



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS
DE UN MODELO EXPERIMENTAL
PARA EL ESTUDIO DE CHORROS
CON GIRO EN CAÍDA LIBRE**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA

PRESENTA

ING. ALBERTO AQUINO BALTAZAR

TUTOR: DR. FRANCISCO J. SOLORIO ORDAZ

MEXICO D.F.

ABRIL DE 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

DEDICATORIAS

Y

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Constantina y Filiberto que me han enseñado a ser un hombre de principios, para ellos mi amor y agradecimiento eterno.

A mi esposa Rocío Adaneli Rivera Díaz, quien con su amor llena mi vida de sueños y realidades, para ella mi corazón.

A mis hermanos Esperanza, Gustavo, Filiberto y Rogelio, que me han apoyado e impulsado en todo momento, gracias por compartir sus vidas conmigo.

Gracias a dios y a la vida por darme la oportunidad de compartir este tiempo y espacio.

Para el Dr. Francisco Solorio mi más sincero agradecimiento por su apoyo incondicional y asesoramiento para la culminación de la presente tesis.

Un reconocimiento muy especial al Sr. Daniel y al Sr. Fernando por su ayuda durante la construcción del modelo experimental.

A mis profesores por compartir su conocimiento y sabiduría, Gracias;

*Mi reconocimiento al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por su apoyo económico brindado durante la presente investigación.*

*A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y a su **Programa de Posgrado** por darme la oportunidad de desarrollar un trabajo de tal magnitud.*

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS

DE UN MODELO EXPERIMENTAL

PARA EL ESTUDIO DE CHORROS CON GIRO EN CAIDA LIBRE

2006

INDICE GENERAL

Resumen.....	I
Nomenclatura.....	II
Lista de figuras.....	III
Lista de tablas.....	IV
Lista de fotos.....	V

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1	Motivación del Estudio.....	2
1.2	Objetivo y Alcances.....	4
1.3	Contenido de la tesis.....	5

CAPITULO II

GENERALIDADES

2.1	Antecedentes.....	8
	2.1.1 Regímenes de Rompimiento.....	10
	2.1.2 Curva de rompimiento.....	15
	2.1.3 Factores de influencia en la desintegración del líquido.....	18
2.2	Características de Chorros con Giro.....	19
	2.2.1 Generación del Giro.....	20
	2.2.2 Número de Giro.....	21

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1	Introducción.....	23
3.2	Modelo Experimental.....	25
	3.2.1 Elementos del Modelo Físico.....	25
	3.2.1.1 Arreglo del Modelo Experimental.....	31
	3.2.2 Sistema de Medición y Lectura de Datos.....	34
	3.2.3 Sistema de Visualización.....	36
	3.2.3.1 Metodología para la Visualización.....	38
3.4	Cálculo del Numero de Giro.....	41

CAPITULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1	Mediciones.....	46
4.2	Resultados.....	49
4.3	Configuración de chorros con giro en caída libre.....	54
4.4	Fotos del tipo de configuración.....	56
	Configuración tipo I.....	56
	Configuración tipo II.....	57
	Configuración tipo III.....	58
	Configuración tipo IV.....	59
	Configuración tipo V.....	60
	Configuración tipo VI.....	61
	Configuración tipo VII.....	62
4.5	Discusión de resultados.....	63
	Conclusiones.....	66
	Apéndice	68
	Referencias.....	71
	Notas Adicionales.....	75

I. RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño y construcción de un modelo experimental que permita generar chorros de agua con giro en caída libre. Para esto se usó una cámara cilíndrica colocada a cierta altura sobre el nivel de piso, que contiene agua hasta un cierto nivel, que se hace girar mediante un agitador, que se encuentra acoplado a un motor eléctrico. El agua sale a través de una boquilla por gravedad formando un chorro con giro que cae a un segundo depósito colocado justo debajo de la boquilla. Posteriormente una bomba succiona el agua del depósito y la descarga en la cámara cilíndrica. De esta forma, el modelo se retroalimenta. Se usaron tres diferentes niveles de carga y la velocidad de giro del fluido en caída libre se controló por medio de un reóstato a través de un motor eléctrico que mueve al agitador.

Para las distintas pruebas realizadas se llevaron a cabo video-grabaciones y se midieron la velocidad angular del agitador y el gasto másico a la salida del orificio de la boquilla. Para los diferentes niveles de carga se obtienen chorros con giro con patrones de flujo distintos. Además, la influencia del número de giro sobre la configuración del chorro queda de manifiesto al identificarse tres tipos de chorros: helicoidal, cónico y tipo burbuja.

II. NOMENCLATURA

SIMBOLO	UNIDAD	UNIDADES
$I = V/F$	Corriente	[Ampers]
ρ	Densidad	Kg/m^3
d_0	Diámetro del Orificio	m
U'	Fluctuaciones de Velocidad	m/s
G_ϕ	Flujo de cantidad de movimiento angular	[Adimensional]
G_x	Flujo de cantidad de movimiento lineal	[Adimensional]
\dot{m}	Gasto Másico	Kg/s
L_R	Longitud de rompimiento	m
$S = \frac{G_\theta}{G_x R}$	Número de Giro	[Adimensional]
$Z = \frac{We^{1/2}}{Re}$	Numero de Ohnesorge o Numero "Z"	[Adimensional]
$Re = \frac{\rho d U}{\mu}$	Número de Reynolds	[Adimensional]

$We = \frac{\rho d U^2}{\sigma}$	Numero de Weber	[Adimensional]
R	Radio del Cilindro o Cámara de Giro	m
$F = V/I$	Resistencia	[Ohms]
σ	Tensión Superficial	N/m
w	Velocidad Angular	Rad/s
U_{ca}	Velocidad Axial de la cámara	m/s
U_C	Velocidad Critica	m/s
U_{ch}	Velocidad del Chorro	m/s
U_m	Velocidad Media del Chorro	m/s
μ	Viscosidad Absoluta o Dinámica	[Centipoises]
ν	Viscosidad Cinemática	[Centistokes]
$V = FI$	Voltaje	[Volts]

III. LISTA DE FIGURAS

FIGURA No.	DESCRIPCION	PAGINA
2.1	Representación idealizada de un chorro líquido sujeto a un disturbio circunferencial y simétrico	10
2.2	Carta de Ohnesorge. Clasificación de los modos de rompimiento. Rompimiento del chorro como función del número de Reynolds y las propiedades del líquido	12
2.3	Curva de rompimiento-empírica: Longitud de rompimiento (L_r) como una función de la velocidad media del chorro (U_j)	16
3.1	Modelo experimental	28
3.2	Transductor óptico. Principio de funcionamiento	35
3.3	Sistema de visualización	37
3.4	Arreglo experimental	39

IV. LISTA DE TABLAS

TABLA No.	DESCRIPCION	PAGINA
3.1	Características Del Modelo Experimental	26
4.1	Tabla De Datos (Nivel Mínimo)	47
4.2	Tabla De Datos (Nivel Medio)	48
4.3	Tabla De Datos (Nivel Máximo)	48
4.4	Resultados Nivel Mínimo	51
4.5	Resultados Nivel Medio	52
4.6	Resultados Nivel Máximo	53

V. LISTA DE FOTOS

FOTO No.	DESCRIPCION	PAGINA
3.1	Cámara de giro	29
3.2	Elementos del modelo experimental	30
3.3	Modelo experimental	33
3.4	Arreglo del modelo experimental	40
4.1	Configuración tipo I	56
4.2	Configuración tipo II	57
4.3	Configuración tipo III	58
4.4	Configuración tipo IV	59
4.5	Configuración tipo V	60
4.6	Configuración tipo VI	61
4.7	Configuración tipo VII	62

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

OBJETIVO Y ALCANCES

CONTENIDO DE LA TESIS

1.1 MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO

Los chorros son flujos muy estudiados en mecánica de fluidos. Por su naturaleza tienen una gran importancia en aplicaciones industriales y son de gran interés académico. La manera en que este tipo de flujo se desarrolla y se comporta a la salida del orificio o boquilla, formando un patrón de flujo característico, ha llevado a que haya un mayor interés en su estudio y comprensión.

Es básicamente en equipos de proceso, tales como calderas, hornos, calentadores de aire, secadores, etc., donde se requiere analizar los dispositivos que generan un flujo de este tipo. Es decir, para el quemado de combustibles líquidos se diseñaron los llamados quemadores, los cuales, atomizan el combustible en pequeñas gotas por medio de una boquilla u orificio de salida. La forma en que estos dispositivos funcionan y generan un patrón de flujo característico, ya sea con o sin giro, está muy relacionada con la eficiencia en la combustión de los equipos de proceso mencionados.

El mayor consumo de energía a nivel industrial gravita alrededor de los hidrocarburos. De esta forma los combustibles líquidos fósiles se han convertido, desde el descubrimiento de sus propiedades, en una de las fuentes de energía más rentables a nivel mundial. En particular, es en los procesos de generación de energía a base de combustión donde los combustibles líquidos juegan un papel importante, sin dejar de mencionar otros procesos como el secado de productos en diversas áreas de la industria alimenticia, cementera, etc.

La necesidad de optimizar y aprovechar al máximo el contenido energético de los combustibles líquidos durante su quemado, ha llevado a profundizar en el tema de chorros líquidos con giro, donde este último efecto se introduce para facilitar la desintegración del chorro.

Dentro de la literatura, encontraremos que la mayor parte de los estudios sobre chorros se han referido a su dinámica, o bien, a la geometría de la boquilla. Por ejemplo, en algunos casos, el empleo de algún tipo de boquilla hace posible manejar grandes flujos de combustible a presiones relativamente bajas, lo cual permite que se produzcan gotas de diámetro medio de alrededor de 100 μm , lo cual es bastante aceptable en el quemado de combustibles líquidos.

Los chorros con giro son naturalmente inestables y llegan a romperse en pequeñas gotas. Se sabe que su patrón de flujo característico al momento de desintegrarse está fuertemente relacionado con la velocidad (Número de Reynolds) y el Número de Giro a la que sale del orificio o boquilla, la cual podremos comprobar en el modelo experimental.

Los chorros líquidos con giro, para su análisis, se dividen en verticales y horizontales, debido a las características particulares que presentan cada uno de ellos. Sin embargo, muy poco se ha hecho con respecto a chorros con giro en caída libre. Por esta razón el diseño y construcción de un equipo que generara chorros con giro en caída libre fue uno de los retos de este estudio. De nuestro modelo experimental se lograron obtener patrones de flujo bajo diversas condiciones de operación. Dichos patrones de flujo son analizados en detalle y reportados en el presente trabajo por medio de tablas, cálculos de Números de giro y Números de Reynolds, así como de imágenes fotográficas para su comprensión y entendimiento.

1.2 OBJETIVO Y ALCANCES

El objetivo del presente trabajo es comprender en que forma las condiciones de operación - nivel de carga, velocidad de giro- llegan a influir en el chorro mismo.

