

En la ec. (7) los dos términos del lado derecho representan: el número de Reynolds para agitación en su forma recíproca ($D^2 N \rho / \mu$), y el número de Froude para agitación ($D N^2 / g$).

El Reynolds representa la proporción inercial que existe entre las fuerzas viscosas, y el Froude, representa la proporción inercial de las fuerzas gravitacionales.

El factor C, es un factor que representa la geometría del sistema.

Cuando la superficie del líquido es esencialmente plana (sistema sin vórtice) y cuando se utilizan tanques con baffles completos, los efectos gravitacionales no tienen efecto, por lo que el exponente "y" del número de Froude es cero -- ($N_{Fr} = 1$) y la ecuación (7) estará en función del Reynolds Ref(7).

$$N_p = C (N_{Re})^x \quad (8)$$

De la ec. (8) se deduce que, un factor trascendental en el diseño de un tanque mezclador es la potencia necesaria para mover al impulsor, y generar el mezclado.

Esta potencia delimitada por la densidad del fluido (ρ), su viscosidad (μ), velocidad rotacional del eje (N) y el diámetro del impulsor, da las condiciones de trabajo del equipo mezclador.

En el análisis y propuesta de alternativas se podrá apreciar lo anterior.

Un análisis dimensional es un balance total mediante el cual se conocen los factores externos que atañen al problema, como las corrientes de entrada, salida e intercambios con los alrededores; y se utiliza para la resolución de problemas de flujo, sin permitir el conocimiento de lo que sucede dentro del volúmen de control.

Una ecuación de continuidad permite analizar internamente al problema (1), (4), obteniéndose así una ecuación de movimiento para cada una de las coordenadas geométricas. La suma de estas ecuaciones forma la ecuación de continuidad de Transferencia de masa (para el presente problema) ec (9):

$$\frac{D_v}{Dt} = -(\nabla \cdot \mathcal{C}) - \nabla p + \rho g \quad (9)$$

La ec. (9) casi nunca se utiliza en su forma general, ya que dependiendo del problema, se descartan los términos -- que son cero o casi cero de acuerdo a las condiciones límites que se fijan.

Para el presente trabajo se va a delimitar como condición límite que, la densidad (ρ) y viscosidad (μ) de los fluidos a mezclar se mantengan constantes durante la mezcla.

Con estas limitantes se obtiene la ec. de Navier-Stokes (1), (19), que describe un fluido agitado en términos de presión y velocidad ec. (10).

$$\frac{Dv^*}{Dt^*} = -\nabla^* p^* + \frac{\left[\frac{\mu}{\rho D^2 N} \right] \nabla^{*2} v^* + \left[\frac{g}{D N^2} \right] \frac{i}{g} \quad (10)$$

$1/Re$
 $1/Fr$

El número de Reynolds (DN^{ρ}/μ) para agitación, representa la relación que existe entre las fuerzas inerciales y la viscosidad y el número de Froude (DN^2/g), representa la relación entre la fuerza inercial y gravitacional.

Para la ecuación (10), se dan las siguientes condiciones frontera:

. Tanque cilíndrico con características geométricas similares: diámetro del tanque-altura del líquido 1:1

. La distribución de presión y velocidad pueden ser expresadas en función del número de Reynolds y Froude.

. Cuando la superficie del líquido es esencialmente plana (no existe vórtice), los efectos gravitacionales son nulos; lo que implica una simplificación de la ec. de masa-momentum, por que el diámetro del impulsor, la velocidad rotacional de este, la densidad y la viscosidad del líquido, estarán dados por el Reynolds en función de la distribución de presión y velocidad adimensionales.

- Potencia del agitador.

La distribución de presión no puede aplicarse directamente al diseño de un mezclador, solo una porción de ésta, puede ser relacionada con los requerimientos de potencia del agitador- (distribuida a lo largo de la superficie de la hoja del impulsor).

Esta relación viene a dar una descripción del sistema físico. La potencia es el producto de la velocidad rotacional del impulsor y el torque aplicado. El torque es determinado por la integración de la distribución de presión sobre la superficie de las hojas de la turbina. Por lo que, la relación de presión de los fluidos adyacentes entre las hojas y la potencia, estará dada por:

$$(p - p_0)_{\text{hoja}} \propto P / N D^3 \quad (11)$$

Sustituyendo la ec.(11) dentro de la definición de presión adimensional, ec.(11'):

$$P^* = (p - p_0) g_c / \rho N^2 D^2 \quad (11')$$

Se obtiene una relación importante entre presión adimensional y potencia.

$$P^* \propto \left(\frac{P}{N D^3} \right) \frac{g_c}{\rho N^2 D^2} = \frac{P g_c}{\rho N^5 D^5} \quad (12)$$

$$P \frac{g_c}{\rho N^5 D^5} = f (N_{Re}, N_{Fr}) \quad (12')$$

Cuando el efecto gravitacional es nulo, el n^om de potencia sólo dependerá del Reynolds, de tal forma que la ec.(12) estará en función del Reynolds.

$$\frac{P}{\rho N^3 D^5} g_c = f(N_{Re}) \quad (15)$$

La ecuación(13) normalmente se utiliza para relacionar da tos de Número de Potencia.

- Condiciones límite.

Cuando se tienen valores de REynolds de 10^4 o más, Ref(1), (23), las fuerzas viscosas y gravitacionales, se verán domi- nadas por las fuerzas inerciales, dando la expresión conoci- da como la ecuación de Euler.

$$\frac{D_v^*}{D_t} = - \nabla^* p^* \quad (14)$$

Donde la distribución de presión y velocidad no varían. Así, la distribución de presión a lo largo de la hoja del impulsor sujeta al número de Potencia, será constante.

$$\frac{P}{\rho N^3 D^5} g_c = \text{CNTE.} \quad (15)$$

Reescribiendo la ec. (15)

$$P \propto \rho N^3 D^5 \quad (15.1)$$

Esta condición límite es frecuentemente aplicada en agita dores de turbina. La segunda condición límite, corresponde a pequeños valores de Reynolds(alrededor de 20)Ref.(22), donde la fuerza gravitacional e inercial son iguales, dando por re sultado una igualdad entre las fuerzas de presión y velocidad.

$$g_c \nabla p = \mu \nabla^2 v \quad (16)$$

De nuevo el Reynolds es eliminado como parámetro, y la distribución de presión y de velocidad son constantes.

Analizando la ec.(16), la presión está dada por fuerzas viscosas por unidad de área.

$$p^* = \frac{(\rho - \rho_0) R_c}{\mu N} \quad (17)$$

sustituyendo la ec.(10) en la ec. (17).

$$p^* \left[\frac{P}{N D^3} \right] \frac{R_c}{\mu N} = \frac{P g_c}{\mu N^2 D^3} \quad (18)$$

El grupo del lado derecho de la ec.(18) se le denomina "Número de viscosidad de potencia".

Puesto que existe un rango de viscosidad constante.

$$P \propto \mu N^2 D^3 \quad (19)$$

La ec.(13) y los casos límites antes descritos, se relacionan mediante coordenadas logarítmicas de # Po v.s. # Re, que se han corroborado mediante datos experimentales. Dickey, Fenic (18).

N O M E N C L A T U R A .

SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDADES SI
A	Area	m ²
a	Claro entre pared y bafle	m
b	Ancho de un bafle	m
D/D _t	Derivada substancial de tiempo	-
D	Diámetro	m
Di	Diámetro de impulsor	m
D _T	Diámetro de impulsor corregido	m
d _s	Diámetro para un esfuerzo cortante	m
d _t	Diámetro para un tensor de esfuerzo	m
e	Espesor del bafle	m
g _c	Constante gravitacional	kg.m/N.s ²
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²
H _l	Altura de líquido	m
H _t	Altura del tanque	m
H _p	Potencia del motor	hp
L	Longitud	m
M	Masa	kg
M _{máx}	Momento máximo	-
N _{Fr}	Número de Froude	-
N _{Re}	Numero de Reuynolds	-
n	Número de impulsores	-
N	Velocidad rotacional	RPM
P	Potencia	hp
p	Presión	Pa
P _o	Presión de referencia	Pa

SIMBOLO	CANTIDAD	UNIDADES
		S I
P^*	Potencia adimensional	-
S_g	Gravedad especifica	-
T_Q	Torque	-
t	Tiempo	seg
t^*	Tiempo adimensional	-
w	Ancho de la hoja	m
v	Velocidad	m/s
∇	Operador Vectorial	1/m
G	Tensor de Esfuerzo	-
σ_s	Esfuerzo cortante	psi
σ_t	Tensor de esfuerzo	psi
π	Constante Pi	3,1415927
ρ	Densidad	kg/m ³
μ	Viscosidad	N.s/m ²

ANALISIS Y PROPUESTA DE ALTERNATIVAS.

En base al análisis y al balance de masa-momentum, se pueden enumerar una serie de alternativas geométricas, dinámicas y cinemáticas-que influyen en la mezcla de líquidos(problemas tipo mezcla-movimiento) Ref. (18),(21).

De estas alternativas, las que se dan a continuación,son las que influyen en forma directa en el diseño y selección del equipo mezclador modelo.

Estas alternativas delimitadas con supuestos teóricos y referencias bibliográficas, darán una respuesta para la selección -- del equipo modelo, REF(18),(21),(22).

- Alternativas geométricas.

Aquí se define el tamaño del "problema"; esto es mediante la propuesta de dimensiones tanto en el tanque, baffles e impulsores, y la geometría de estos, se van delimitando las condiciones de trabajo para el mezclador modelo.

- Alternativas dinámicas.

Se contemplan parámetros como viscosidad y densidad de mezcla y la potencia requerida para un problema dado; estos parámetros permitirán corroborar el diseño de impulsores al obtenerse una velocidad volumétrica dada (reacción dinámica) que es utilizada como una medida del grado de agitación en un sistema de mezclas líquidas.

- Alternativas cinemáticas.

En ellas se proponen alternativas en la velocidad de manejo de los impulsores y el diseño del eje impulsor, con esto se asegura el manejo de los impulsores bajo las condiciones de trabajo inicialmente delimitadas.

A continuación se describen los parámetros que comprenden a cada una de estas alternativas, enumerándose algunas respuestas para cada punto.

ALTERNATIVAS GEOMETRICAS.

- . Geometría del tanque

{	Cilindrico	{	Estacionario
	Cuadrado		En movimiento

- . Volúmen a manejar

- . Dimensiones del tanque

{	Relación diámetro del tanque-altura del líquido ($D_t - H_l$)
	1 : 1
	1 : 1.5
	1 : 2

- . Dimensiones de baffles

{	1/10 Diámetro del tanque (D_t)
	1/20 Diámetro del tanque (D_t)

ALTERNATIVAS DINAMICAS.

- . Tipo de impulsores { En base a la relación $D_i - D_t$ (diámetro impulsor-diámetro tanque)
- . Viscosidad de mezcla { Límite mínimo 200 cp
Límite máximo 1×10^3 cp
- . Densidad de mezcla { Densidad relativa mínima = 1
Densidad relativa máxima = 1.5
- . Velocidad volumétrica { Dependerá del tamaño de impulsor y la velocidad de este.
- . Potencia requerida { 0.5 Hp Tentativo

ALTERNATIVAS CINEMATICAS.

- . Especificación del eje { Diámetro necesario de acuerdo a las condiciones del problema y dimensiones de impulsores para transferir una reacción dinámica dada.
- . Velocidad de mezclado { Esta alternativa se define experimentalmente, variando las condiciones de mezclado.

**CAPITULO V.- DESARROLLO DE ALTERNATIVAS
GEOMETRICAS**

DESARROLLO DE ALTERNATIVAS. GEOMETRICAS.

-Geometria del tanque:

Para el diseño de tanques mezcladores se pueden contemplar recipientes de cualquier tamaño y forma(3), pero ordinariamente se diseñan tanques cilindricos(de eje vertical) con fondo plano o cóncavo, con pantallas(o utilizando el impulsor excéntrico) y con una profundidad de líquido aproximadamente igual al diámetro del tanque.