Los aspectos fundamentales que rigen un chorro con giro en caída libre, así como sus características de desintegración en pequeñas gotas, son fenómenos de particular interés. El aspecto y características de flujos con giro en caída libre son problemas a los que pocos le han dedicado el tiempo suficiente. Su estudio a nivel experimental ha sido complicado, tanto por su análisis y medición, como por la forma de generar los chorros con giro. Nuestro modelo experimental pudo representar y generar chorros a diferentes niveles de carga de operación, así como varias velocidades de giro del chorro a la salida del orificio.

La finalidad básica de realizar un estudio de este tipo es lograr una comprensión elemental del flujo o chorro con giro en caída libre, formado a partir de bajas velocidades de giro hasta velocidades relativamente moderadas, sin llegar a alcanzar las grandes velocidades de los chorros en quemadores. Para la realización del estudio se vio la necesidad de construir un modelo físico para producir el chorro en caída libre a diferente rapidez de giro y gastos de salida. Cabe mencionar que el régimen de flujo bajo estudio se encuentra entre el régimen de goteo y el régimen de atomización de un flujo. Se espera que este trabajo de investigación logre un aporte significativo al estudio de chorros con giro y a sus aplicaciones.

1.3 CONTENIDO DE LA TESIS

El presente trabajo de tesis se encuentra dividido en cinco capítulos, desglosados de la siguiente manera:

El primer capítulo contiene, como ya se vio una introducción acerca del tema en cuestión. Además, se incluyen los objetivos generales de la investigación y su alcance, así como las razones que motivaron la realización de la presente investigación.

El capítulo segundo, reporta los trabajos previos reportados por algunos investigadores, relativos a los aspectos generales de chorros. Se mencionan las características generales de los chorros, así como su clasificación y las teorías de régimen de rompimiento. Las características de los chorros con giro y su clasificación se mencionan en la última parte del capítulo.

El tercer capítulo se encarga de describir el modelo experimental con todas sus características. Incluye de manera substancial los instrumentos utilizados para la medición y lectura de datos; así como los elementos que ayudaron para el control del sistema durante su operación. Al final del capítulo, se menciona el método de visualización y de grabación de imágenes empleado.

En un cuarto capítulo, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las pruebas experimentales realizadas. Los resultados son reportados por medio de tablas y gráficas.

*Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre*

Cada prueba experimental fue video-grabada y las imágenes son presentadas por medio de fotos.

La última parte, presenta las conclusiones de la investigación y sus posibles alcances.

CAPÍTULO II

GENERALIDADES

REGÍMENES DE ROMPIMIENTO

CURVA DE ROMPIMIENTO

FACTORES DE INFLUENCIA EN LA DESINTEGRACIÓN DEL LÍQUIDO

CARACTERÍSTICAS DE CHORROS CON GIRO

GENERACION DEL GIRO

NÚMERO DE GIRO

2.1 ANTECEDENTES

La descripción de la formación de chorros con giro en caída libre es un tema complejo. Debido a su diversidad de aplicaciones, los chorros han conseguido atraer el interés de numerosos investigadores para su estudio. El presente capítulo menciona los antecedentes, conceptos básicos y clasificación de los chorros, así como sus características más importantes.

El creciente interés en los chorros líquidos ha traído consigo un estudio acelerado de su formación, dinámica y comportamiento. Por supuesto, debe entenderse que cuando un chorro líquido es descargado las perturbaciones sobre su superficie aumentaran, debido a las interacciones aerodinámicas entre el chorro y el medio que lo rodea; creciendo de tal manera que las perturbaciones causaran que la columna de líquido se desintegre en pequeñas gotas casi inmediatamente después de la descarga [Lefebvre (1989)].

Un chorro líquido es inestable por naturaleza y se fragmenta en pequeñas gotas. El patrón de formación de un chorro está fuertemente relacionado con las características particulares del flujo, como son viscosidad, tensión superficial y velocidad de salida del chorro líquido hacia el medio ambiente [Blaisot (2003)].

La formación de chorros líquidos y su estudio se remonta al siglo XIX. Fue durante esta época donde comenzó su desarrollo potencial, encontrando en Helmholtz, Kelvin, Rayleigh y Reynolds a sus mayores representantes [Marshall (1967)].

El primer análisis matemático que predijo las condiciones necesarias que causan el colapso de un chorro líquido emitido a bajas velocidades fue Lord Rayleigh (1878); quien suponiendo un flujo irrotacional de un chorro no viscoso, dedujo que las pequeñas perturbaciones simétricas cerca del eje longitudinal del chorro (ver fig. 2.1) causan el rompimiento cuando la amplitud de perturbaciones crecen la mitad del diámetro del chorro líquido no perturbado. Tyler (1925) confirmó sus predicciones matemáticas por medio de la medición de la frecuencia de formación de gotas de un chorro al desintegrarse y relacionando éste con la longitud de onda de la perturbación. Sin embargo, la teoría de Rayleigh (1878) no predijo la formación de pequeñas gotas satélites y fue McDonald (1954) quien mostró la predicción teórica de estos satélites.

Probablemente el primero en documentar una investigación acerca del rompimiento de un chorro fue Plateau en 1873. Aunque, fue Weber (1931) quien realizó un análisis matemático general a través del desarrollo de la ecuación diferencial para el rompimiento de un chorro cuando las fuerzas inerciales y viscosas ofrecen una resistencia significativa. El análisis de Weber fue comprobado experimentalmente por Haenlein en 1931 al estudiar las longitudes de rompimiento de chorros a distintas viscosidades y tensiones superficiales. Haenlein (1931) mostró los distintos regimenes de rompimiento que ocurren, la formación de gotas sin la influencia de aire, la formación de gotas con la influencia de aire, la formación de ondas debido a la fricción del aire y la completa desintegración del chorro.

Los trabajos de Rayleigh (1861) fueron continuados por Chandrashekar en 1961, quien propuso una teoría para el rompimiento de chorros líquidos viscosos en vacío.

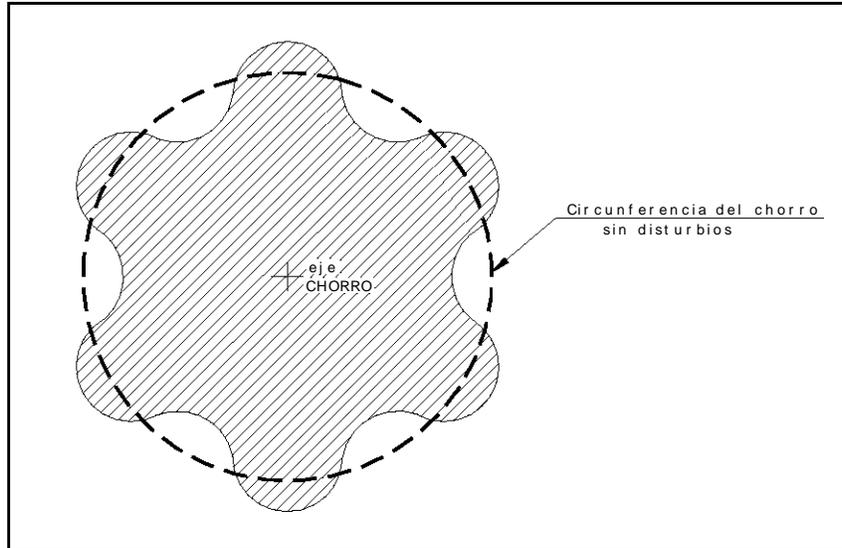


figura 2.1 Representación idealizada de un chorro líquido sujeto a un disturbio circunferencial y simétrico.

2.1.1 REGIMENES DE ROMPIMIENTO

El mecanismo de rompimiento en gotas de un chorro líquido, sin la influencia del medio ambiente, ha sido analizado desde un punto de vista dimensional. El patrón característico de formación del chorro se basa en propiedades tales como su diámetro, velocidad, densidad, tensión superficial y viscosidad. Para su análisis, el mecanismo de rompimiento del chorro se clasifica en función de dos parámetros:

- El número de Reynolds, $Ud_o\rho_L/\mu$
- El número Z, $\mu/\sqrt{\sigma\rho_L d_o}$

Donde:

U_m = Velocidad media del chorro,

d_o = Diámetro del orificio,

ρ_L = Densidad del líquido,

μ = Viscosidad del líquido,

σ = Tensión superficial.

Fue precisamente Ohnesorge en 1936, quien combino los números de Reynolds ($Ud_o\rho_L/\mu$) y Weber ($\rho U^2 r/\sigma$) y propuso el Número Z, también llamado Número de Ohnesorge ($We^{1/2}/Re$).

De esta forma, Ohnesorge (1936) correlaciono los datos experimentales de Haenlien (1931) y clasificó la desintegración del chorro al graficar el Número Z vs. Número de Reynolds (ver figura 2.2) de la siguiente manera:

1. Goteo lento desde un orificio sin formación de chorro.
2. Mecanismo de Rayleigh con rompimiento del chorro, producto de perturbaciones simétricas axialmente.
3. Rompimiento causado por perturbaciones simétricas sobre el eje helicoidal comenzando en el orificio.
4. Atomización del chorro.

**Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre**

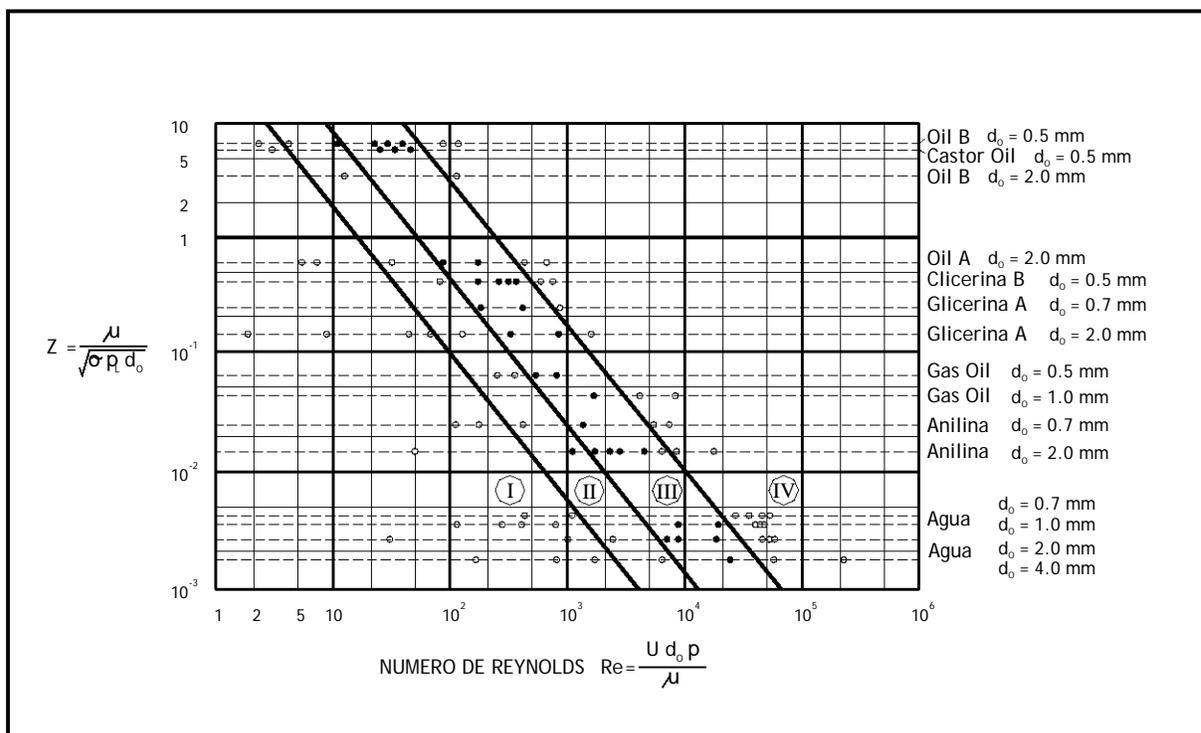


FIGURA 2.2 CARTA DE OHNESORGE. CLASIFICACION DE LOS MODOS DE ROMPIMIENTO
ROMPIMIENTO DEL CHORRO COMO FUNCION DEL NUMERO DE REYNOLDS Y LAS PROPIEDADES DEL LIQUIDO.

Las teorías y clasificación de la desintegración de chorros fueron revisadas por algunos investigadores a finales del siglo XX. Dichos estudios sugirieron dividir el fenómeno de desintegración de un chorro líquido en *regímenes de rompimiento*, los cuales cambian su apariencia de acuerdo a las condiciones de operación. Es decir, el método para clasificar los regímenes de rompimiento es considerar una porción del chorro líquido, o su longitud antes del rompimiento, como una función de su velocidad de salida. Bajo este punto de vista los regímenes de rompimiento se han clasificado de la siguiente manera [Tapia (1998)]:

- I. **Régimen de rompimiento de Rayleigh.** El rompimiento ocurre muchos diámetros corriente abajo de la boquilla de salida y las gotas resultantes durante el rompimiento tienen tamaños que exceden el diámetro del chorro. El rompimiento es causado por el crecimiento de las oscilaciones axisimétricas de la superficie inducidas por la tensión superficial.
- II. **Rompimiento inducido por el primer viento.** El chorro inicia su rompimiento varios diámetros corriente abajo de la boquilla y los tamaños de gota son del orden del diámetro del chorro. Las causas que provocan dicho régimen son el movimiento relativo entre el chorro y su medio ambiente, el cual produce una distribución de presión estática a través del chorro, acelerando el proceso de rompimiento.
- III. **Rompimiento inducido por el segundo viento.** Al aumentar la velocidad de descarga del chorro, el rompimiento es más rápido a la salida de la boquilla. El diámetro promedio de la gota es mucho menor que el diámetro del chorro. La formación de las gotas es el resultado del crecimiento inestable de la longitud de onda sobre la superficie del chorro causado por el movimiento relativo entre el chorro y el aire ambiente.
- IV. **Atomización.** Cuando la velocidad de descarga alcanza cierto nivel, el chorro líquido es dividido por completo inmediatamente después de dejar el orificio de la boquilla; esto debido a los altos números de Reynolds. El tamaño de gota es muy pequeño comparado con el tamaño del orificio de salida. Las causas que originan este rompimiento no han sido aclaradas hasta el momento debido a la gran cantidad de factores que intervienen en el fenómeno, así como también a la dificultad de su estudio teórico y experimental.

Lin y Reitz [1998] propusieron las siguientes expresiones para los diferentes regimenes de rompimiento:

I. Régimen de rompimiento de Rayleigh.

$$We_L > 8 \quad \text{y} \quad We_G < 0.4 \quad \text{ó} \quad 1.2 + 3.41 Z^{0.9}$$

II. Rompimiento inducido por el primer viento.

$$1.2 + 3.41 Z^{0.9} < We_G < 13$$

III. Rompimiento inducido por el segundo viento.

$$13 < We_G < 40.3$$

IV. Atomización

$$We_G > 40.3$$

Donde:

We_G = Número de Weber basado en la densidad del aire

We_L = Número de Weber basado en la densidad del agua

Debe considerarse que estas formulaciones no toman en cuenta el efecto de la geometría de la boquilla. Estudios llevados a cabo por Hiroyasu [2000], Arai [1988] y Tamaki [1998] mostraron que la geometría de la boquilla tiene un impacto significativo sobre las

características de chorros. Sin embargo, no es la única característica de peso, ya que una amplia variedad de propiedades influyen en su desarrollo.

2.1.2 CURVA DE ROMPIMIENTO

Un chorro líquido que tiende a romperse e inicia un proceso de desintegración en pequeñas gotas puede clasificarse y graficarse de diferentes formas. Para nuestro estudio, consideramos que es importante mencionar las distintas formas de presentar y representar la longitud de rompimiento de un chorro líquido.

La distancia entre la salida del orificio o boquilla y la aparente discontinuidad en la columna del líquido es llamada *longitud de rompimiento*. Dicha longitud se caracteriza por estar dividida en regímenes que reflejan la diferencia en la apariencia del chorro cuando las condiciones de operación están cambiando [Vágó (2003)]. Tales regímenes pueden estar asociados a diferentes combinaciones de fuerzas que actúan sobre el chorro, que conducen a su rompimiento. Las fuerzas que pueden llegar a influir son:

- aerodinámicas,
- tensión superficial,
- inercia del líquido.

La forma más simple de caracterizar los regímenes de rompimiento es considerando las *longitudes de rompimiento*, L_R , como una función de la velocidad media del chorro, U_m .

En muchos experimentos sobre chorros líquidos en caída libre, el proceso de desintegración de gotas esta caracterizado por la función $L_R(U_m)$. Esta función establece la llamada curva de rompimiento o curva de estabilidad [Vágó (2003)] (Ver fig. 2.3).

La curva representa la longitud de rompimiento, L_R , -definida como la altura de la columna continua del líquido a la salida del orificio o boquilla- contra la velocidad media del chorro líquido, U_m .

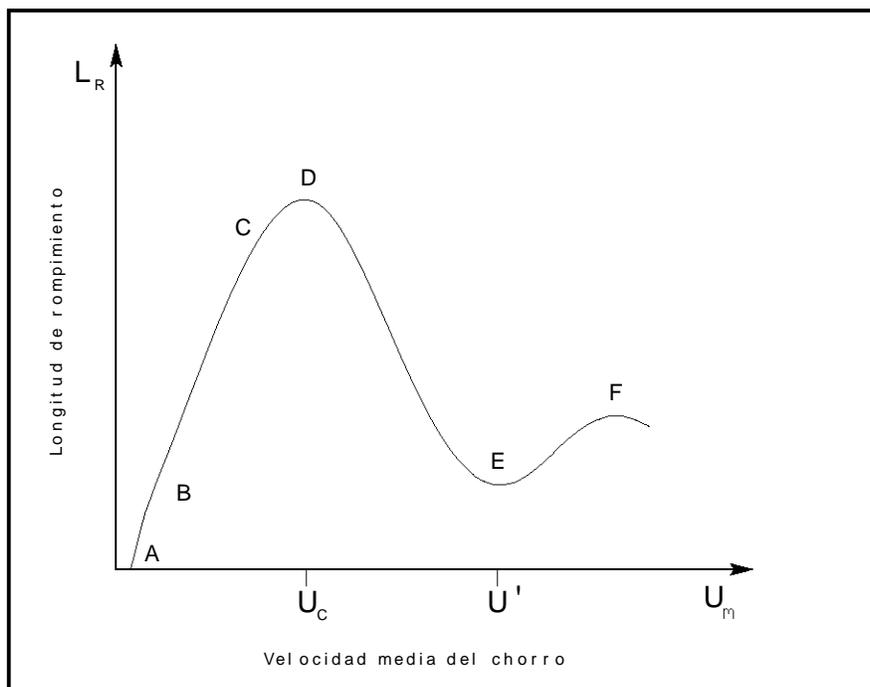


Figura 2.3 Curva de Rompimiento Empírica: longitud de rompimiento (L_R) como una función de la velocidad media del chorro (U_m)

Las diferentes longitudes de rompimiento o secciones de la curva se describen a continuación:

- **Sección A-B.** Describe el régimen de goteo.

- **Sección B-C.** Esta longitud de rompimiento, L_R , que aumenta linealmente con la velocidad del chorro, U_j , describe el régimen de Rayleigh. Este proceso, gobernado por la tensión superficial, promueve el crecimiento de perturbaciones sobre la superficie del chorro líquido. Para chorros que dependen de la geometría de la boquilla, en esta región influyen en gran medida las fuerzas aerodinámicas. En chorros para los cuales el punto crítico cambia con la geometría de la boquilla, el cambio de mecanismo no puede asociarse al incremento de fuerzas aerodinámicas [Blaisot (2003)].

- **Sección C-D.** En esta sección los efectos dinámicos del medio ambiente llegan a ser significativos. La curva alcanza un punto crítico de velocidad U_C . La localización de este máximo dependerá del medio ambiente, así como de la forma y tamaño de la boquilla [Leroux (1996)].

- **Sección D-E.** Después de este punto máximo, la curva decrece hasta un punto E (velocidad U'); la cual, dentro de los regimenes de rompimiento, se denomina régimen *inducido por el primer viento*.

- **Sección E-F.** Para altas velocidades de flujo, sección EF, las longitudes de onda llegan a ser más cortas comparadas con el diámetro del chorro y dependiendo de la geometría, las perturbaciones llegan a ser significativas. Después del punto F, las altas velocidades del chorro generan un rompimiento en gotas que comienza prácticamente a la salida de la boquilla; región conocida como de atomización.

2.1.3 FACTORES DE INFLUENCIA EN LA DESINTEGRACIÓN

El conocimiento de la desintegración progresiva de un chorro líquido a la salida de una boquilla y la consecuente formación de gotas es esencial para la eventual comprensión de varios procesos. Este fenómeno tan complejo ha llevado a coincidir a varios investigadores en que su formación y comportamiento son el resultado de causas internas y externas [Tapia (1998)]. La influencia de las distintas variables no ha llegado a comprenderse por completo; por ello, todas y cada una de las investigaciones realizadas deben tomarse con el cuidado de cada caso en particular.

El rompimiento inicial del líquido depende de las propiedades del flujo en el interior del atomizador, las propiedades de turbulencia a lo largo de la corriente de líquido antes de la desintegración, las propiedades del medio ambiente y el desarrollo de ondas a lo largo de la superficie del chorro [Chigier (1995)]. El mecanismo de desintegración lo controlan la tensión superficial y la viscosidad dinámica dentro del líquido mismo [Lefebvre (1989)]. También es controlado por la interacción de las fuerzas aerodinámicas. Estas interacciones son demasiado complejas para representarlas matemáticamente con un alto grado de precisión. Sin embargo, la propia formación de la lámina de líquido es un fenómeno complejo altamente dependiente de las características específicas de diseño de la boquilla, las cuales varían ampliamente. La viscosidad del líquido es la propiedad más importante en el proceso de formación del *flujo*. Su importancia proviene del hecho de que afecta no sólo las distribuciones de tamaño de gota, sino también la velocidad en el atomizador y en los patrones del *flujo atomizado* [Chigier (1995)].

La cantidad de variables que influyen en la formación y desintegración de un chorro son diversas. Algunas líneas de investigación se basan en la suposición que la desintegración se debe a las perturbaciones turbulentas que se desarrollan en la boquilla o atomizador.