Para la mezcla de líquidos, se recomiendan tanques fijos, de preferencia cilindricos y con impulsores montados sobre un eje rotatorio al centro de éste (2),(11). Así, el tanque que diseñado quedará fijo.

El diseño geométrico estandar en un tanque mezclador para líquidos, es aquel que contempla una configuración cilíndrica y con fondo plano.

Para el modelo aquí diseñado se partirá de esta geometría ya que es la más adecuada para los requerimientos de mezcla establecidos a nivel industrial, permitiendo un movimiento de los fluidos(7). En cambio utilizando tanques cuadrados o con ángulos, no se asegura un movimiento uniforme en los rincones de estos (3).

-Volumen a manejar:

Para la elección de capacidad en un tanque a nivel piloto, se deben de tomar en cuenta ciertos parámetros de manejo, como son volúmenes maniobrables de trabajo y que impliquen relativos costos bajos.

- Dimensiones del tanque.

En el diseño de tanques mezcladores para una fase, se han tomado como dimensiones base, relaciones diámetro del tanque - altura del líquido ($D_t - H_l$) de 1:1 hasta 1:2 (3),(7),(21), (17).

Basándome en estas proposiciones, así como en el volumen equivalente antes mencionado (20 litros) y en la fórmula para el cálculo de volumen de un cilindro, diseñé el tanque mezclador.

Para delimitar este diseño, tomé como bases de cálculo:

- . La relación $D_t - H_l$ igual a 1:1
- . Para la base de cálculo, la altura del tanque (H_t) dada en la ecuación de volumen para un cilindro, será igual a la altura del líquido dada por la relación $D_t - H_l$.
- . Un volumen de trabajo igual a 20 litros.

DATOS:

$$\begin{aligned} V_{eq} &= 20 \text{ litros} = 20\,000 \text{ cm}^3 \\ \text{Vol. cilindro} &= \pi r^2 H_t \quad (20) \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} r &= \text{radio del tanque} \\ H_t &= \text{altura del tanque} \\ D_t - H_t &= 1 : 1 \end{aligned}$$

Sustituyendo los datos en la ecuación (2).

$$\begin{aligned} 20\,000 &= \pi r^2 H_t \\ H_t = D_t &= D_t = 2r \\ 20\,000 &= \pi r^2 (2r) \\ &= \pi 2 r^3 \end{aligned}$$

Despejando r ;

$$r = \sqrt[3]{\frac{20\,000}{2 \pi}}$$

$$\begin{aligned} r &= 14.71 \text{ cm} \\ H_t &= 29.5 \text{ cm} = D_t \end{aligned}$$

Ya que se pueden utilizar D_t-H_1 hasta de 1:2, el tanque aquí diseñado dará una opción D_t-H_1 máxima de 1 : 1.5, por lo que H_1 final será de 44.25 cm. Para evitar desbordamientos de líquidos al mezclar, la capacidad D_t-H_1 1: 1.5 será aproximadamente el 90% de la capacidad total del tanque.

Así, las dimensiones finales del tanque serán :

Diámetro del tanque.

$$D_t = 29.5 \text{ cm}$$

Altura del tanque

$$H_t = 49.0 \text{ cm}$$

- Dimensiones de los baffles.

Cualquier tipo de impulsor utilizado, aunado a la reacción de las paredes del tanque, desarrollará movimientos de vórtice o torbellino. El líquido se arremolinará en dirección a la rotación del agitador, causando una caída del nivel del líquido alrededor del eje impulsor. Debido a que la corriente es circular y prácticamente no hay movimiento vertical o lateral alguno, existen pocas posibilidades de mezcla (3). Fig.4 Ref.(14)

Para evitar este movimiento giratorio, se utilizan panta

llas dirigidas hacia el eje del tanque.

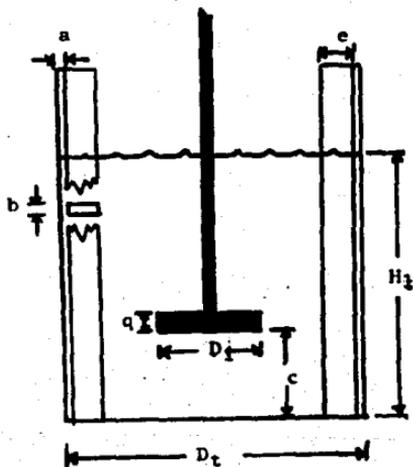
Las pantallas se colocan verticalmente a lo largo de la profundidad total del líquido, o solamente en una parte de éste.

Las dimensiones de los baffles varían dependiendo del problema que se tenga(11),(19). El ancho puede ir desde $1/5$ hasta un $1/10$ a $6 \frac{1}{12}$ el diámetro del tanque(D_t), el espesor puede ser $0.02D_t$, el claro entre pared del tanque- y baffle varía dependiendo de la viscosidad que se tenga(19) esto es, para mezclas líquidas de baja viscosidad (100 cp), los baffles pueden ir pegados a la pared o hasta una distancia de $0.02 D_t$. En el caso de líquidos de alta viscosidad (mayores a 10 000 cp), los baffles van separados de la pared del tanque(7), y el empleo de 6 u 8 baffles, dan mejores resultados que 4 (17), (19).

Para el presente diseño, se seleccionaron 8 pantallas intercambiables, con dimensiones basadas en las referencias (3) y (11) Las dimensiones guardan una relación directa con el diámetro del tanque.

Las proporciones que deben guardar los baffles con respecto a las dimensiones del tanque son las siguientes, ver Fig. 5.

ESPECIFICACION	NOMENCLATURA	REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	
		HOLLAND F.A.(7)	LEWIS E. GATES(21)
Diámetro tanque	D_t	=	D_t
Altura líquido	H_1	=	D_t
espesor de baffle	e	=	$0.02D_t$
Ancho de baffle	b	=	$1/10 D_t$
Claro entre pared del tanque y baffle	a	=	$0.02 D_t$



PARAMETROS GEOMETRI-
COS DE UN TANQUE ES-
TANDAR CON FONDO - -
PLANO.

FIG. N^o

5

MICHAEL W. CHUDACEK (18)

Al utilizar ocho pantallas desmontables, se propone comparar en el LEM del Ingeniero en Alimentos los grados de mezcla generados al variar el número de pantallas (con un mismo tipo de impulsor) de acuerdo al fluido a manejar.

Los baffles se dimensionaron de acuerdo a las proporciones planteadas por: Holland (7) y Lewis(11) y al tamaño del tanque mezclador.

Los baffles se construyeron en acrílico transparente, mismo material usado para la construcción del tanque mezclador.

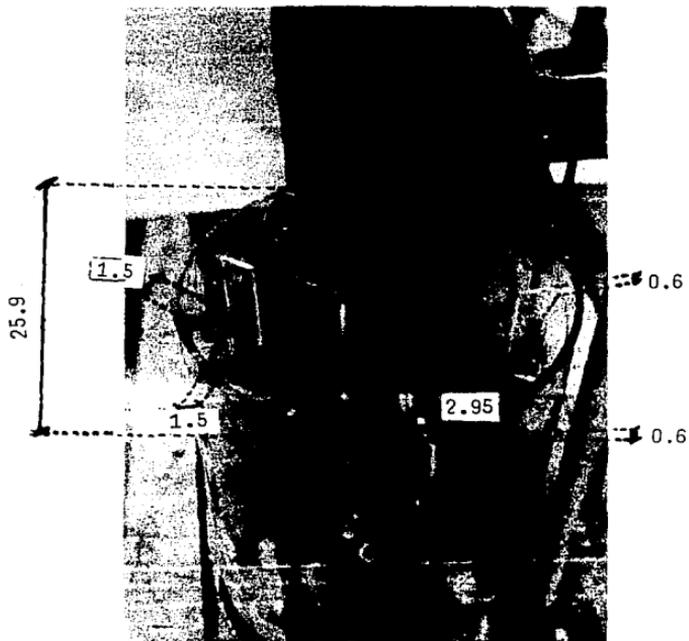
Las dimensiones de los baffles son:

NOMENCLATURA	MEDIDAD(cm)	REFERENCIA
Long. baffle -	44.5	Holland(7),Lewis(21)
Ancho baffle -	2.95	Holland(7)
Espesor baffle -	0.6	Lewis (11)
Claro entre pared y baffle -	0.2	Mc. Cabe(11),Lewis(21)

Los baffles colocados simétricamente dentro del tanque, se unieron a él mediante pequeñas laminillas de acero inoxidable en forma de ángulo recto ver Fig. 6.

Las dimensiones de las laminillas son:

Longitud de laminilla	4 cm
Ancho de laminilla	3 cm
Espesor de laminilla	0.2 cm
Angulo formado por la laminilla	90°



VISTA SUPERIOR DEL
TANQUE MEZCLADOR

FIG. Nº

6

TESIS 1989

ACOT: cm

El ancho de la laminilla equivale a una décima parte del diámetro del tanque.

El baffle colocado desde el fondo del tanque, permite trabajar relaciones máximas $D_t - H_1$ de 1:1.5

Aproximadamente el 90% de los requerimientos para lograr una buena mezcla en líquidos, se han visto satisfechas con estas proporciones . Ref(3),(7),(17),(21),(23).

La figura 6 muestra una vista del tanque mezclador y la posición de los baffles dentro de éste.

Los baffles se soportaron a la pared del tanque mediante pequeños ángulos de acero inoxidable, remachados al tanque y unidos con tornillos a los baffles.

- Selección de materiales para la construcción del tanque y baffles.

Existe una gran cantidad de materiales para la construcción de tanques, pero dentro de la industria alimentaria esta variedad se restringe, ya que además de las condiciones de trabajo que se van a tener, hay que tomar en cuenta que los materiales de construcción no reaccionen con los alimentos que van a contener.

Como base de selección, se tienen que definir los puntos siguientes:

- . Corrosión del equipo
- . Volúmenes a manejar
- . Temperatura y presión de trabajo
- . Resistencia del material de construcción

Dentro de la industria alimentaria, se utilizan materiales como acero inoxidable y algunos materiales plásticos; a continuación se dan algunas características generales sobre estos tipos de materiales.

- Características de aceros inoxidable.

El acero inoxidable resiste en gran medida la corrosión por su contenido en cromo, níquel y molibdeno. Aunque esta resistencia se ve disminuida por la presencia de ácidos como el clorhídrico y sulfúrico a ciertas temperaturas y concentraciones.

Las superficies lisas del acero inoxidable, tienen gran resistencia a la corrosión, pero los pliegues, arrugas y puntos soldados los acelera.

Al soldarse el acero inoxidable, el material es calentado a muy altas temperaturas sobre un área muy pequeña. Este calentamiento causa severos esfuerzos internos que aumentan al enfriarse el material, causando con la presencia de soluciones cáusticas, fracturas en la soldadura, rupturas en los aceros con aleaciones de níquel, además que el almacenamiento de líquidos causa la corrosión en las partes afectadas.

El acero inoxidable puede ser usado a altas temperaturas y presiones con el debido cuidado para su selección y manejo de construcción.

Dentro de los aceros inoxidables, existen los tipos austeníticos, aleaciones de hierro-cromo(8-30%) níquel(6-20%) que se caracterizan por su alta ductibilidad, buena resistencia a la corrosión y trabajo a altas temperaturas.

Dentro de este grupo de aleación, se encuentran los aceros inoxidables serie 300.

Los tipos 316 y 317, son los más aconsejables para la industria alimentaria (11).

El tipo 316 posee una resistencia superior a los otros aceros a corrosivos químicos, atmosféricos y a ciertos ácidos oxidativos como el ácido nítrico, así como al ac. sulfúrico (11).

Su alta resistencia a altas temperaturas, permite el manejo de soluciones ácidas(~5% en concentración) a 120°F (~50°C), pero por debajo de los 100°F(~38°C) ofrece una excelente resistencia a soluciones ácidas concentradas.

Posee una excelente resistencia a golpes, deformaciones por tensiones y por lo tanto a rupturas(Tabla I)Ref.(10).

Por estas características, el acero inoxidable tipo 316 es excelente para el manejo de alimentos y usos farmacéuticos.