2.2 CARACTERÍSTICAS DE CHORROS CON GIRO.

Los chorros con giro son usados como un medio de control, estabilidad e intensidad de la flama en cámaras de combustión y han encontrado aplicación en varios tipos de secadores, atomizadores y quemadores. La aerodinámica de los chorros con giro combina las características del movimiento rotatorio y el fenómeno de turbulencia libre [Chigier (1972)].

El modo de desintegración de un chorro con giro está fuertemente relacionado a las características del chorro y la diferencia de velocidad $\Delta U = |U_L - U_G|$ entre el líquido y el medio ambiente. Experimentos muestran que la introducción del giro en flujos a baja velocidad incrementa las razones de esparido y arrastre de flujo estacionario (término en inglés llamado “entrainment”) [Blaisot (2003)]. En realidad, la mayoría de los estudios se dirigen a los chorros turbulentos. Sin embargo, Billant [1994] estudio experimentalmente los chorros con giro a bajos números de Reynolds.

Un chorro con giro se describe como el movimiento rotatorio de un fluido corriente arriba de una boquilla u orificio de salida. El fluido que sale del orificio tiene una componente de velocidad tangencial adicional a las componentes radial y axial de velocidad encontradas en los chorros sin giro [Chigier (1972)].

Por otro lado, el orificio de la boquilla de salida tiene, por lo general, una forma circular y el grado de rompimiento en gotas y la forma del patrón del chorro dependerá de la magnitud de la velocidad angular o de giro del líquido. Este tipo de chorro se caracteriza por tener una cavidad de aire o núcleo potencial (el término en inglés es llamado core) sobre su eje. En el caso de agua, su formación ocurre a relativamente bajas presiones manométricas, menos de 0.07 kg/cm^2 (1 lb/plg^2). Sin embargo, cuando la viscosidad del líquido aumenta, la presión a la cual su núcleo potencial de aire se forma también se incrementa [Marshall (1967)].

2.2.1 GENERACION DEL GIRO.

En la literatura, Chigier (1972), encontramos tres formas en que el se puede generar el giro, o bien, inducir movimiento rotatorio:

- I. Entrada tangencial de la corriente de fluido.
- II. Usando venas guías en un tubo de flujo axial.
- III. Por medio de dispositivos mecánicos de rotación.

2.2.2 NUMERO DE GIRO.

Los chorros libres con giro se caracterizan porque tanto el flujo axial de la cantidad de movimiento angular, G_φ , y el flujo axial de la cantidad de movimiento lineal, G_x , se conserva y pueden ser escritos como

$$G_\varphi = \int_0^R (Wr)\rho U 2\pi r dr = const \quad (1)$$

$$G_x = \int_0^R U\rho U 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr = const \quad (2)$$

Donde:

$U =$ Velocidad axial

$W =$ Velocidad tangencial

$p =$ Presión estática

$\rho =$ Densidad

Estas ecuaciones de flujo de cantidad de movimiento, las características adimensionales del flujo rotario y del comportamiento aerodinámico del chorro son la base de la intensidad del giro, representado por la siguiente relación:

$$S = \frac{G_\varphi}{G_x R} \quad (3)$$

Donde, $S =$ Número de giro y $R =$ Radio

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

INTRODUCCIÓN

MODELO EXPERIMENTAL

ELEMENTOS DEL MODELO FÍSICO

ARREGLO DEL MODELO EXPERIMENTAL

SISTEMA DE MEDICIÓN Y LECTURA DE DATOS

SISTEMA DE VISUALIZACIÓN

CÁLCULO DEL NÚMERO DE GIRO

3.1 INTRODUCCIÓN

El trabajo experimental se llevo a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Termofluidos en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Durante ésta etapa se realizaron varios prototipos antes de llegar al modelo experimental presentado en este trabajo. Los problemas a resolver durante la construcción del modelo fueron dos, principalmente:

- a) El acoplamiento y alineación entre motor eléctrico y el agitador mecánico de paleta, y
- b) La vibración de la estructura soporte del modelo experimental

Ambos problemas estaban ligados entre sí, por esto, fue necesario realizar varias pruebas antes de tomar las mediciones y grabaciones que se presentaron. Es un hecho que la principal dificultad estuvo alrededor de la vibración generada por la desalineación entre el motor eléctrico y el agitador de paleta. Para resolverlo fue necesario reforzar la estructura soporte y mejorar la alineación a través de una pieza adecuada de acoplamiento. Los resultados fueron buenos, al grado de minimizar la vibración y, consecuentemente, reducir los efectos producidos durante la operación del modelo experimental. Con ello se logro obtener un flujo estable a la salida de la boquilla u orificio de descarga.

El objetivo principal al construir el modelo experimental es el estudio de los patrones de flujo formados a la salida de la boquilla a partir de diferentes velocidades de salida del

*Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre*

líquido. Debe mencionarse que el fluido utilizado en el experimento fue agua a temperatura ambiente. Se llevaron a cabo diferentes pruebas para conseguir la información necesaria sobre el comportamiento del chorro con giro en caída libre.

Las variables de operación que se pudieron controlar fueron:

- La gasto másico de entrada a la cámara de giro,
- Las velocidades de giro en la cámara, a través del agitador de paleta.

3.2 MODELO EXPERIMENTAL

En general, el desarrollo de la investigación experimental incluyó varias etapas, las cuales se describen de la siguiente manera:

- Construcción de modelo físico o dispositivo experimental.
- Medición y lectura de Datos.
- Visualización y grabación de las pruebas.

3.2.1 ELEMENTOS DEL MODELO FISICO

El dispositivo experimental tiene la función de generar un chorro de agua con giro en caída libre (foto 3.1). Para esto, se construyó un modelo físico con varios elementos, los cuales se describen a continuación (ver figura 3.1):

- 1) El recipiente cilíndrico que contiene el líquido de descarga, en este caso agua. Este elemento se localiza a una altura de 1 m sobre el nivel del piso. Para su identificación se llamará cámara de giro.

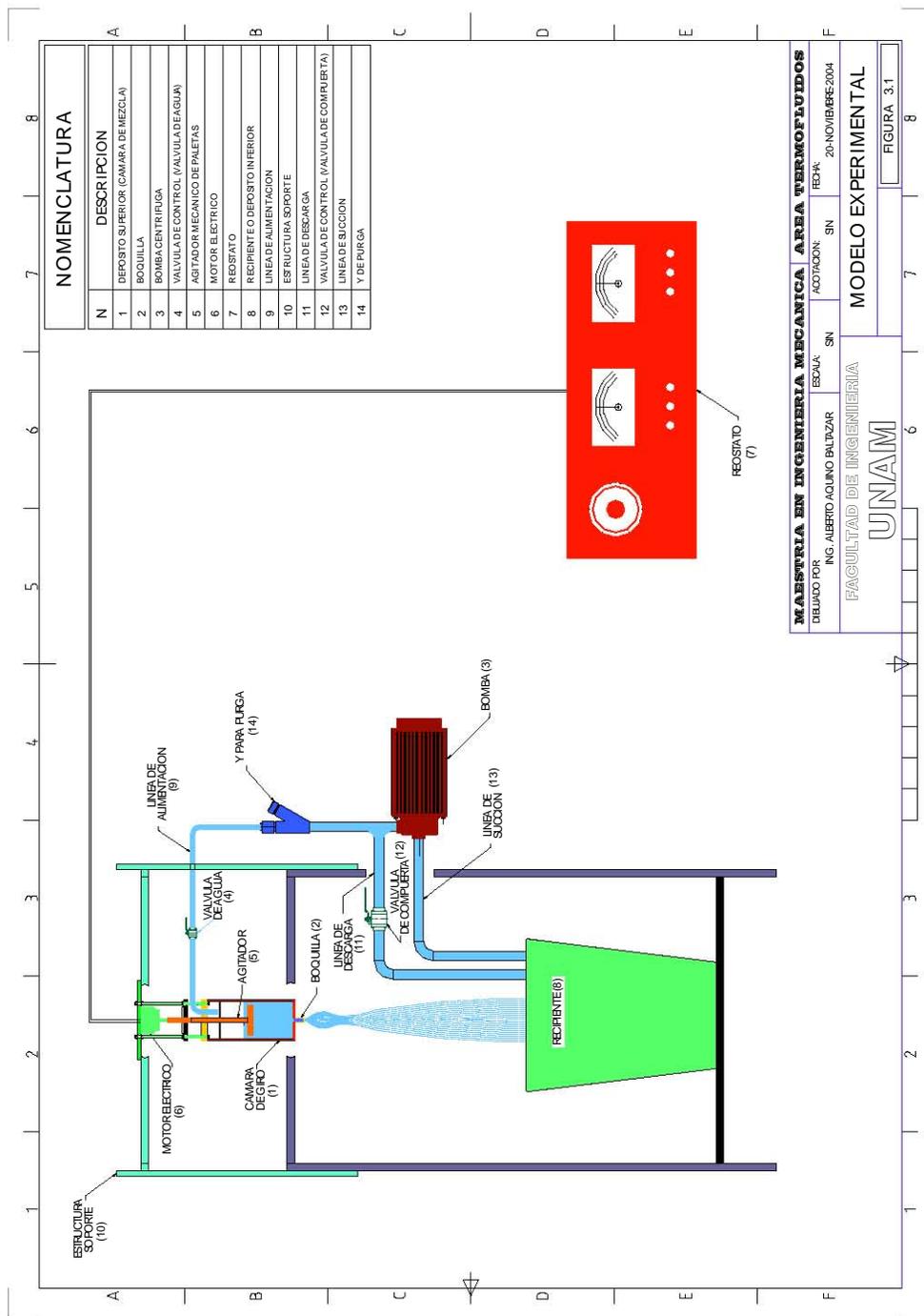
- 2) Boquilla, se encuentra en la parte inferior del recipiente cilíndrico y tiene la función de un orificio de salida, a través del cual saldrá el chorro con giro.
- 3) Una bomba centrífuga, que tiene la finalidad de proporcionar una alimentación constante de agua al recipiente superior.
- 4) Válvula de control, se encarga de controlar la cantidad de flujo de agua que entra al recipiente superior; en este caso se utilizó una válvula de tipo aguja.
- 5) Agitador mecánico de paletas, su función es provocar el giro del fluido contenido en el recipiente y, por consiguiente, generar un chorro con giro a la salida de la boquilla.
- 6) Un motor eléctrico, que conectado al agitador de paleta, produce la fuerza que da giro al fluido.
- 7) Reóstato es un dispositivo eléctrico que tiene como función principal controlar la rapidez de giro del motor eléctrico, para de esta forma incrementarla o disminuirla.
- 8) Recipiente inferior, una vez que chorro de agua sale a través de la boquilla cae dentro de este depósito colocado justo debajo, a nivel de piso. De este recipiente la bomba succiona el agua que ha de alimentar el recipiente superior.
- 9) Línea de alimentación, descarga y succión, a través de este elemento se transporta el agua.
- 10) Estructura que soporta todos los elementos anteriores.

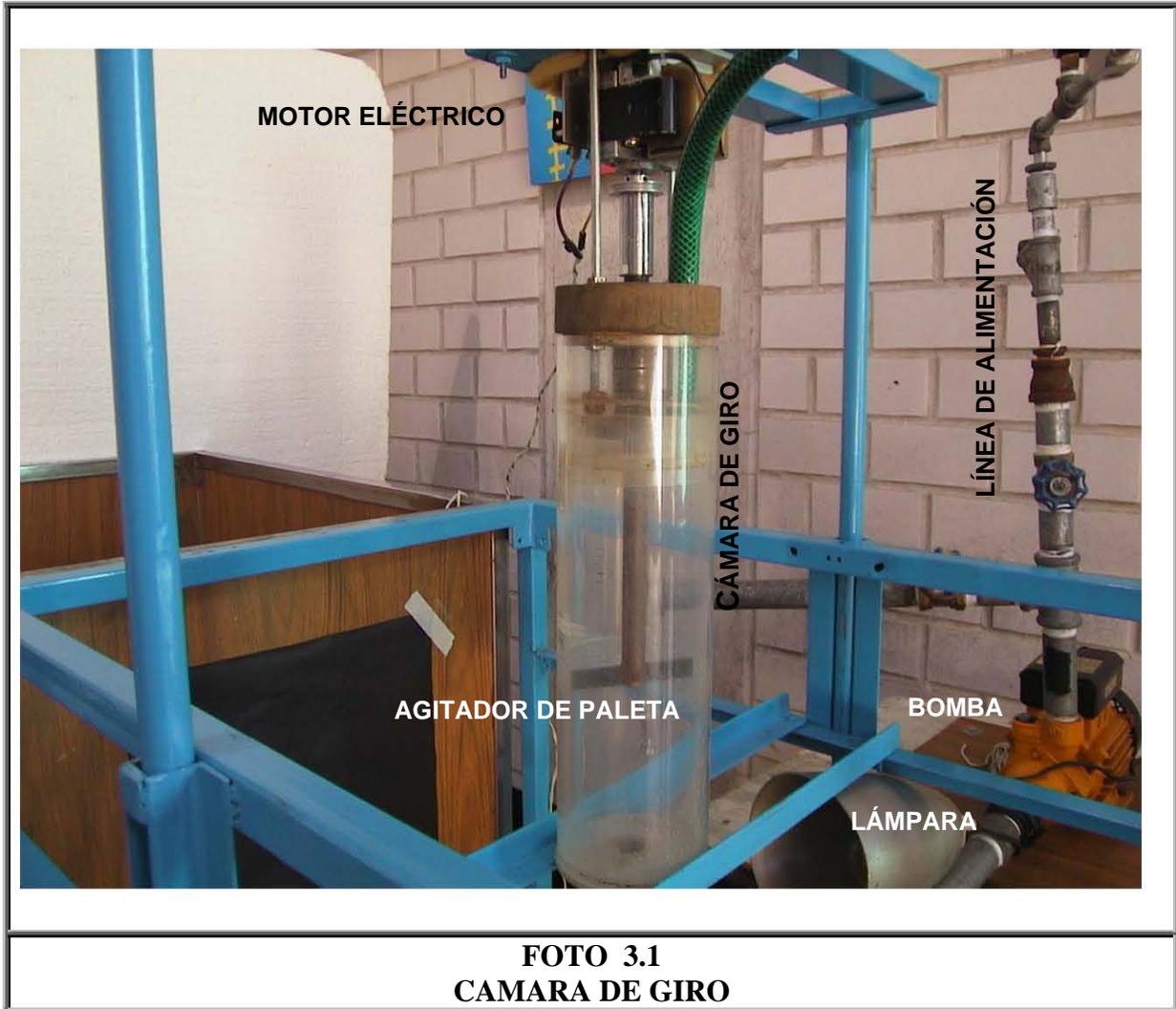
***Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre***

Las características de estos elementos se encuentran descritas en la tabla 3.1 y pueden observarse en las fotos 3.1 y 3.2.

TABLA 3.1 CARACTERISTICAS DEL MODELO EXPERIMENTAL			
<i>No</i>	<i>DESCRIPCION</i>	<i>DIMENSIONES</i>	<i>MATERIAL</i>
1	RECIPIENTE CILINDRICO SUPERIOR (CÁMARA DE GIRO)	ALTURA 40 CM TUBO DE 4" DE DIAMETRO	ACRILICO
2	BOQUILLA	ORIFICIO DE SALIDA DE 2.3 MM	A. INOX.
3	BOMBA CENTRIFUGA DE ¾ H.P.		A.C.
4	VALVULA DE AGUJA DE ¼ PULG. DE DIAMETRO		A. INOX.
5	AGITADOR MECANICO DE PALETAS	1.5 CM X 10CM	ACRILICO
6	MOTOR ELECTRICO DE ¼ H.P., 60 HZ, 127 VOLTS		
7	REOSTATO, 60HZ, 127 VOLTS		
8	RECIPIENTE (DEPOSITO) INFERIOR	60 CM DE ALTURA	PLASTICO
9	LINEA DE ALIMENTACION, DESCARGA Y SUCCIÓN		A.C.
10	ESTRUCTURA	80 CM X 90 CM X 1.30 M	A.C.

**Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre**





*Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre*



FOTO 3.2
ELEMENTOS DEL MODELO EXPERIMENTAL

3.2.1.1 ARREGLO DEL MODELO EXPERIMENTAL

El modelo experimental, mostrado en la foto 3.3, fue diseñado para generar chorros de agua con giro en caída libre bajo diferentes condiciones de operación. Para ello se necesitó una carga de agua contenida en un recipiente cilíndrico sobre el nivel del piso. Un agitador mecánico de paleta, que se encuentra acoplado a un motor eléctrico, hace girar el agua contenida dentro de recipiente cilíndrico y que después sale a través de la boquilla por gravedad. El chorro con giro, que surge en caída libre de la boquilla, cae a un segundo recipiente o depósito colocado justo debajo de la boquilla donde se acumula.

1. *SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.* Se utilizó una bomba centrífuga es utilizada como un sistema de alimentación o suministro de agua hacia el recipiente superior, para lo cual, se conectó una línea de tubería desde la bomba hasta el recipiente superior. Al mismo tiempo, la bomba centrífuga succiona el agua del recipiente inferior.

2. *SISTEMA DE CONTROL DE FLUJO.* Para lograr el control de flujo de agua en la descarga a la cámara de giro se instaló:
 - En primer lugar, una válvula de control de flujo –válvula de aguja–, en la línea de tubería de ¼ pulg., antes de la entrada al recipiente superior.

 - Además, se conectó una derivación, justo después de la salida de la línea de descarga de la bomba, junto con una válvula de bola. Esto permitió reducir y controlar la cantidad de agua en exceso que la bomba pudiera suministrar.

3. *SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE GIRO.* La velocidad de giro del flujo o del chorro a la salida de la boquilla se varió durante las pruebas. El control de esta velocidad se realiza a través del agitador mecánico de paleta acoplado a un motor eléctrico, el cual fue conectado a un reóstato. Este dispositivo eléctrico, reóstato, tiene la función de variar el voltaje que llega al motor eléctrico a través de resistencias eléctricas. Su principio de funcionamiento se basa en la Ley de Ohm:

$$V = FI$$

Donde: V = Voltaje [Volts],
 I = Corriente [Ampers], y
 F = Resistencia [Ohms]

Al incrementar la resistencia eléctrica, la diferencia de potencial inducida al motor eléctrico disminuye y, como consecuencia, la velocidad del motor se reduce. Y viceversa, al disminuir la resistencia eléctrica del circuito, el voltaje y la velocidad del motor aumentan.

De esta forma, la variación de la rapidez de giro del agitador implica que la velocidad de giro del chorro de agua a la salida de la boquilla llegue a controlarse por medio de la diferencia de potencial inducida al motor eléctrico. Todas las pruebas realizadas fueron hechas bajo condiciones atmosféricas. Las mediciones de velocidad de giro y lecturas de voltaje y corriente tomadas están contenidas en el capítulo IV.



FOTO 3.3
MODELO EXPERIMENTAL

3.2.2 SISTEMA DE MEDICION Y LECTURA DE DATOS

Además de la construcción del modelo experimental se tuvo una etapa de medición y obtención de datos relacionados con la operación y comportamiento del chorro con giro. La forma en que se obtuvieron los datos, instrumentos utilizados, y técnicas de medición se mencionan en este punto.

1. **Vaso de precipitado.** A través de este recipiente se acumula el líquido para calcular el gasto másico y volumétrico de agua generado por el chorro que sale de la boquilla. Como se realizaron varias pruebas y mediciones de gasto, el tiempo de acumulación de cada una varió aproximadamente entre 2.5 y 6 segundos, dependiendo de la velocidad de salida.
2. **Báscula.** Fue necesario calcular el peso generado por el chorro en determinado tiempo y, para esto, se usó una báscula.
3. **Tacómetro.** La velocidad de giro del agitador fue medida por medio de un dispositivo electrónico llamado tacómetro.

El tacómetro utilizado en el presente trabajo fue del tipo de frecuencia. Dicho instrumento mide la frecuencia de la señal de c. a. captada por transductores de tipo electromagnético, capacitivo u óptico que dan un cierto número de impulsos, proporcionales a la velocidad de giro (ver figura 3.2).

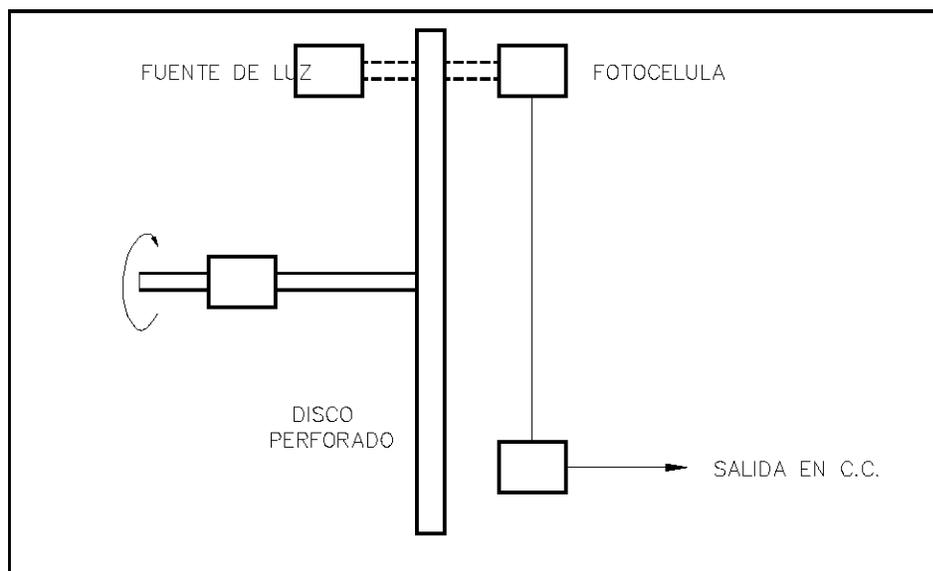


FIGURA 3.2 TRANSDUCTOR OPTICO. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