TABLE I. PROPIEDADES MECANICAS Y FISICAS DE
ACERO INOXIDABLE TIPOS 316 Y 317 (10)

UNIDADES	TIPO 316	TIPO 317
. Densidad relativa lb/in ²	0.29	0.29
. Conductividad térmica Btu.ft ² /h.°F.ft a 212°F	9.4	9.4
. Coeficiente de expansión térmica 68-212°F (in)(°F)x10 ⁻⁶	9.2	9.2
. Calor específico Btu(°F)(lb)	0.12	0.12
. Modulo de elasticidad psi x 10 ⁸	29.0	29.0
. Resistencia a la tracción psi-mín	30 000	30 000
. Elongación en 2in/mín %	40.0	40.0
. Dureza Rockwell	B 95 máx	B 95 máx.
. Resistencia a impactos Izod ft-lb	70 mín	70 mín
. Resistencia a la flexión (t) 1000lb/in ²	50.0	50.0
. Temperatura máxima recomendada en servicio °C	927.0	927.0
°F	1700.0	1700.0
. Temperatura de distorsión térmica °C	1205.0	1205.0
°F	2250.0	2250.0

- Características de materiales plásticos.

Existe una gran variedad de materiales plásticos disponibles para la construcción de tanques. Frecuentemente los tanques de plástico han sido usados satisfactoriamente a temperaturas y presiones moderadas.

En general, su costo es menor por su resistencia a la corrosión en comparación con un tanque de metal. Por lo que en comparación, un tanque de plástico dura mucho más.

La principal desventaja de los tanques de plástico es su tendencia a la deformación, pero que puede ser resuelta mediante soportes metálicos. Esto es frecuente en tanques de grandes dimensiones.

La transparencia de muchos plásticos, permite la visibilidad de los líquidos que contienen, ayudando en gran medida en trabajos a nivel laboratorio.

Los plásticos están clasificados en termoplásticos y termo-resistentes(5). Los primeros se deforman con calentamiento o enfriamiento brusco, como polietileno, polivinil cloruro y polietileno.

Los termoresistentes no se derriten o deforman por su acabado, como los poliésteres, furanos, plásticos fenólicos y epóxicos (5), (9).

Reybold⁹ clasifica en cuatro grupos a los plásticos para la construcción de tanques.

- . Poliésteres reforzados con vidrio
- . Furanos reforzados con vidrio
- . Furoles y epóxicos
- . Furanos fenólicos y polivinil cloruro

TABLA II. PROPIEDADES MECANICAS Y FISICAS TÍPICAS DE PLÁSTICOS ACRÍLICOS VARIADOS (13)

	UNIDADES	PARA FINES GENERALES	
		TIPO I	TIPO II
. Densidad relativa	lb/in ²	1.11 - 1.19	1.18- 2.0
. Conductividad térmica	Btu.ft ² /h.°F.ft	0.12	0.12
. Coef. de dilatación térmica	(in)(°F) x 10 ⁻⁵	4.5	4.5
. Calor específico	Btu/lb °F	0.35	0.35
. Inflamabilidad	in/mín	0.5 - 2.2	0.5 - 1.8
. Modulo de elasticidad en tensión	10 ⁵ .lb/in ²	3.5 - 4.5	4.5 - 5.0
. Resistencia a la tracción	1000 lb/ in ²	6.0 - 9.0	8.0 - 10.0
. Elongación en 2in	%	2.0 - 7.0	2.0 - 7.0
. Dureza Rockwell	- -	M 80 - 90	M 96 - 102
. Resistencia a impactos	lb.ft/in ranura	0.4	0.4
. Modulo de elasticidad en flexión	10 ⁵ .lb/in ²	3.5 - 4.5	4.5
. Resistencia a la flexión	1000 lc/in ²	12.0-14.0	15.0-17.0
. Resistencia a la compresión(0.1% de desviación)	1000 lb/in ²	12.0-14.0	14.0-18.0
. Temperatura máx. recomendada en servicio	°C	60 - 71.1	82.2-93.3
. Temperatura de distorsión térmica	°C	65.5-82.2	87.7-107.2

Los poliésteres reforzados resisten ácidos inorgánicos, orgánicos y sus sales a temperaturas arriba de 100°C. Y no se recomiendan para reactivos que reaccionen con el vidrio como el ácido hidrofúorico y sus derivados.

Los furanos y epóxidos reforzados con vidrio tienen menores propiedades de resistencia que los poliésteres reforzados.

Los fenólicos pueden ser usados con ác. hidrofúorico.

Los plásticos furanos y fenólicos se denominan asbestos cuando se usan a temperaturas de 150°C.

Comparando las propiedades físicas y químicas de los aceros inoxidable tipo 316 y 317 y el acrílico para la construcción del tanque mezclador, se puede apreciar (ver tablas I y II) que; físicamente el acero inoxidable es mucho más resistente a golpes, deformación por tracción, y a trabajos -- que requieran altas temperaturas. Químicamente también son -- mucho más resistentes que el acrílico al uso de ácidos oxidantes, orgánicos y minerales (ver tabla III).

En cambio el acrílico es un material transparente que -- permite a nivel experimental apreciar el comportamiento de -- corrientes líquidas generadas por los impulsores (con ayuda -- de fluidos trazadores).

Es de peso ligero, facilitando su manejo e instalación -- Ref. (3), (9).

Es flexible a temperaturas de 110°C aproximadamente, y es rígido a temperatura ambiente, permitiendo una relativa facilidad en el moldeo del material Ref. (13). No se ve afectado -- por cambios de pH o presencia de oxígeno Ref. (9), (13).

En base a las anteriores características, se seleccionó un acrílico transparente que pertenece a la familia de las -- resinas poliésteres (9), con 0.6 cm de espesor.

TABLA III. PROPIEDADES Y RESISTENCIA QUÍMICA DE ACRÍLICOS A RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS (13)

RESISTENCIA QUÍMICA.

. Durabilidad	E
. Aspersión de sales	E
. Disolventes alcoholes	M
. Disolvente gasolina	B
. Disolvente hidrocarburos	R
. Disolvente ésteres, cetonas	M
. Disolvente clorados	M
. Bebidas, alimentos	MB
. Sales	MB
. Amoníaco	M
. Alcális (b)	B,R
. Ácidos minerales (c)	B,R,M
. Ácidos oxidantes (c)	R,M,M
. Ácidos orgánicos (acético, fórmico, etc) (c)	M,M,M
. Ácido fosfórico	M
. Ácidos orgánicos (oleico, esteárico, etc)	R
. Agua (salada, dulce)	E

PROPIEDADES FÍSICAS

. Dureza de oscilación de sward (8° día)	24
. Flexibilidad	E
. Resistencia a la abrasión, ciclos (d)	2500
. Temperatura máxima promedio (°C)	82.2
. Toxicidad	Ninguna
. Resistencia a los impactos	E
. Propiedades dieléctricas	MB
Adhesión a :	
. Metales ferrosos	MB
. Metales no ferrosos	MB
. Pinturas antigénas	M

SIMBOLOGÍA

E Excelente

MB Muy buena

B Buena

R Regular

M Mala

(b) Cuando hay dos clasificaciones, son para diluidos (20% y concentrados respectivamente)

(c) Estos datos son para diluidos (10%), mediano (10-30%) y concentrado respectivamente.

(d) Rueda taber GS-10.

**CAPITULO VI.- DESARROLLO DE ALTERNATIVAS
CINEMATICAS.**

DESARROLLO DE ALTERNATIVAS CINEMATICAS.

La delimitación de este tipo de alternativas servirá para la propuesta de la potencia requerida.

La potencia es un factor de suma importancia en el diseño de mezcladores, ya que de ella dependerá el funcionamiento del impulsor. Esta potencia no puede predecirse teóricamente, se requieren de correlaciones empíricas para estimarla, como: el Reynolds, Flujo volumétrico, el número de Potencia.

En base a estas correlaciones (dadas bibliográficamente) y las delimitaciones del diseño, se calculará la potencia necesaria para el funcionamiento de los impulsores anteriormente diseñados.

Las condiciones de trabajo necesarias a delimitar son:

- . Viscosidad del fluido a manejar
- . Densidad de fluido
- . Velocidad de manejo de los impulsores
- . Dimensiones de los impulsores.

- Viscosidad del fluido.

En el apéndice A.1 se enlistan las viscosidades de algunos alimentos líquidos trabajados a temperatura ambiente, la mayoría oscila en un rango de 1 a 10^3 cp. La viscosidad - hasta cierto punto, es un parámetro medible para la selección de impulsores, como se puede ver en la Fig.6 (7).

Para el presente diseño se va a partir de éste rango de viscosidad y suponer durante los cálculos que el producto no tiene variaciones significativas durante la mezcla.

- Gravedad específica en sólidos.

Es el promedio de la masa por unidad de volumen de las partículas individuales presentes en un producto, se determina de la siguiente manera.

. Adhiera a un alambre fino el sólido a pesar, suspéndalo del asiento del gancho de la balanza analítica y pese (peso en aire)

. Pese un platillo con agua sobre el platillo de la balanza y pese, proceda a colocar la misma cantidad de sólido en forma de cilindro e inmérsalo en el líquido, repese el platillo con agua más el sólido (peso en líquido)

. El cuerpo sólido tenderá a aumentar de volumen.

. La gravedad específica se determina con la siguiente fórmula.

$$\text{gravedad específica de un sólido} = \frac{\text{Peso en aire}}{\text{Peso en aire} - \text{Peso en líq.}} \times \text{gravedad específica del líquido.}$$

ejemplo.

Determinar la gravedad específica del aluminio.

- ° Líquido usado : Agua a 20°C
- ° Primera pesada(peso en aire) 12.3741 g
- ° Segunda pesada(peso en líquido) 7.7018 g
- ° Aplicando la fórmula se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Gravedad específica} &= \frac{12.3741\text{g}}{12.3741 - 7.7018} \times 0.9982 \text{ g/cm}^3 \\ &= \frac{12.3741\text{g}}{4.6723 \text{ g}} \times 0.9982 \text{ g/cm}^3 \\ &= 2.64362 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

Para el presente diseño se va a tomar una densidad aparente máxima de 1.5 y suponer una variación máxima de 0.05.

Este límite de densidad está dado para mezclas con comportamiento newtoniano Ref. (13).

- Tipo de sistema impulsor.

Para la selección y/o diseño de un impulsor se toman en cuenta los siguientes parámetros.

° Tipo de impulsor.- Diseñado de acuerdo al tipo de problema que se tenga y puede ser: mezcla-movimiento, suspensión de sólidos o dispersión de gases Ref.(11),(12).

° Diámetro y localización de los agitadores: Esto depende de la relación H_t/D_t , donde H_t es la altura del líquido dentro del tanque y D_t es el diámetro del mismo.

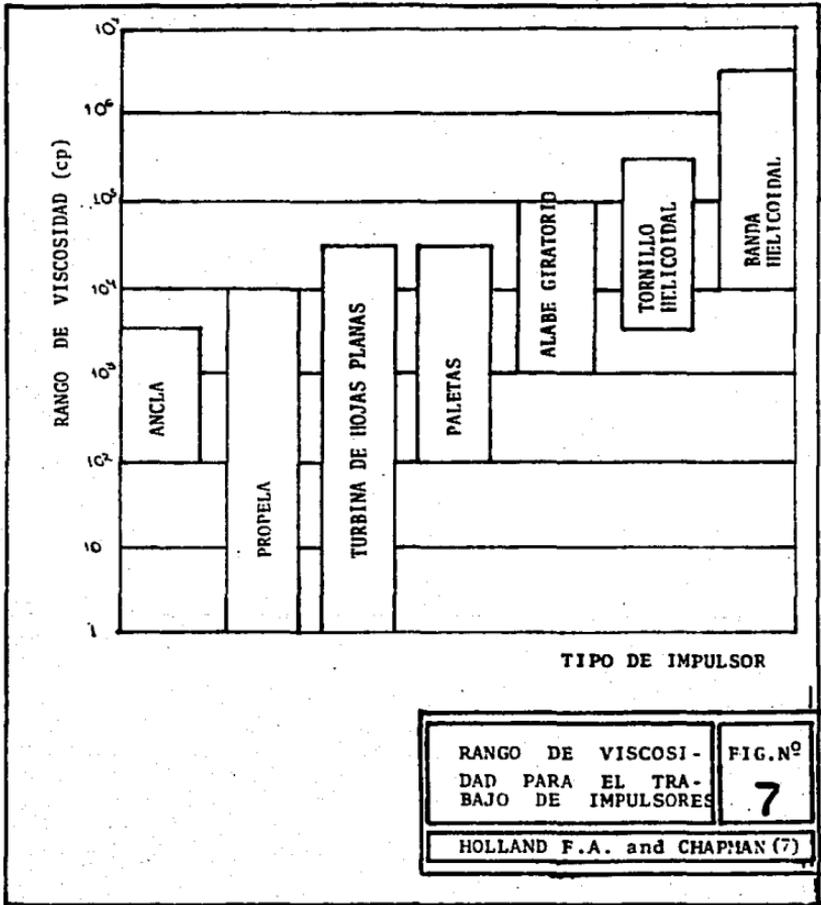
° Número de impulsores: Depende de la relación altura del líquido-diámetro del tanque.