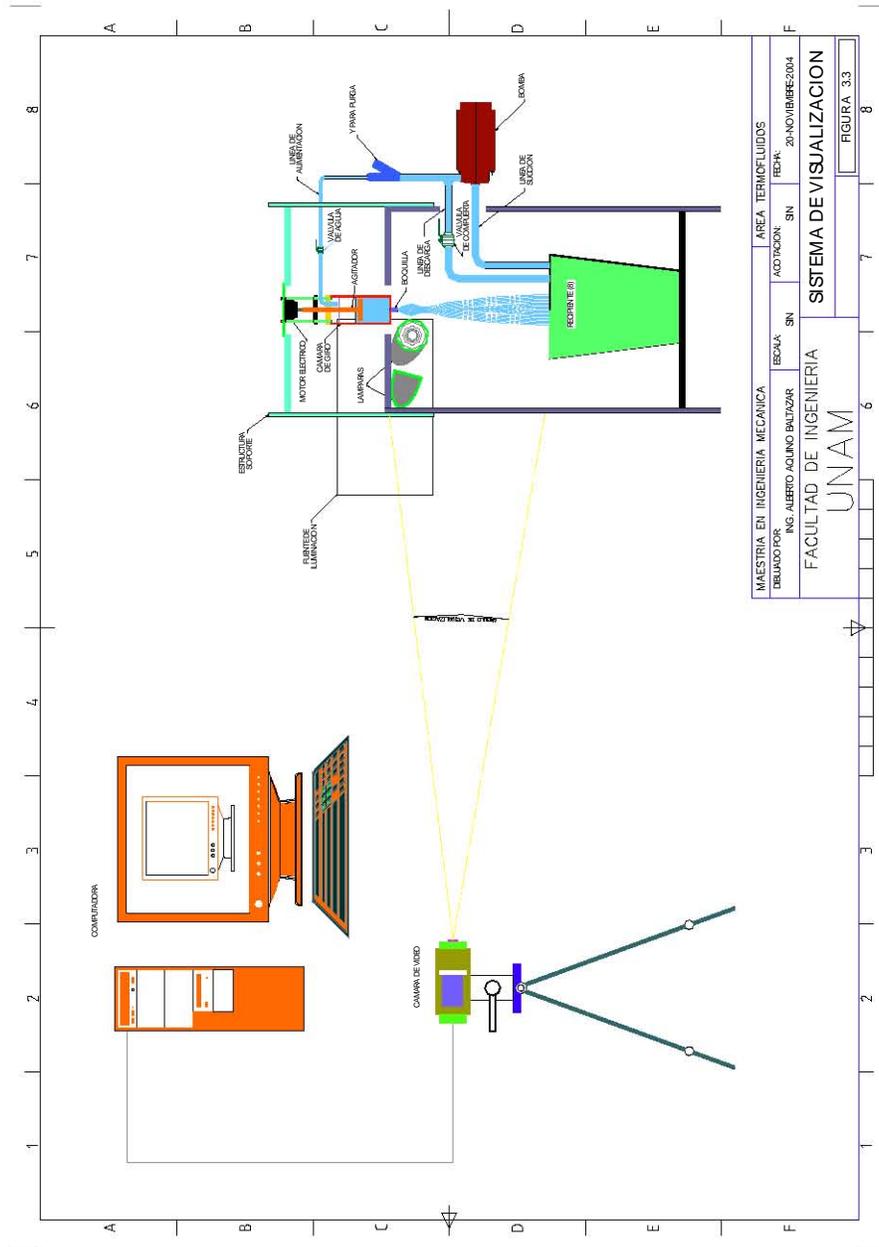
4. **Cronómetro.** Reloj de gran precisión que mide fracciones de tiempo. Se utilizó para medir el tiempo de acumulación del agua.

3.2.3 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN

Con el objeto de visualizar el flujo a la salida de la boquilla se utilizaron los siguientes elementos como parte del sistema de visualización, los cuales pueden observarse esquemáticamente en la figura 3.3:

1. *CAMARA DE VIDEO*. Equipo de video-grabación capaz de grabar 30 cuadros por minuto. Además, se utilizó un tripié para soportar la cámara y posicionarla al mismo nivel que la boquilla de salida.
2. *FUENTE DE ILUMINACION*. La fuente de luz artificial utilizada durante el experimento fueron 2 lámparas de 100 Watts cada una. Una lámpara fue colocada justo frente al chorro. La segunda lámpara fue ubicada a 90 grados la primera.
3. *COMPUTADORA PERSONAL*. Fue necesario transferir y almacenar las imágenes obtenidas en nuestras sesiones de grabación a una computadora.

**Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre**



3.2.3.1 METODOLOGIA PARA LA VISUALIZACIÓN.

El arreglo del equipo para la realización de la visualización consistió de una cámara de video colocada frente al equipo experimental, aproximadamente a 1 m del objetivo, es decir, la boquilla de salida. La lente de la cámara fue ubicada a la misma altura de la boquilla.

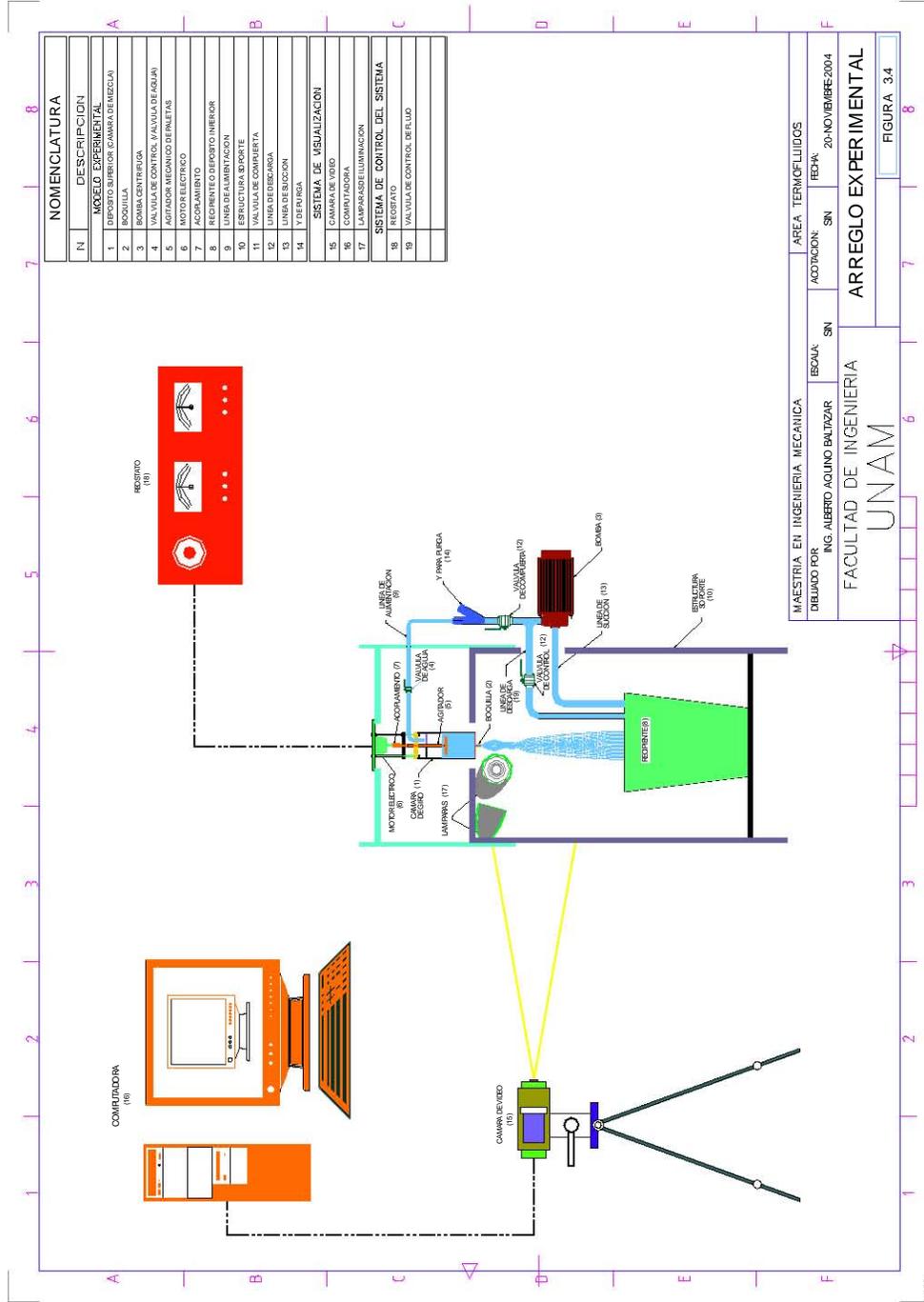
Para obtener una mejor imagen de las grabaciones de video se colocó un fondo negro. Además, se utilizaron 2 láminas negras, una de ellas cubrió totalmente la parte lateral de la estructura soporte y, otro en la parte superior. Esto se hizo con la finalidad de evitar la iluminación en exceso.

Cabe mencionar que la iluminación fue un factor determinante en las imágenes obtenidas, debido a que un exceso o falta de iluminación provoca una mala calidad de las imágenes. Por ello, las grabaciones fueron hechas después de las 18:00 hrs., lo que ayudo en gran medida a mejorar la grabación del video.

Una vez obtenidas las grabaciones para cada una de las pruebas realizadas, se procedió a almacenar las imágenes de la cámara de video en una computadora personal para su análisis.

La figura 3.3 describe detalladamente y en forma esquemática el arreglo del modelo experimental, así como los componentes empleados. La foto 3.4 muestra físicamente el modelo.

**Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre**



*Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre*



FOTO 3.4
ARREGLO DEL MODELO EXPERIMENTAL

3.3 CALCULO DEL NÚMERO DE GIRO (S).

El cálculo estricto del número de giro (S) requiere mediciones exactas de distribuciones de velocidad y presión estática en la sección transversal de un chorro giro. Para su cálculo se utilizan las siguientes ecuaciones,

$$G_{\varphi} = \int_0^R (wr) \rho U_{ca} 2\pi r dr = const \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

$$G_x = \int_0^R U_{ca} \rho U_{ca} 2\pi r dr + \int_0^R p 2\pi r dr = const \quad \dots\dots\dots(3.9)$$

$$S = \frac{G_{\varphi}}{G_x R} \quad \dots\dots\dots(3.10)$$

Donde:

- S = Número de Giro
- G = Flujo de cantidad de movimiento angular,
- G_x = Flujo de cantidad de movimiento lineal,
- U_{ca} = Velocidad de la cámara de giro,
- w = Velocidad tangencial
- R = Radio de la cámara

Para el caso en estudio, las ecuaciones (3.8) y (3.9) se reducirán a la siguiente forma,

$$G_{\phi} = \int_0^R (wr) \rho U_{ca} 2\pi r dr \quad \dots\dots\dots(3.11)$$

$$G_x = \int_0^R U_{ca} \rho U_{ca} 2\pi r dr \quad \dots\dots\dots(3.12)$$

El segundo término de la ecuación 3.9, la presión estática se omite en la ecuación (3.12) debido a que no tenemos presión en el sistema.

Entonces, el flujo de cantidad de movimiento angular es,

$$G_{\phi} = \int_0^R (wr) \rho U_{ca} r (2\pi r) dr \quad \dots\dots\dots(3.13)$$

Donde ρ = Densidad.

Reacomodando términos,

$$G_{\phi} = \int_0^R w \cdot \rho U_{ca} 2\pi \cdot r^3 \cdot dr \quad \dots\dots\dots(3.13b)$$

Integrando

$$G_{\phi} = 2\pi \cdot w \cdot \rho \cdot U_{ca} \cdot \left. \frac{r^4}{4} \right|_0^R$$

$$G_{\phi} = 2\pi \cdot w \cdot \rho \cdot U_{ca} \cdot \frac{R^4}{4}$$

Como resultado obtenemos la ecuación para el flujo de cantidad de movimiento angular,

$$G_{\phi} = \pi \cdot w \cdot \rho \cdot U_{ca} \cdot \frac{R^4}{2} \dots\dots\dots(3.14)$$

Para el flujo de cantidad de movimiento lineal, G_x , se tiene,

$$G_x = \int_0^R U_{ca} \cdot \rho U_{ca} (2\pi r) \cdot dr \dots\dots\dots(3.15)$$

$$G_x = \int_0^R U_{ca}^2 \cdot \rho 2\pi \cdot r \cdot dr \dots\dots\dots(3.15a)$$

Integrando se tiene la cantidad de movimiento lineal,

$$G_x = 2\pi \cdot \rho \cdot U_{ca}^2 \cdot \left. \frac{r^2}{2} \right|_0^R$$

$$G_x = \pi \cdot \rho \cdot U_{ca}^2 \cdot R^2 \dots\dots\dots(3.16)$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.14 y 3.16 en la ecuación de número de giro (ec. 3.10),

$$S = \frac{\pi \cdot w \cdot \rho \cdot U_{ca} \cdot \frac{R^4}{2}}{(\pi \cdot \rho \cdot U_{ca}^2 \cdot R^2) \cdot R} \dots\dots\dots(3.17)$$

Simplificando,

$$S = \frac{\pi \cdot w \cdot \rho \cdot U_{ca} \cdot \frac{R^4}{2}}{\pi \cdot \rho \cdot U_{ca}^2 \cdot R^3} \dots\dots\dots(3.18)$$

$$S = \frac{w \cdot R}{2 \cdot U_{ca}} \dots\dots\dots(3.19)$$

Esta ecuación representa el número de giro para el presente modelo experimental, el cual depende de la velocidad angular, w , dentro del recipiente antes de la salida a través de la boquilla, R es el radio del recipiente o cámara de giro y, por último, la velocidad lineal, U , la cual es definida como

$$U_{ca} = \frac{m}{\rho \cdot \pi \cdot R^2}$$

Donde R es el radio de la cámara.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTALES

MEDICIONES

RESULTADOS

CONFIGURACIÓN DE CHORROS CON GIRO EN CAÍDA LIBRE

FOTOS DEL TIPO DE CONFIGURACIÓN

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 MEDICIONES

Este capítulo reporta los datos de mediciones, cálculos y resultados obtenidos del experimento. Es importante mencionar que se seleccionaron las pruebas más representativas en función de las variables que se pudieron controlar.

En el modelo experimental se midieron la velocidad de giro angular del agitador, el gasto másico a la salida de la boquilla, el peso y el tiempo de acumulación. Como ya se mencionó por medio del reóstato se disminuyó la velocidad del motor eléctrico que se encontraba conectado al agitador. Así, al variar la velocidad angular del agitador conseguimos diferentes velocidades de giro del chorro en caída libre.

El gasto de entrada a la cámara de giro fue constante y, por consiguiente, el nivel del agua (carga) se mantuvo constante. Los tres niveles de carga estudiados fueron:

NIVELES	ALTURA DEL LÍQUIDO
MINIMO	15 CM
MEDIO	20 CM
MAXIMO	25 CM

Para cada nivel de agua almacenado en la cámara se varió la velocidad de giro de salida del chorro modificando el voltaje inducido en el motor eléctrico conectado.

Los datos del experimento se presentan en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

La tabla 4.1 presenta 3 pruebas a 3 velocidades diferentes del chorro. El nivel de agua se mantuvo a una altura de 15 cm. Se muestran los valores registrados de voltaje, corriente y resistencia del reóstato. Por último, se dan los valores obtenidos y los instrumentos utilizados para su medición. Las velocidades angulares en esta prueba fueron las más altas comparadas con las otras dos pruebas.

TABLA DE DATOS 4.1 (NIVEL MÍNIMO)						
Prueba	VARIABLES DE CONTROL REOSTATO			VARIABLES OBTENIDAS TACOMETRO BALANZA CRONOMETRO		
	Voltaje Volts	Corriente Amper	Resistencia Ohm	Velocidad r.p.m.	Peso H2O gr.	Tiempo seg.
1	90	0.8	60	681	224.6	3.28
2	100	0.9	67	930	216.84	3.72
3	110	1.1	74	1075	215.9	4.12

Durante la segunda etapa de pruebas (tabla 4.2), el rango de velocidades angulares varió de 539 r.p.m. a 891 r.p.m. El sistema se mantuvo estable y se minimizó la vibración con respecto a la etapa anterior. El nivel de agua contenido en la cámara fue de 20 cm. Esta etapa se caracterizó por una disminución del gasto másico de salida a medida que se aumentaba la velocidad del agitador de paleta.

*Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre*

TABLA DE DATOS 4.2 (NIVEL MEDIO)						
Prueba	VARIABLES DE CONTROL REOSTATO			VARIABLES OBTENIDAS TACOMETRO BALANZA CRONOMETRO		
	Voltaje Volts	Corriente Amper	Resistencia Ohm	Velocidad r.p.m.	Peso H2O gr.	Tiempo seg.
1	90	0.9	60	539	236.74	3.19
2	100	0.95	67	701	227.30	3.09
3	110	1	73.5	790	230.00	3.31
4	120	1.3	80	891	230.04	3.53

El rango de velocidades (r.p.m.) en la tercera etapa para un nivel de carga máximo disminuyó considerablemente. El nivel de agua en la cámara fue de 25 cm. El rango de velocidades fue muy estrecho, ya que estuvo entre 501 y 649 r.p.m. Fue durante el desarrollo de esta etapa, donde el sistema logró su mejor funcionamiento y estabilidad.

TABLA DE DATOS 4.3 (NIVEL MAXIMO)						
Prueba	VARIABLES DE CONTROL REOSTATO			VARIABLES OBTENIDAS TACOMETRO BALANZA CRONOMETRO		
	Voltaje Volts	Corriente Amper	Resistencia Ohm	Velocidad r.p.m.	Peso H2O gr.	Tiempo seg.
1	90	0.8	59.5	501	233.31	2.97
2	100	0.9	67.3	594	228.15	3.22
3	110	1.1	74	649	246.72	4.34

4.2 RESULTADOS

Los resultados obtenidos se reportan en las tablas 4.4, 4.5 y 4.6. Para cada prueba de chorro con giro en caída libre se calcularon las siguientes variables:

- Gasto másico,
- Velocidad axial (en la Cámara de Giro),
- Número de Reynolds y
- Número de Giro

El gasto másico se calculó a la salida de la boquilla tomando en cuenta el orificio de la boquilla.

Para el cálculo de la velocidad axial en la cámara se usó la siguiente expresión,

$$U_{ca} = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot \pi \cdot R^2}$$

Donde, R es el radio del recipiente o cámara de giro; U es la velocidad lineal o axial y; \dot{m} es el flujo másico.

El número de Reynolds se cálculo a la salida de la boquilla. La expresión usada para el Reynolds es,

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot U_{ch} \cdot d_o}{\mu}$$

Para el *número de giro* utilizamos la fórmula (3.19), que considera el flujo de cantidad de movimiento angular y la cantidad de movimiento axial

$$S = \frac{w \cdot R}{2 \cdot U_{ca}} \dots\dots\dots(3.19)$$

Aún cuando el número de giro se calcula considerando los valores del flujo correspondientes a la cámara, este valor se puede toma como representativo a la salida, para el chorro en caída libre, si se considera despreciable el par de fricción en la cámara, lo que lleva a la igualdad del flujo de cantidad de movimiento angular en la cámara y el chorro (Ver apéndice).

TABLA 4.4 NIVEL MINIMO

DATOS:				
FLUIDO:		AGUA		
DENSIDAD:	ρ	1000	kg/m ³	
TEMPERATURA AMBIENTE:	T	25	C	
VISCOSIDAD ABSOLUTA:	μ	1.79E-03	N s/m ²	
VISCOSIDAD CINEMATICA:	ν	1.007E-06	m ² /s	
TENSION SUPERFICIAL:	σ	7.36E-02	N/m	
DIAMETRO ORIFICIO	d	2.3	mm	
AREA DEL ORIFICIO	a	4.2E-06	m ²	
DIAMETRO INTERIOR DEL CILINDRO	D	102	mm	
AREA DEL CILINDRO	A	0.0082	m ²	
ALTURA O NIVEL DE AGUA	H	15	cm	
RESULTADOS				
Prueba	Numero Reynolds	Numero Giro	Tipo de Configuración	Fotos
1	21053	219	I	FOTOS 4.1
2	17957	350	I	FOTOS 4.1
3	16100	451	II	FOTOS 4.2

TABLA 4.5 NIVEL MEDIO

DATOS:				
FLUIDO:		AGUA		
DENSIDAD:	ρ	1000	kg/m ³	
TEMPERATURA AMBIENTE:	T	25	C	
VISCOSIDAD ABSOLUTA:	μ	1.79E-03	N s/m ²	
VISCOSIDAD CINEMATICA:	ν	1.007E-06	m ² /s	
TENSION SUPERFICIAL:	σ	7.36E-02	N/m	
DIAMETRO ORIFICIO	d	2.3	mm	
AREA DEL ORIFICIO	a	4.2E-06	m ²	
DIAMETRO INTERIOR DEL CILINDRO	D	102	mm	
AREA DEL CILINDRO	A	0.0082	m ²	
ALTURA O NIVEL DE AGUA	H	20	cm	
RESULTADOS				
Prueba	Numero Reynolds	Numero Giro	Tipo de Configuración	Fotos
4	22787	136	III	FOTOS 4.3
5	21518	169	IV	FOTOS 4.4
6	20187	235	IV	FOTOS 4.4

TABLA 4.6 NIVEL MÁXIMO

DATOS:				
FLUIDO:		AGUA		
DENSIDAD:	ρ	1000		kg/m ³
TEMPERATURA AMBIENTE:	T	25		C
VISCOSIDAD ABSOLUTA:	μ	1.79E-03		N s/m ²
VISCOSIDAD CINEMATICA:	ν	1.007E-06		m ² /s
TENSION SUPERFICIAL:	σ	7.36E-02		N/m
DIAMETRO ORIFICIO	d_o	2.3		mm
AREA DEL ORIFICIO	a	4.2E-06		m ²
DIAMETRO INTERIOR DEL CILINDRO	D_{int}	102		mm
AREA DEL CILINDRO	A	0.0082		m ²
ALTURA O NIVEL DE AGUA	H	25		cm
RESULTADOS				
Prueba	Numero Reynolds	Numero Giro	Tipo de Configuración	Fotos
1	24335	139	V	FOTOS 4.5
2	21951	183	VI	FOTOS 4.6
3	17586	249	VII	FOTOS 4.7