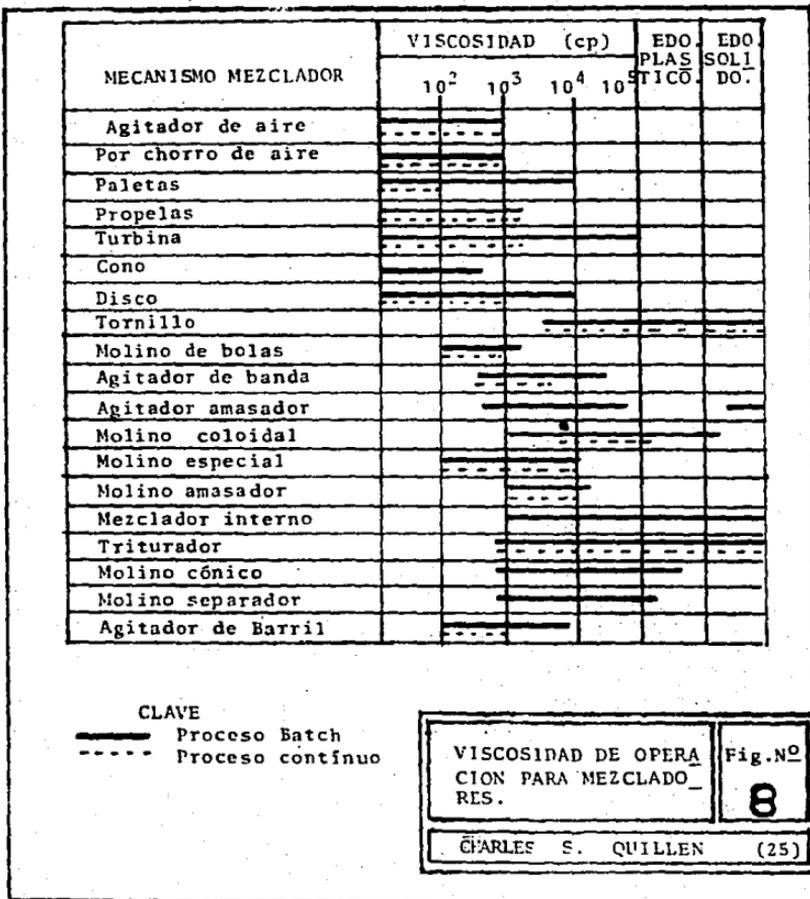
Las recomendaciones de diseño para impulsores, va relacionada con el volumen equivalente y la viscosidad de la mezcla, o sea:

El tipo de impulsor puede ser seleccionado de acuerdo al rango de viscosidad del problema. Fig. 7 y Fig. 8.

El diámetro de los impulsores puede ser calculado tanto por los parámetros dados en las referencias (7),(10),(18), o mediante la Fig. 9 Ref.(16) que permite calcular el diámetro del impulsor de acuerdo al rango de viscosidad a trabajar. Esta curva es aplicable a cualquier tipo de mezcla, además, puede ser usada para seleccionar las dimensiones de un tanque(16).

La localización de impulsores dentro de un tanque mezclador con pantallas a nivel industrial o laboratorio, puede hacerse mediante la Fig. 10, que relaciona la altura del líquido





do con el diámetro del tanque, y que es aplicable a cualquier tipo de mezcla.

El tipo de impulsores puede ser calculado mediante la siguiente ecuación Ref.(12)

$$WELH / D_t = \text{No. de impulsores} \quad (21)$$

donde:

WELH = Altura del volúmen equivalente

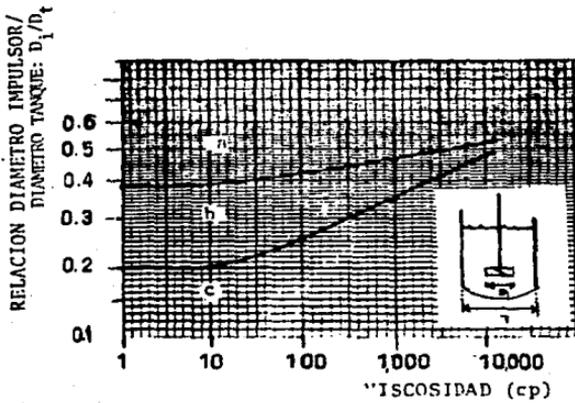
D_t = Diámetro del tanque mezclador.

WELH es la altura máxima por el líquido; se calcula mediante el producto de la gravedad específica promedio de la mezcla y la altura de su volúmen dentro del tanque.

Para el presente diseño, se contemplan tres tipos de impulsores. Esto permitirá comparar los resultados generados por cada impulsor durante el desarrollo de prácticas experimentales en el LEM del Ingeniero en Alimentos.

Para el diseño de los impulsores, se tomó como parámetro de referencia, los tipos más usados para la mezcla de líquidos, las dimensiones del tanque diseñado y el poder obtener una misma área libre de contacto entre los impulsores, tomando en cuenta las figuras 9 y 10:

En la mezcla de líquidos, los impulsores más utilizados son los de tipo propela, turbina y paleta. Generalmente las propelas y turbinas se utilizan en la mezcla de líquidos con viscosidades de 1 a 10^4 cp, Fig 7 REF.(7) y Fig.8 -- Ref.(13). Mientras que los impulsores tipo paleta, trabajan menores rangos de viscosidad, que van de 10^2 a 10^4 cp.



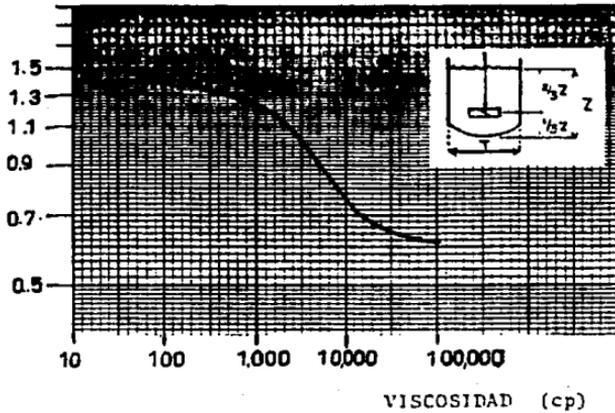
DIAMETRO DEL IMPULSOR CONTROLADO POR LA VISCOSIDAD DEL FLUJO

FIG. N^o

9

CHARLES M. GARRISON, JR (21)

RELACION NIVEL DE LIQ. /DIAMETRO TANQUE



RELACION NIVEL DE LIQUIDO/ DIAMETRO- DE TANQUE (PARA CUAL-QUIER CLASE DE MEZCLADO)

FIG. N^o 10

CHARLES M. GARRISON (21)

CONDICIONES DE SELECCION DEL IMPULSOR TIPO.
PROPELA MARINA.

Es un impulsor que genera corrientes de flujo en dirección axial, y se utiliza para el manejo de fluidos con viscosidades de 1 a 10^3 cp, generando altas velocidades de flujo en líquidos con baja viscosidad (13)

La selección de este impulsor, se basa en los parámetros que a continuación se describen, y por ser un equipo disponible en el LEM, se darán sus especificaciones y dimensiones.

Los parámetros de selección son:

. Los límites de selección de viscosidad para mezclas líquidas, van de 1 a 10^3 cp.

. El diámetro externo del impulsor debe oscilar en un rango de 5.9 a 9.83cm, que requiere el diseño del mezclador. La propele marina cuenta con un diámetro externo de 8.6 cm ($D_i / D_c = 0.29$)

. El área de contacto que ofrece el impulsor (área de las hojas en contacto con el líquido) es de 13.83cm^2 . Esta área se calculó mediante el conteo en mm^2 del área ocupada por las hojas del impulsor sobre un papel milimétrico.

En base al anterior área de contacto de la propele, se diseñarán las otras turbinas, para poder dar así una base de comparación para la utilización de cualquier impulsor dependiendo del problema que se tenga.

El diseño de la propele, consta de tres hojas rectangulares, conocidas dentro de la industria como hojas tipo "cua--

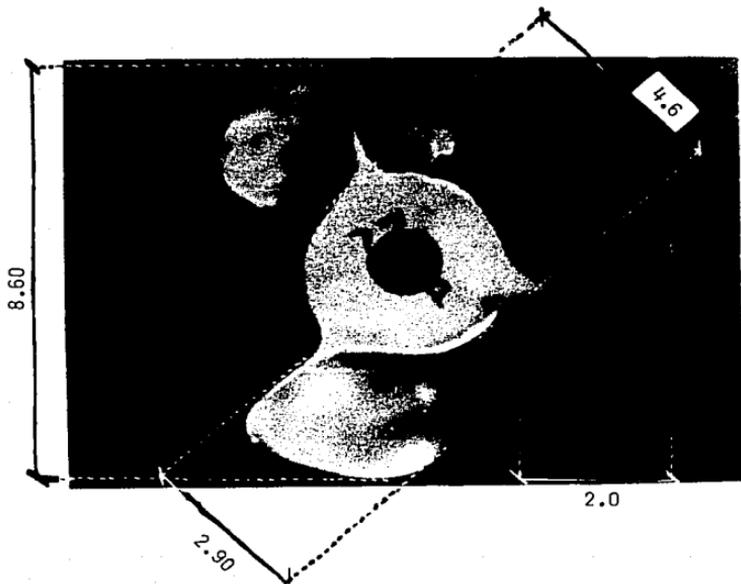
dro inclinado", donde el líquido lanzado por el impulsor alcanza una distancia igual al diámetro del impulsor (23).

Esta propela es principalmente un mecanismo de propulsión. Su eficiencia es relativa al área de sus hojas, esto medido sobre un plano circular con un radio igual al radio de la propela (3).

El desplazamiento de agua es directamente proporcional al cuadrado de su diámetro y a la velocidad rotacional.

El impulsor está hecho en acero inoxidable, y sus dimensiones son(Ver Fig. 11):

	NOMENCLATURA BIBLIOGRAFICA	MEDIDA (cm)	REFERENCIA
Diámetro impulsor	Di	8.6	14
Diámetro cubo	- -	4.6	14
Ancho de cada hoja	- -	2.6	14
Longitud de la hoja imp.	- -	2.0	- -
Espesor de la hoja	- -	0.35	14
Area libre de contacto	- -	27.66cm ²	14



PROPELA MARINA

FIG. Nº

11

TESIS 1989 ACOT: cm

CONDICIONES DE DISEÑO DE LA TURBINA DE DISCO.

La turbina de disco de hojas planas, también conocida como turbina Rushtom, genera flujo de líquido en dirección radial(27); se utiliza cuando se requieren altos cortes o turbulencias y en fluidos con altas viscosidades, donde las propelas y otros tipos de impulsores son imprácticos (23).

De acuerdo a las figuras 7 y 8, el rango de viscosidad máximo al que puede trabajar es de 10^4 cp.

Originalmente el número de hojas varía de 4 a 8 y a veces hasta 10, pero normalmente tiene 6 hojas. Sus dimensiones pueden ser estandarizadas de acuerdo a la referencia dada en (7) y (21).

Tomando como referencia las dimensiones del tanque diseñado, y la relación diámetro impulsor-diámetro tanque (D_i/D_t) ver Fig. 9 Ref. (16), la turbina puede adquirir un valor de 0.2 a 0.4 esto es de un valor de 5.9 cm a 9.83 cm.

Con este rango de diseño y en base al área de contacto -- que tiene la propela marina, se seleccionó un $D_i/D_t = 0.25$, equivalente a un diámetro de impulsor igual a 7.4 cm.

Con este diámetro se obtiene un área total de las hojas de 27.80cm^2 , si bien esta área no es exactamente igual al de la propela marina (27.66cm^2), es un área muy parecida que - permitirá el dimensionamiento de la turbina de disco, manteniendo con poca variación lo planteado en la similitud geométrica.

CONDICIONES DE DISEÑO.

. Obtención de un área libre de contacto semejante a la propela marina.

(NOTA: esta área es la suma del área de cada hoja por sus dos lados 27.66 cm^2)

. Área de contacto de la turbina de disco 27.80 cm^2

Para simplificar los cálculos, se tomará la mitad del área de contacto de las hojas, esto representa una cara de las hojas que componen al impulsor.

El espesor de las hojas (espesor del acero inoxidable), es el mismo para cualquiera de los impulsores.

Este impulsor al igual que el anterior, está construido en acero inoxidable 316.

ESPECIFICACIONES BIBLIOGRAFICAS (10), (16), (18), (21).

Longitud de la hoja	$D_i / 4$	-
Ancho de la hoja	$W = D_i / 5$	-
Diámetro impulsor	D_i	-
Espesor de la hoja	- - -	0.35 cm
Geometría de la hoja	- - -	Rectangular

Ver figura 12

DIMENSIONES DEL IMPULSOR

DATOS:

. Área total del contacto	13.90 cm ²
. Número de hojas del imp.	6
. Área de contacto de cada hoja	$13.9 \div 6 = 2.316 \text{ cm}^2$

Área de una hoja del impulsor, tomando como base que tiene una geometría rectangular.

$$\text{área de la hoja} = y \cdot x$$

Siendo

y = altura de la hoja (ancho)

x = base de la hoja (largo)

Sustituyendo las especificaciones bibliográficas en la ecuación (22).

$$x = Di / 4$$

$$Y = Di / 5$$

$$2.316 = x \cdot y = (Di/4) (Di/5)$$

$$2.316 = Di^2 / 20$$

Despejando Di:

$$Di^2 = 2.136 (20)$$

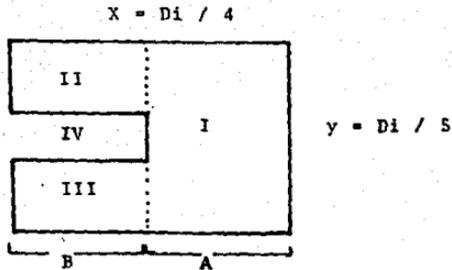
$$Di = 6.80 \text{ cm}$$

Para el cálculo del Di real, hay que tomar en cuenta; el área utilizada en el empalme de las hojas con el cubo central del impulsor, y un diámetro igual a las especificaciones bibliográficas dadas para la longitud y ancho de las hojas. Por lo que es necesario suponer datos de longitud, ancho de hoja y área utilizada para el empalme de estas al cubo y obtener finalmente un área libre de contacto muy semejante al de la propela marina.

Con base a lo anterior, se llegó a un Di = 7.4 cm.

A continuación se desarrolla el cálculo del área de las hojas del impulsor.

Este cálculo se realizó en dos partes, como rectángulo I y como rectángulo II, ver figura 12.



$$X = B + A = Di / 4$$

Fig. 12. Esquema de una hoja del impulsor tipo Rushtom

Rectángulo II = III.

$$y = 1.48 \text{ cm}$$

$$A.B = 1.85 \text{ cm}$$

$$A = 0.9 \text{ cm}$$

$$\text{area de cada hoja} = 2.316 \text{ cm}^2$$

$$C (A . B) = 2.738 \text{ cm}^2 \quad (23)$$

$$2.738 - 2.316 = 0.422 \text{ cm}^2 = \text{Rectángulo IV}$$

$$\text{Area tot. de una hoja} = (A . y) + 2 (B . D) \quad (24)$$

Rectángulo I

$$A . y = 0.90 (1.48) = 1.332 \text{ cm}^2$$

Cálculo para rectángulo II = III

$$2.316 - 1.332 = 0.984 \text{ cm}^2$$

$$0.984 \div 2 = \text{área del rectángulo II = III} \\ = 0.492 \text{ cm}^2$$

$$0.492 = B . D$$

$$B = 0.95 \text{ cm}$$

$$\frac{0.492}{0.950} = D = 0.518 \text{ cm}$$

Sustituyendo valores en la ec.(23)

$$\begin{aligned} &= (0.9) (1.48) + 2(0.95)(0.518) \\ &= 1.332 + 0.984 \\ &= 2.316 \end{aligned}$$

Cálculo del rectángulo IV

$$C - 2D = E \quad (25)$$

$$C = 1.48$$

$$D = 0.518$$

Sustituyendo valores en ec.(25)

$$1.48 - 2(0.518) = 0.444 = E$$

$$E \cdot B = \text{Cuadro IV}$$

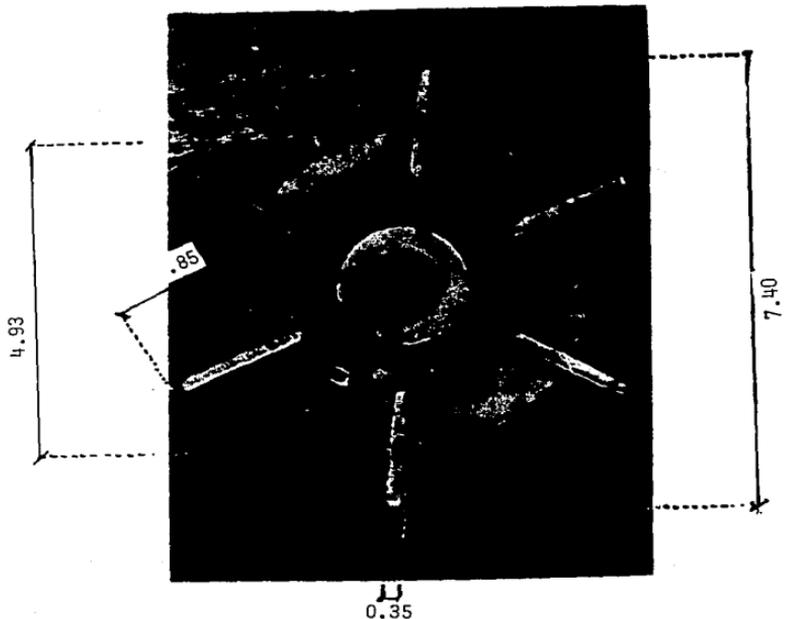
$$0.444 (0.95) = 0.442 \text{ cm}^2$$

Con estas dimensiones y de acuerdo a la Fig. 10 , el impulsor puede ser utilizado para rangos de viscosidad hasta de 200 cp.

El impulsor se construyó en acero inoxidable 316, con espesor de 0.35cm, las hojas se acoplaron a un dado de acero inoxidable con 4.93 cm de diámetro, ver Figura número 13.

Las dimensiones del impulsor son las siguientes.

	NOMENCLATURA	MEDIDA	REFERENCIA
Diámetro tot. impulsor	Di	7 (q ^m)	(10),(18)
Diámetro disco impulsor	2Di/3	4.93	(21)
Ancho hoja impulsor	W=Di/5	1.48	(18),(21)
Longitud de la hoja	Di/4	1.85	(16),(21)
Espesor de la hoja	--	0.35	- -
Area efectiva de contacto	--	27.80	(de ambas caras de las hojas)



0.35

TURBINA RUSHTOM

FIG. NO

13

TESIS 1989 ACOT: cm

CONDICIONES DE DISEÑO DE LA TURBINA DE HOJAS INCLINADAS.

Este tipo de turbina genera flujo en dirección axial, debido a la posición de sus hojas, produciéndose un activo cambio de materia (3).

Su diseño se caracteriza por sus hojas cortas e inclinadas y el bajo intervalo de velocidades al que puede trabajar, que va de 30 a 230 RPM. Velocidades utilizadas para fluidos con alta viscosidad como aceites, colorantes y suspensiones con fibras.

Este tipo de impulsor consta de cuatro hojas planas simétricamente fijadas a un "cubo" manejado por el eje del agitador.

Las hojas montadas sobre el cubo de acero inoxidable, tienen una inclinación de 45 grados con respecto al eje.

Haciendo referencia a la Figura 9, el impulsor puede trabajar en un rango de viscosidad de 1 a 10^5 cp.

La selección del diámetro y dimensiones del impulsor se basaron en los siguientes puntos.

. Obtención de un área de contacto semejante a la propia marina (aproximadamente 27.66 cm^2)

. De la Fig. 8 se seleccionó una relación de diámetros $(D_i/D_m) = 0.29$, que corresponde a un $D_i = 8.6 \text{ cm}$, y un área de contacto de 27.60 cm^2 .

. Con el D_i seleccionado y de acuerdo a la Fig. 9 (16) se pueden trabajar líquidos con viscosidades hasta - - 250 cp, aunque esta estimación referencial esta dada para trabajar sin grandes consumos de potencia.

. De la Fig. 15 Ref. 14, se tomó la relación ancho hoja diámetro impulsor (W / D_i) de 0.14. Aunque existen otras referencias para la relación W / D_i de 0.15 a 0.2 (13), (21), que funcionan de la misma forma.

Al igual que la turbina Rushtom, para simplificar los cálculos se tomará como base, la mitad del área de contacto - que se tiene, y que corresponde a una cara de las hojas.

ESPECIFICACIONES BIBLIOGRAFICAS (Bowen¹⁴)

Longitud de la hoja	Di / 3	
Ancho de la hoja	W = 0.14 Di	
Diámetro del impulsor	Di	
Espesor de la hoja	- -	0.35 cm
Diámetro del cubo	Di / 3	
Geometría de la hoja	- -	Rectangular
Inclinación de la hoja con respecto al eje	- -	45 grados

ver Fig.16

DIMENSIONAMIENTO DEL IMPULSOR

DATOS:

. Área total de contacto	13.8 cm ²
. Número de hojas del impulsor	4
. Área de una hoja	13.8 ÷ 4 = 3.45 cm ²

- Cálculo del área de una hoja del impulsor. De la ec.(22)

X = Longitud de la hoja

Y = Ancho de la hoja

ver Fig. 14

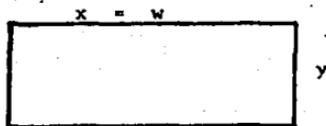


Fig. 14 Proporciones de una hoja de la turbina de hojas inclinadas.

DATOS:

Area de contacto total	13.8 cm ²
Número de hojas	4
Area de una hoja	$13.8 \div 4 = 3.45$ cm ²

De las especificaciones bibliográficas.

$$\begin{aligned}x &= w = Di (0.14) \\y &= Di / 3 \\y \cdot x &= Di / 3 \cdot Di (0.14) \\&= \frac{Di^2 (0.14)}{3}\end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la ec (23).

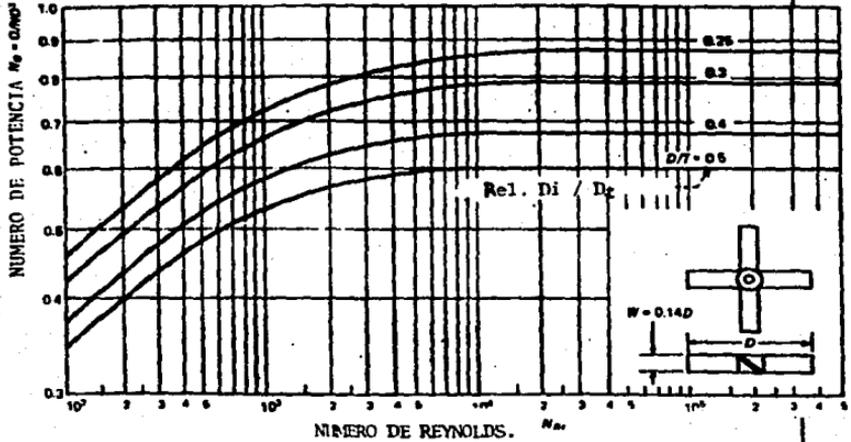
$$\begin{aligned}3.25 \text{ cm}^2 &= \frac{Di^2 (0.14)}{3} \\Di &= \frac{(3.45) (3)}{0.41} \\Di &= 8.60 \text{ cm}\end{aligned}$$

Dimensiones de las hojas

$$\begin{aligned}\text{Longitud de la hoja} &= Di / 3 & (24) \\ \text{Ancho de la hoja} &= Di (0.14) = w & (25)\end{aligned}$$

Sustituyendo valores en las ecuaciones (24) y (25).

$$\text{Longitud de la hoja} = \frac{8.6}{3} = 2.86 \text{ cm}$$



N_Q PARA TURBINA DE HOJAS INCLINADAS A VARIOS REYNOLDS Y RELACIONES D_1/D_2

FIG. N^o 15

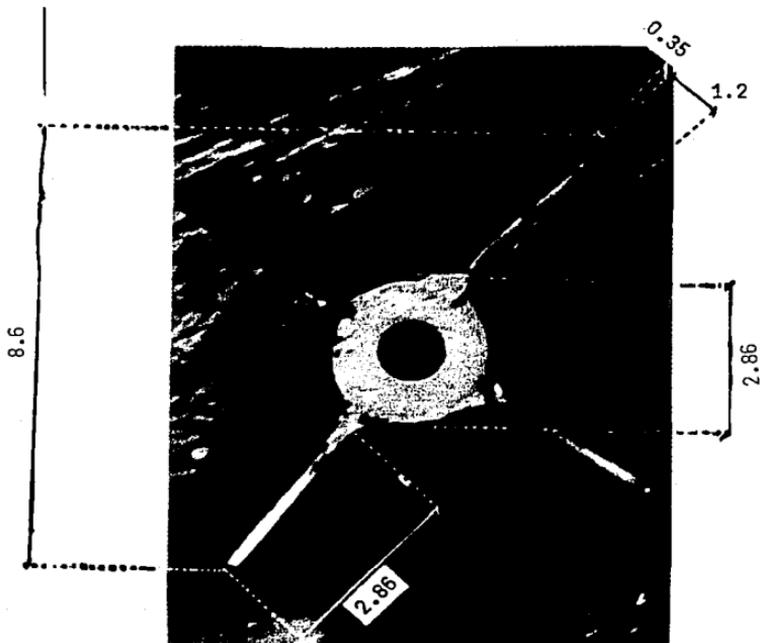
RICHARD L. BOWEN, J.R.(16)

Ancho de la hoja = 8.6 (0.14) = 1.2 cm
Area de la hoja:
y . x = 2.86 (1.21) = 3.45 cm²

La turbina se contruy6 en acero inoxidable con espesor de 0.35 cm, las hojas se montaron a un cubo de acero inoxidable con diámetro externo de 2.86cm.

En base a lo anterior, las dimensiones de la turbina de ho jas inclinadas son las siguientes, ver Fig. 16.

	NOMENCLATURA	MEDIDA (cm)	REFERENCIA
Diámetro impulsor	Di	8.6	14
Diámetro cubo	Di / 3	2.86	14
Ancho hoja impulsor	W = 0.14 Di	1.2	14
Espesor hoja impulsor	- - -	0.35	- -
Longitud hoja impulsor	Di / 3	2.86	- -
Inclinación hoja con respecto al eje del im pulsor	- - -	45°	14
Area libre de contacto	- - -	27.60cm ²	



TURBINA DE HOJAS
INCLINADAS.

FIG. Nº
103

TESIS 1989 ACOT: cm

- Velocidad del impulsor.

Se va a partir de una velocidad mínima de 70 RPM y una máxima de 1725 RPM, estas velocidades corresponden a un motor de 1/2 Hp. de corriente directa.

Estas velocidades se pueden regular mediante un variador de velocidades.

Esta potencia propuesta se aceptará dependiendo de los resultados obtenidos de un análisis con los impulsores anteriormente calculados.

- Potencia requerido.

Para evaluar la potencia requerida por el tanque mezclador, se utilizó la ecuación (26) Ref.(3), con una potencia tentativa de 1/2 hp.

La ecuación (26) calculada experimentalmente por Hicks¹³, se deduce de la ecuación 15.1 del balance de momentum, y ésta permite estimar un diámetro de impulsor inicial, corregido mediante un Reynolds experimental ec. (29) obtenido por efectos de viscosidad Ref. (13).

$$D_i = 394 \left(\frac{H_p}{n S_g N^3} \right)^{1/5} \quad (26)$$

Donde:

Hp: Potencia principal en hp.
n : Número de impulsores
S_g: Gravedad específica del fluido
N : Velocidad del eje RPM

Para calcular el Di de la ec. (26) se utilizaron las - velocidades (N) de trabajo que ofrece el motor de corriente directa (C.D.) de 1/2 hp, una gravedad específica(S_g) de 1.5 y el número de impulsores (n) calculado mediante la ec. 27 Ref. (12).

$$\text{Número de impulsores (n)} = \text{WELH} / D_t \quad (27)$$

Donde:

WELH : Altura del líquido dentro del tanque
D_t : Diámetro del tanque

WELH.- Es la altura alcanzada por el líquido, se calcula mediante el producto de la gravedad específica promedio de la mezcla y la altura de su volumen dentro del tanque.

Por ejemplo; para el presente diseño, si un líquido dentro del tanque ocupa una altura de 29.5 cm, tiene una gravedad específica de mezcla igual a 1.5 y el diámetro del tanque es de 29.5cm, el número de impulsores necesario será - de:

$$\text{WELH} = H_1 \times S_g \quad (28)$$

Donde:

H₁ ; Altura del líquido dentro del tanque = 29.5cm
S_g : 1.5
D_t : 29.5 cm

Sustituyendo valores en las ecuaciones (27) y (28).

$$WELH = 29.5 \times 1.5 = 44.25$$

$$\text{Número de impulsores} = 44.25 : 29.5 = 1.5$$

Se necesitará de 1 a 2 impulsores para este problema, el número de impulsores dependerá de los resultados que se obtengan, pero experimentalmente.

En caso de necesitarse mas de un impulsor, la distancia entre ellos puede ser de 1 a 1.5 veces el diámetro del impulsor REF (5).

Una vez calculado el diámetro del impulsor inicial (D_1), y el número de impulsores, se fija la velocidad de trabajo de acuerdo a una potencia previamente seleccionada (1/2 hp), las viscosidades de trabajo (anteriormente delimitadas), y se calcula el Reynolds corregido REF(13) por efectos de viscosidad, ec(29) Ref (2^b).

$$N_{Re} = 10.7 S_g N D^2 / \mu \quad (29)$$

Donde:

- S_g : Gravedad específica del fluido
- N : Velocidad del impulsor (RPM)
- D : Diámetro del impulsor (in)
- μ : Viscosidad del fluido (cp)

Para evaluar la potencia requerida de trabajo, se despeja Hp de la ec.(26) y se sustituye el diámetro del impulsor inicial por el corregido, este último se obtiene con la ec. (30) REF. (23) y la tabla V.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$D = D_i \times D_f \quad (30)$$

TABLA V : FACTOR DE CORRECCION PARA EL DIAMETRO DE UNA TURBINA DE HOJAS INCLINADAS REF.(23).

N_{Re}	FACTOR	N_{Re}	FACTOR
700	1.0	150	0.93
500	0.99	100	0.91
400	0.98	80	0.90
300	0.97	70	0.89
200	0.95	60	0.88
		50	0.87

A continuación, se desarrolla el cálculo para la potencia requerida por el presente diseño a partir de los diámetros de impulsor ya calculados.

$$H_p = \left(\frac{H_p}{394} \right)^5 n S_g N^3 \quad (31)$$

Si bien las ecuaciones (30) y (31) están dadas para el cálculo de impulsores tipo turbina, las ecuaciones se retoman para la hélice marina, ya que no cuenta con referencias de este tipo.

DATOS :

Rangos de velocidad de manejo (*)

Máxima	1725
Media	828
Mínima	70

(*) Estos rangos son la velocidad media y mínima que da el motor de 1/2 hp.

Rangos de viscosidad

Máxima	1×10^3	cp
Mínima	200	cp

S_g 1.5

Diámetro de impulsores	(cm)	(in)
Turbina Rushtom	7.4	2.91
Turbina de hojas inclinadas	8.6	3.38
Propelz marina	8.6	3.38

TABLA VI. DIAMETRO DE IMPUSLORES TIPO HOJAS INCLINADAS Y PROPELA MARINA CORREGIDO POR EFECTOS DE VISCOSIDAD.

N (RPM)	D_i (in) μ ρ ρ_{agua} (cp)	R_e	C_f	D_i (in) corregido	H_p máx. consumida	
1725	3.38	200	1581.49	1	3.38	0.357
		400	790.94	1	3.38	
		600	527.16	0.99	3.34	
		800	395.37	0.98	3.31	
		1×10^3	216.3	0.95	3.21	
70	3.38	200	64.18	2.88	2.97	1.25×10^{-5}
		400	32.09	--	--	
		600	21.40	--	--	
		800	16.04	--	--	
		1×10^3	12.83	--	--	
828	3.38	200	759.11	1	3.38	0.0395
		400	379.56	0.98	3.31	
		600	253.04	0.96	3.24	
		800	189.78	0.95	3.21	
		1×10^3	151.82	0.93	3.14	

TABLA VII. DIAMETRO DE IMPULSORES TIPO RUSHTOM
CORREGIDO POR EFECTOS DE VISCOSIDAD.

N (RPM)	D_i (in) <u>propues</u>	μ (cp)	R_e	C_f	D_i (in) corregido	H_D máx. consumida.
1725	2.91	200	1172.25	1	2.88	0.17
		400	586.12	0.99	2.85	
		600	390.75	0.98	2.79	
		800	293.06	0.96	2.79	
		1×10^3	234.24	0.95	2.76	
870	2.91	200	47.57	--	--	1.3×10^{-6}
		400	23.78	--	--	
		600	15.85	--	--	
		800	11.89	--	--	
		1×10^3	9.51	--	--	
828	2.91	200	562.68	0.99	2.88	0.0187
		400	281.34	0.97	2.82	
		600	187.56	0.95	2.76	
		800	140.67	0.92	2.67	
		1×10^3	112.54	0.91	2.65	

De las tablas VI y VII se deduce:

- Que la potencia seleccionada de 1/2 Hp permite el manejo de los tres impulsores seleccionados.
- Los diámetros calculados mediante el Reynolds corregido por efectos de viscosidad REF(13), tienen una variación máxima del 9% con respecto a los diámetros seleccionados. Este 9% significa 0.26 cm menos del diámetro originalmente propuesto.
- La disminución del diámetro implica un menor consumo de potencia, por lo que la potencia propuesta de 1/2 hp, cubre las necesidades de trabajo de los tres impulsores seleccionados y manejados a una velocidad máxima de 1725 RPM con un rango de viscosidad de 200 a 1×10^3 cp, y una gravedad específica máxima de 1.5

**CAPITULO VII .- DESARROLLO DE ALTERNATIVAS
DINAMICAS.**

- Velocidad de mezclado.

Esta alternativa se delimitará experimentalmente, ya que dependerá de los siguientes puntos en general:

- . Tipo de sistema geométrico utilizado.
- Utilización de recipientes en forma cilíndrica o cuadrada.
- Tipo de impulsor a utilizar
- Utilización de baffles o sin baffles.
- Tipo de mezcla a manejar.
- . Viscosidad de la mezcla.
- . Densidad de la mezcla.
- Velocidad de manejo del eje
- Tiempo de mezclado.

Sólo esta alternativa no se delimitará en el desarrollo de esta tesis. Permitiendo así el estudio de estas variables y la influencia de cada una de ellas en el sistema.

Spécificación del eje.

El montaje de soporte del agitador está contemplado en forma independiente al tanque. Las condiciones de trabajo del mezclador no hacen necesario el diseño de una tapa que vaya acoplada al eje y lo selle, sólo la presencia de altas temperaturas y presiones, hacen necesaria su presencia RHF(22).

El diseño del sello ocurre después del diseño del eje, debido a la variabilidad de dimensiones que este pueda tener de acuerdo al diseño del mezclador.

El diseño del eje implica, poseer un diámetro suficiente para poder transmitir la carga rotacional necesaria al líquido y la carga suficiente a la mezcla, esto es, transmitir el torque necesario para el manejo del impulsor y generar movimiento al líquido.

La selección comienza una vez que se tienen delimitadas las condiciones de trabajo, como son: la potencia del motor, la velocidad de manejo del eje, el diámetro del impulsor para la generación de movimiento del líquido y la longitud necesaria del eje, dependiendo de las dimensiones del tanque.

El diseño del eje se calcula mediante las siguientes ecuaciones (22).

$$T_{Qm\acute{a}x} = (63025 H_{pi} / N) \quad (32)$$

$$T_{Qmfn} = (19000 H_{pi} L' / N D) \quad (33)$$

$T_{Qm\acute{a}x}$: significa el torque máximo transmitido por el eje al impulsor.

$M_{m\acute{a}x}$: es el momento máximo aplicado al impulsor, implicando la suma del producto de la fuerza hidráulica y la distancia de cada impulsor.

- H_{pi} : Potencia del impulsor (hp)
 N : Velocidad del impulsor (rpm)
 L' : Longitud del eje desde la aplicación de la fuerza hidráulica a la conexión del eje (in)
 D : Diámetro del impulsor. (in)

$$d_s = \left(\frac{.16 \sqrt{(T_{Q_{máx}})^2 + (M_{máx})^2}}{\pi \sigma_s} \right)^{1/3} \quad (34)$$

$$d_t = \left(\frac{.16 (M_{máx} + \sqrt{(T_{Q_{máx}})^2 + (M_{máx})^2})}{\pi \sigma_t} \right)^{1/3} \quad (35)$$

- d_s : Diámetro mínimo del eje para esfuerzo cortante (in)
 d_t : Diámetro mínimo del eje para tensor de esfuerzo (in)
 σ_s : Esfuerzo cortante permisible (psi) 6000*
 σ_t : Tensor de esfuerzo permisible (psi) 10000*
 σ_s, σ_t : Factores de esfuerzo límite para acero inoxidable común (tipos 304 y 316)
 * Valores recomendados para condiciones de trabajo normal.

A continuación se dan los datos para el cálculo del diámetro necesario de eje de acuerdo a las condiciones de diseño que se tienen.

DATOS:

H_p : 1/2 hp

$N_{\text{mín}}$: 70 RPM

$N_{\text{máx}}$: 1725 RPM

D_i : 8.6 cm = 3.38 in (turbina de hojas inclinadas y propela marina)

Σ : Sumatoria para el número de impulsores utilizados, en este caso será igual a 1

L' : Longitud del eje: se va a tomar como el total de la longitud de la relación $H_p - D_t$ 1:1 menos una distancia igual al diámetro del impulsor, que viene siendo de 20.9 cm a 22.1 cm. A esta distancia se le va a dar un margen del 20% para un libre movimiento del líquido al mezclar.
 L' de diseño = 28.2 cm = 11.10 in.

Cálculo de d_s y d_t para la turbina de hojas inclinadas y la propela marina.

PARA 1725 RPM.

$$T_{Q\text{máx}} = \left(\frac{63025 (0.5)}{1725} \right) = 18.27 \text{ in-lb}$$

$$Q_{\text{Máx}} = \left(\frac{19000 (0.5) (11.10)}{1725 (3.38)} \right) = 18.08 \text{ in-lb}$$

$$d_s = \left(\frac{16 \sqrt{(18.27)^2 + (18.08)^2}}{\pi \cdot 6000} \right)^{1/3} = 0.28 \text{ in} \\ = 0.71 \text{ cm}$$

$$d_t = \left(\frac{16 [18.08 + \sqrt{(18.27)^2 + (18.08)^2}]}{\pi \cdot 10000} \right)^{1/3} = 0.28 \text{ in} \\ = 0.71 \text{ cm}$$

PARA 70 RPM

$$T_{Qm\acute{a}x} = \left(\frac{63025 (0.5)}{70} \right) = 450.18 \text{ in-lb}$$

$$M_{m\acute{a}x} = \left(\frac{19000 (0.5) (11.10)}{70 (3.38)} \right) = 445.69 \text{ in-lb}$$

$$d_s = \left(\frac{16 \sqrt{(450.18)^2 + (445.69)^2}}{\pi \cdot 6000} \right)^{1/3} = 0.813 \text{ in}$$
$$= 2.06 \text{ cm}$$

$$d_t = \left(\frac{16 [445.69 + \sqrt{(450.18)^2 + (445.69)^2}]}{\pi \cdot 10000} \right)^{1/3} = 0.82 \text{ in}$$
$$= 2.08 \text{ cm}$$

Cálculo de d_s y d_t para la turbina Rushtom.

PARA 1725 RPM

DATOS:

H_p : 1/2 hp

$N_{m\acute{i}n}$: 70 RPM

$N_{m\acute{a}x}$: 1725 RPM

L' : 11.10 in = 28.2 cm

D : 2.91 in = 7.4 cm

$$T_{Qm\acute{a}x} = \left(\frac{63025 (0.5)}{1725} \right) = 18.27 \text{ in-lb}$$

$$Q_{\text{máx}} = \left(\frac{19000 (0.5) (11.10)}{1725 (2.91)} \right) = 21.00 \text{ in-lb}$$

$$d_s = \left(\frac{16 \sqrt{(18.27)^2 + (21.0)^2}}{11 \quad 6000} \right)^{1/3} = 0.287 \text{ in} = 0.73 \text{ cm}$$

$$d_t = \left(\frac{16 \left[21.0 + \sqrt{(18.27)^2 + (21.00)^2} \right]}{11 \quad 10000} \right)^{1/3} = 0.29 \text{ in} \\ = 0.74 \text{ cm}$$

PARA 70 RPM

$$T_{Q\text{máx}} = \left(\frac{63025 (0.5)}{70} \right) = 450.18 \text{ in-lb}$$

$$M_{\text{máx}} = \left(\frac{19000 (0.5) (11.10)}{70 (2.91)} \right) = 517.67 \text{ in-lb}$$

$$d_s = \left(\frac{16 \sqrt{(450.18)^2 + (517.67)^2}}{11 \quad 6000} \right)^{1/3} = 0.813 \text{ in} \\ = 2.06 \text{ cm}$$

$$d_t = \left(\frac{16 \left[517.67 + \sqrt{(450.18)^2 + (517.67)^2} \right]}{11 \quad 10 \quad 000} \right)^{1/3} \\ = 0.85 \text{ in} \\ = 2.16 \text{ cm}$$

Como se puede apreciar, los datos tanto para la turbina de hojas inclinadas como para la propela marina son los mismos. En cuanto a la turbina Rushtom, la máxima variación en el diámetro necesario del eje con respecto al diámetro necesario para los otros dos impulsores es del 4%, variación que se puede despreciar, ya que el diseño tiene una longitud 20% mayor a la necesaria para

el manejo de cualquier de los tres impulsores.

En base a lo anterior, las dimensiones del eje son:

- | | |
|----------------------------|---------|
| - Diámetro externo del eje | 2.2 cm |
| - Longitud del eje | 28.9 cm |
| - Potencia manejada | 0.5 Hp. |

**CAPITULO VIII.- ESPECIFICACIONES DE
MONTAJE DEL EQUIPO**

ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA ELECTRICO.

Ya que las necesidades de trabajo de los tres impulsores se cubren con un motor de 1/2 hp ; se seleccionó un motor de corriente directa (C.D.) de 1/2 hp, manejado mediante un variador electrónico de velocidades con escala de 0 a 100, alcanza una velocidad mínima de 70 RPM y una velocidad máxima de 1725 RPM.

Las especificaciones en la coraza del motor son las siguientes.

MOTOR	Indiana General
MODELO	45405352543 - 01
POTENCIA	1/2 HP
T° DE TRABAJO	DE T° AMBIENTE HASTA 40°C
INS	F
RPM	1725 MAX.
ARM V.	90
FLD V.	P.M.

Y las especificaciones del variador son las siguientes.

MODELO	DY - M2
SERIE No.	D - 941
No. SIC-DGE	6533
ENTRADA (C.A)	SALIDA (C.D)
VOLT	127 ARMADURA
AMP. MAX 6.5	AMP 5.35
C.P.S. 60	CAMPO
EN C.F.(HP)1/2	AMP

Las revoluciones por minuto generados por el motor y reguladas por el variador de velocidades son las siguientes :

ESCALA REGULADA POR EL VARIADOR	RPM GENERADAS POR EL MOTOR
5	--
10	70
15	200
20	310
25	414
30	510
35	620
40	700
45	840
50	900
55	1000
60	1050
65	1150
70	1300
75	1350
80	1500
90	1600
95	1650
100	1725

MONTAJE DEL EQUIPO

El sistema mezclador y eléctrico, se montó sobre una tarima. Esta con base de madera y estructura en acero al carbón, posee unas dimensiones de 1.47m ancho x 2.0m largo y 0.6m de altura.

Para evitar movimientos del tanque durante el mezclado, el tanque se ancló a la tarima mediante un soporte con base cilíndrica que ajusta la parte inferior del tanque; el soporte - construido en acero al carbón de 2 pulgadas, posee una altura de la tarima a la base del tanque de 0.13 cm.

El motor instalado en forma independiente al tanque; mezclador, se montó a un eje vertical con tornillos, la movilidad del motor en dirección vertical y horizontal con respecto al tanque. Así, se podrá regular la distancia del impulsor al fondo del tanque.

La tarima dividida a lo ancho por medio de un marco metálico, permitió la instalación del variador de velocidades, en interruptor de corriente y parte de la conexión eléctrica entre el interruptor de corriente y parte de la conexión eléctrica - entre el interruptor y el motor, Fig. 17.

SISTEMA DE DESAGÜE.

El sistema de mezclado posee una instalación de desagüe en acero inoxidable de 1/2 pulgadas.

Esta, conectada al fondo del tanque, posee una doble salida, una para la recuperación de líquidos y la otra para la lim-

pieza del sistema.

_Cada una de las salidas, posee una válvula de paso y -
accesorios tipo unión en acero inoxidable, que permiten el des
montaje de la tubería.

La salida de líquidos para recuperación, va unida a la -
parte inferior de la tarima, y desemboca en dirección opuesta
a la tubería de desagüe, ésta última al piso y con desemboque
al drenaje. Fig. 18.

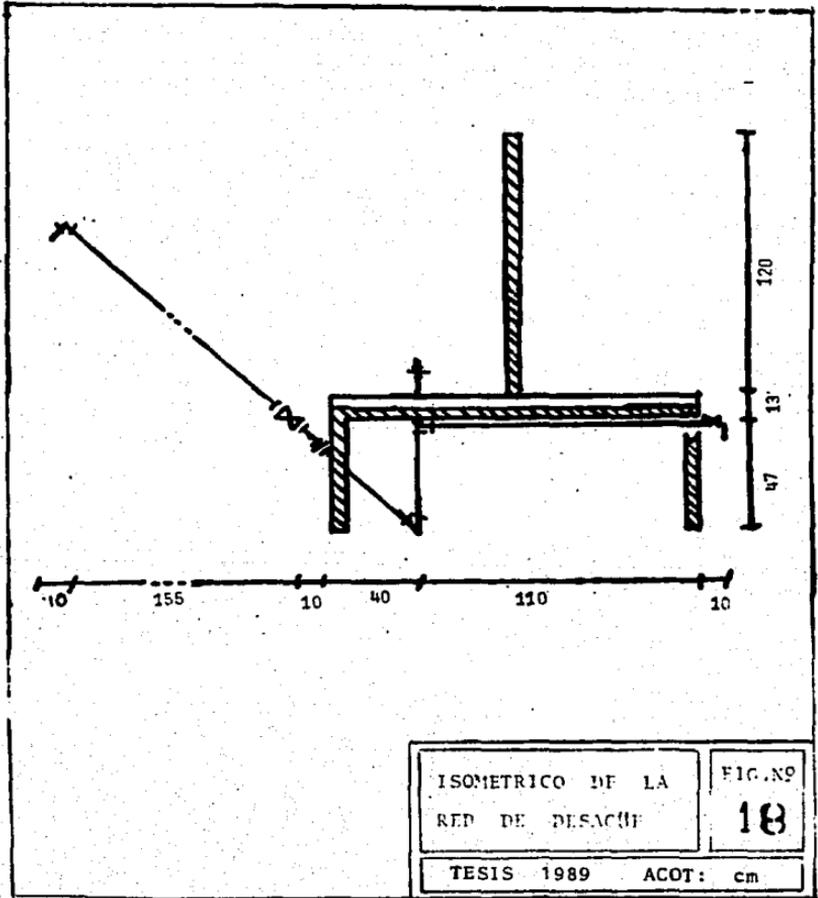


EQUIPO MEZCLADOR
Y ELECTRICO

FIG. Nº

17

TESIS 1989 ACOT: 2/A



CAPITULO IX.- CONCLUSIONES.

C O N C L U S I O N E S .

A través del presente trabajo se ratifica la utilidad de uso del número de Reynolds y el número de Potencia para delimitar los criterios de similitud de tipo geométrico, cinemático y dinámico en el diseño de mezcladores.

Los elementos que constituyen los criterios de similitud fueron:

GEOMETRICOS: . Geometría del tanque
. Volumen a manejar
. Dimensiones del tanque
. dimensiones de los baffles.

CINEMATICAS: . Tipo de impulsores
. Viscosidad
. Densidad
. Velocidad volumétrica
. Potencia requerida.

DINAMICAS: . Especificación del eje
. Velocidad de manejo

La conformación estructural del equipo puede ser especificada de la siguiente forma:

ELEMENTOS GEOMETRICOS

ELEMENTO	RELACION
Relación diámetro tanque- altura líquido	1 : 1
Número de baffles	8

DIMENSIONES DE LAS PARTES

ESPECIFICACION	DIMENSIONES
Relación diámetro de tanque - altura del líquido	29.5 - 49 cm
Ancho de baffle	$1/10 D_t = 2.95$ cm
Altura de baffle	44.5 cm
Material utilizado en la construcción del tanque y los baffles	Acrílico transparente
Espesor de baffle	0.6 cm

DIMENSION DE IMPULSORES

TIPO DE TURBINA	ESPECIFICACION	DIMENSIONES
TURBINA RUSHTOM	Diametro externo	7.4 cm
	Area total de contacto	27.80 cm ²
	Número de hojas	6
	Longitud de hoja	1.85 cm
	Ancho de la hoja	1.48 cm

TIPO DE TURBINA	ESPECIFICACION	DIMENSIONES
HELICE MARINA	Diametro externo	8.6 cm
	Area tot.de contacto	27.66 cm
	Número de hojas	3
	Longitud de hoja	2.00 cm
	Ancho de hoja	2.60 cm

TIPO DE IMPULSOR	ESPECIFICACION	DIMENSIONES
TURBINA DE HOJAS INCLINADAS	Diámetro externo	8.6 cm
	Área tot. de cont.	27.60 cm
	Número de hojas	4
	Longitud de hoja	2.86 cm
	Ancho de la hoja	1.20 cm

DIMENSIONES DEL EJE

SELECCION	ESPECIFICACION	DIMENSIONES
E J E	Diámetro externo	2.2 cm
	Longitud del eje	28.19 cm
	Potencia manejada para el eje	0.5 hp

CARACTERISTICAS DE TRABAJO DEL EQUIPO

E S P E C I F I C A C I O N	CRITERIOS DE TRABAJO
Volúmen equivalente máximo	20 litros
Viscosidad de trabajo máxima	1×10^3 cp
Densidad relativa máxima	1.5
Temperatura de trabajo (rango)	15.0 - 60.0°C
Potencia del motor	0.5 hp
Velocidad de manejo del eje	75 - 1725 RPM

Estas características de trabajo, garantizan el uso del equipo modelo a nivel laboratorio y planta piloto para mezclas en una fase, Fig.15.

Algunos ejemplos de uso de este equipo son: emulsiones de sopas, alimentos líquidos, dispersión de polvos finos en agua, mezclas de colorantes, gomas y otros productos que presenten condiciones semejantes a las aquí propuestas.

Este modelo, también permite estudiar los principios de trabajo de esta operación unitaria, permitiendo a los alumnos la caracterización reológica de mezclas que reúnan las características de manejo para ser usadas en este equipo.

También mediante la utilización de gráficas de Número de Potencia v.s. Número de Reynolds, se podrá hacer un escalamiento del equipo, optimizando el estudio del equipo combinando velocidades de trabajo, altura de impulsor, fondo de tanque, tipo de impulsor, viscosidad del fluido, uniformidad de mezcla, y tiempo de mezclado entre otros.

Estas sugerencias permitirán a los alumnos de Ingeniería, seleccionar y dimensionar equipos de esta índole utilizados en las múltiples necesidades de la industria química y alimentaria.

A P P E N D I C E .

VISCOSIDAD DE ALIMENTOS LIQUIDOS,

PRODUCTO	COMPOSICION	TEMP. (°C)	VISCOSIDAD (Pa . s)
Crema	10% grasa	40	0,00148
"	"	60	0.001.7
"	"	80	0,00083
"	20% grasa	60	0,00171
"	30% grasa	60	0,00289
"	40% grasa	60	0,00510
Leche homogeneizada	- -	20	0,002
"	- -	40	0,0015
"	- -	60	0.00075
Leche cruda	- -	80	0,0006
"	- -	0	0.00344
"	- -	10	0.00199
"	- -	30	0.00149
"	- -	40	0.00123
Aceite de maiz	- -	25	0,0565
"	- -	38	0,0317
Aceite semilla algod6n	- -	20	0,0704
"	- -	38	0,0306
Aceite cacahuate	- -	25	0,0656
"	- -	38	0,0251
Aceite vegetal cartamo	- -	25	0,0522
"	- -	38	0,0286
Aceite de soya	- -	40	0.04
Miel, Buckweat	18.6% T.S.	24.8	3.86
Jugo manzana	20°Bx.	27	0.0021
"	60°Bx.	27	0.03
Jug6 de uva	20°Bx.	27	0.0025
"	60°Bx	27	0.11

PRODUCTO	COMPOSICION	TEMP. (°C.)	VISCOSIDAD (pa.s)
----------	-------------	----------------	----------------------

Sopa de maiz	48.4%T.S.	27	0.53
--------------	-----------	----	------

REFERENCIA (6)

Miel	NORMAL	24	5.6
Accite de soya	NORMAL	30	0.04
Leche entera	- -	20	0.0212
Leche desnatada	- -	25	0.0014
Crema	20%grasa	3	0.0062
"	30%grasa	3	0.0138
Jugo de manzana	20°Bx.	27	0.0021
"	60°Bx.	27	0.03
Jugo de uva	20°Bx.	27	0.0025
"	60°Bx.	27	0.11
Tomate concentrado	5.8%T.S.	32	0.223
"	30 %T.S.	32	18.7
Tomate puré	DESCONOCIDA	DESCONOCIDA	0.92
Sopa elote	48.4%T.S.	27	0.053
Puré de chavacano	17.7%T.S.	21	5.4
"	19.0%T.S.	25	20.0
"	13.8%T.S.	27	7.2
Chavacano concentrado	26%T.S.	25	67.0
Salsa de manzana	DESCONOCIDO	24	0.66
"	11.6%T.S.	27	12.7
"	DESCONOCIDA	24	0.5
"	DESCONOCIDA	DESCONOCIDA	5.36
Puré de pera	14.6%T.S.	27	5.3
"	15.2%T.S.	27	4.25

REFERENCIA (5)

B-I-B-L-I-O-G-R-A-F-I-A .

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- BIRD, R, Byron. Fundamentos de Transporte. Un estudio sistemático de los fundamentos del transporte de materia, energía y cantidad de movimientos."Tr" Prof. Dr. Fidel Mato Vazquez.España,Ed. --- Reverté, 1982.
- 2.- BRENNAN, J.G.,et.al:Food Engineering Operations. 2a. edition,England, - Ed. Applied Science Publishier, 1979.
- 3.- RAYMOND, E.Kirk, et.al;Enciclopedia de Tecnología Química. V.10, México Ed. UTEHA, 1962.
- 4.- GENAKOPLIS,J.Christie. Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias."Tr" Ing. Quim. Antonio Eroles Gómez. Ph.D.,México, Ed.Continental, 1982(c1982).
- 5.- HELDMAN, Denis R. Food Process Engineering,2a. edition,USA,Ed.AVI 1981.
- 6.- HELDMAN, Denis R.and Sing,Paul R. Introduction to Food Engineering. Food science and technology a series of monographs, USA,; Ed. Academic Press Inc., 1984.
- 7.- HOLLAND, F.A.and Chapman F.S. Liquid Mixing and Procesing in Stirred Tanks New York, Ed. Reinhold, 1966.
- 8.- JOSLYN, Maynard A. Methods in food analysis.Phisical,chemical and instrumental methods of analysis,2a. edition,New York Academic Press, 1977(c1970).
- 9.- LUDWING, Ernest E. et.al.: Applied process design for chemical and petro-chemical plants. V.3., USA, Ed. Gulf Publishing Co., 1964.
- 10.- MANTELL, Charles L. Engineering Materials Handbook. 1a. edition, New York, Ed. Mc.-Graw Hill Company 1958(c1985).
- 11.- MC. CABE, Warren L. y Smith, Julian C. Unit Operations of chemical engineering. 3a. edition, USA, Mc.graw hill Company, 1979.
- 12.- MULLER, H.G.:Introducción a la reología de los alimentos. 1a. edición, Zaragoza España, Ed. Acribia, 1977.
- 13.- PERRY, H. Robert, Manual del ingeniero químico, Vol II, 2a. edición en español, México, Ed. Mc.Graw Hill, 1983.
- 14.- TREYBAL, Roberth,E. Operaciones de transferencia de masa, 2a. edición, México, Ed. Mc.Graw Hill, 1984.

- 15.- BOWEN, Richard L. Jr., Chem. Eng., March 18, 1975, p.159.
- 16.- BOWEN, Richard L.Jr., Chem. Eng., June 9, 1986, p.55.
- 17.- CHUDACEK, Michael W., Chem.Eng., October 1, 1984, p. 79.
- 18.- DICKEY, David S. and Fenic, John C., Chem.Eng., January 1976, p. 139.
- 19.- FOSANO, F.B. and Eberhart,T.M., Chem. Eng., May 5, 1980 p.115.
- 20.- GARRISON, Charles M. Chem. Eng., February 7, 1983, p.63.
- 21.- CATES, Lewis E. and Henley, Terry L., Chem.Eng., December 8, 1975, p.110.
- 22.- HICKS, Richard W., Morton, J.R. and Fenic, J.G., Chem. Eng., April 26, 1976, p.102.
- 23.- HOLLAND, Antony F., Chem. Eng., September 17, 1962, p.179.
- 24.- QUILLEN, Charles S., Chem Eng., June 1954, p.178.
- 25.- RAMSEY, Wayne D. and Zoller, Gerald C., Chem. Eng., August 30, 1976, p.101.
- 26.- REYBOLD, W. , Chem. Eng., March 24, 1958, p. 152.