4.3 CONFIGURACION DE CHORROS CON GIRO EN CAIDA LIBRE

A continuación se describen las diferentes configuraciones que puede presentar el chorro:

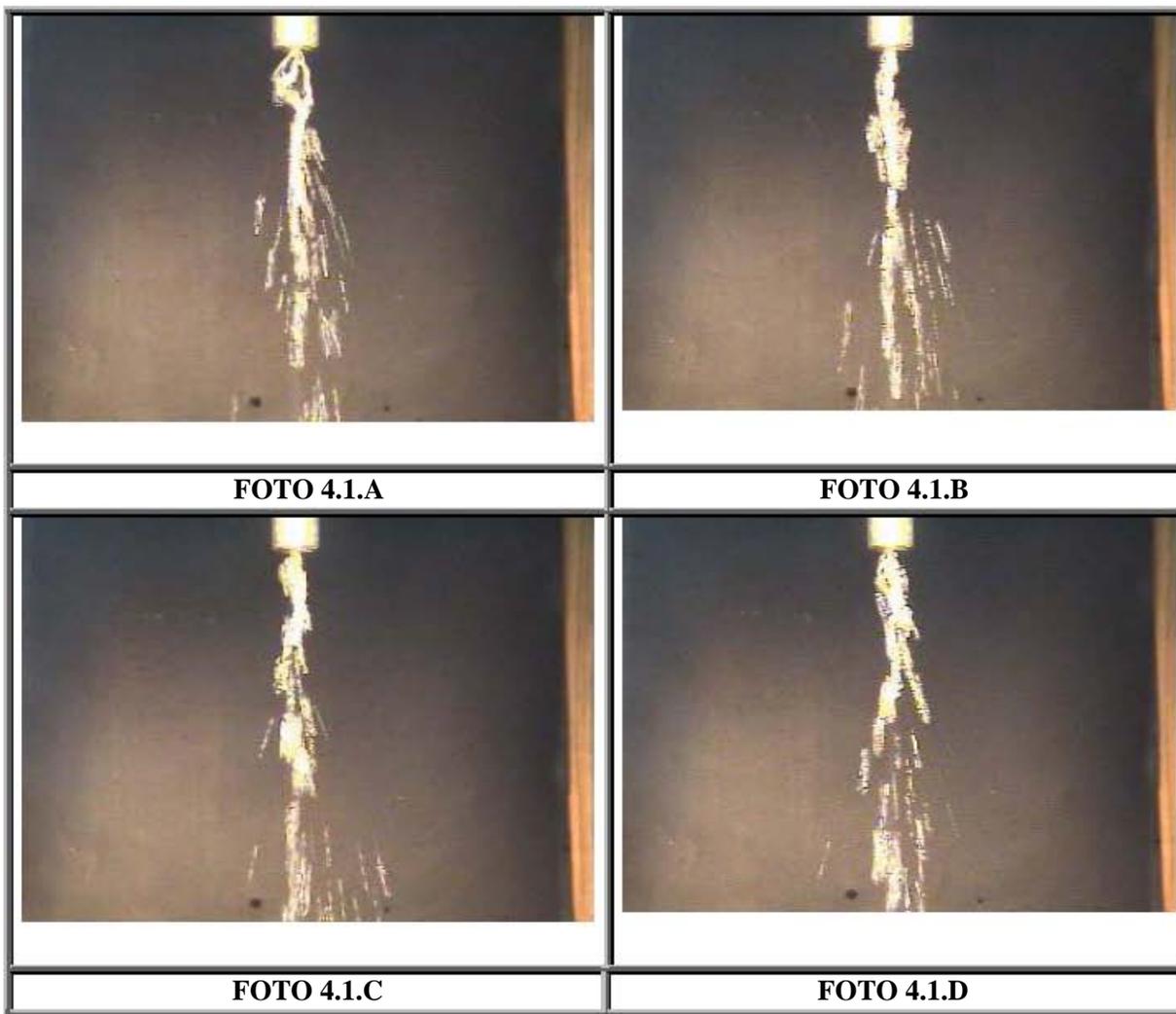
CONFIGURACION	DESCRIPCION
I	El chorro tiene una tendencia alargada de forma helicoidal a la salida de la boquilla. Su ángulo de esperado es estrecho, entre 10° y 15°. Su rompimiento se caracteriza por gotas grandes y alargadas.
II	Chorro helicoidal formado a la salida de la boquilla que tiende a una forma más estable que el anterior. El desprendimiento de gotas alargadas alrededor del chorro es mínimo. Una pequeña burbuja intenta formarse pero se rompe antes de lograrlo.
III	Chorro cilíndrico uniforme y estable hasta dos o tres diámetros de la salida de la boquilla, que después toma una forma helicoidal y alargada sin gotas satélites. Este tipo de configuración es estable durante toda la prueba.

*Diseño, Construcción y Pruebas de un Modelo Experimental
para el Estudio de Chorros con Giro en Caída Libre*

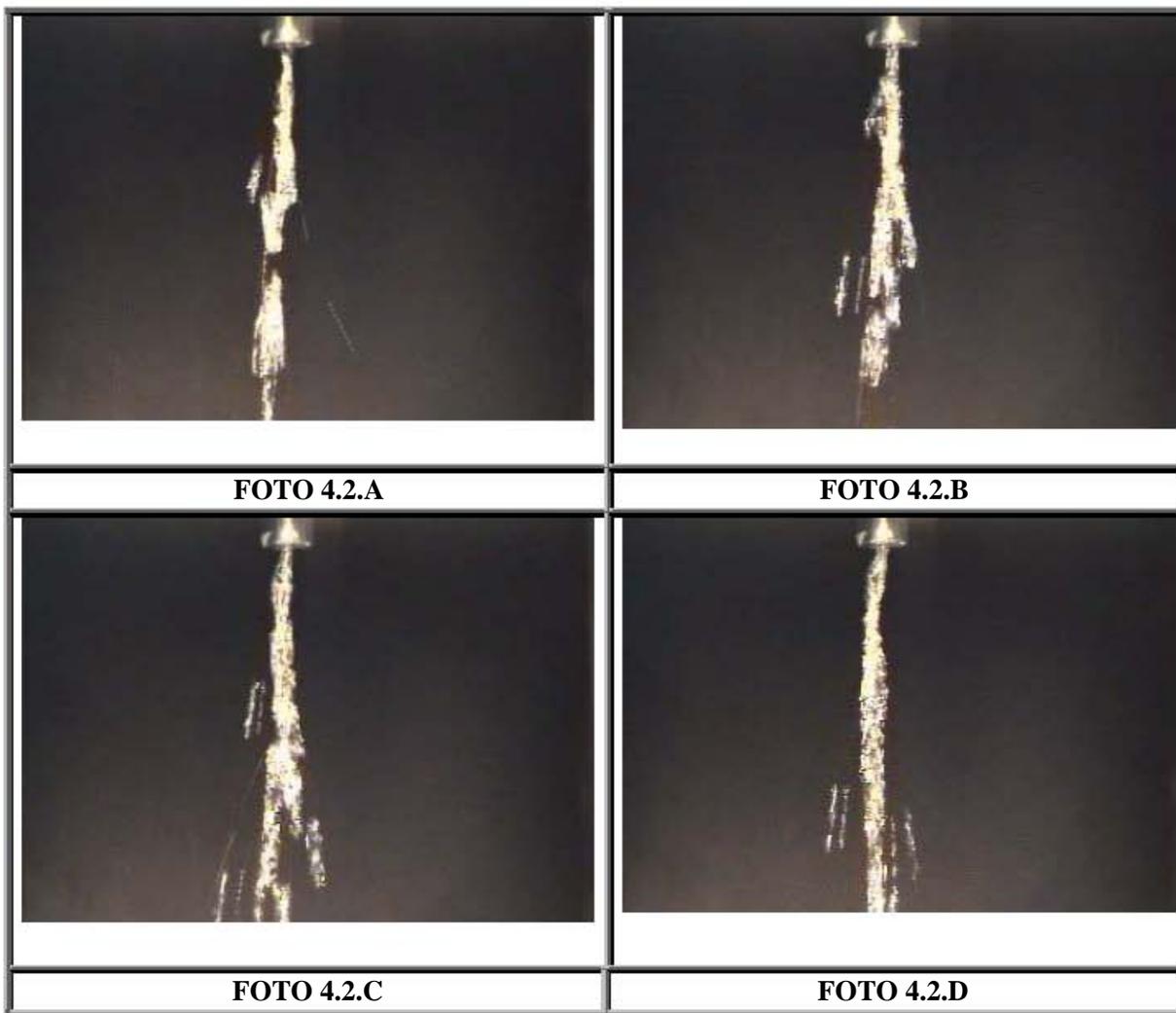
IV	<p>Chorro Cilíndrico uniforme hasta un diámetro de la salida de la boquilla, que después toma una forma helicoidal similar al anterior, pero con un rompimiento de gotas alargadas.</p>
V	<p>Burbuja elipsoidal de pequeño tamaño. Se caracteriza porque al romperse forma un cono con un ángulo de esparado de aproximadamente 30°. Este tipo de configuración de chorro tiene un cuello estable de un diámetro de longitud a la salida de la boquilla. Su rompimiento en gotas alargadas inicia después de romperse la burbuja.</p>
VI	<p>Burbuja elipsoidal de gran tamaño que logra formarse por completo y que se desintegra en gotas muy finas. Una vez formada la burbuja el chorro se estrangula generando un esparado cónico de 30° bastante uniforme. Este tipo de configuración es cíclica, ya que después de un tiempo muy corto la burbuja se rompe y vuelve a formarse.</p>
VII	<p>Chorro cónico con un ángulo de esparado de 60° aproximadamente. Esta configuración de chorro que se genera desde la salida de la boquilla es muy estable durante un lapso prolongado de tiempo. El chorro se desintegra en gotas a una corta distancia.</p>

4.4 FOTOS DEL TIPO DE CONFIGURACION

CONFIGURACION TIPO I



CONFIGURACION TIPO II



CONFIGURACION TIPO III

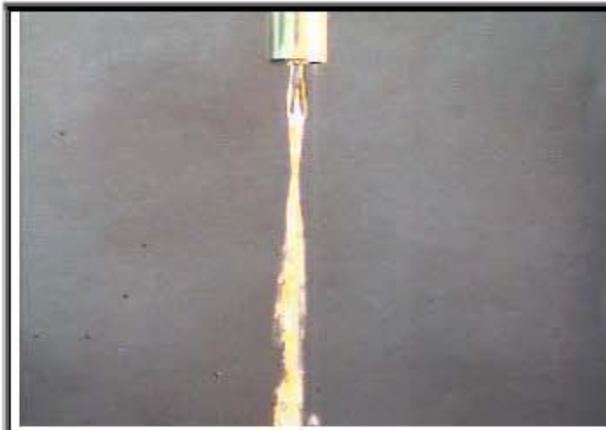


FOTO 4.3.A



FOTO 4.3.B



FOTO 4.3.C

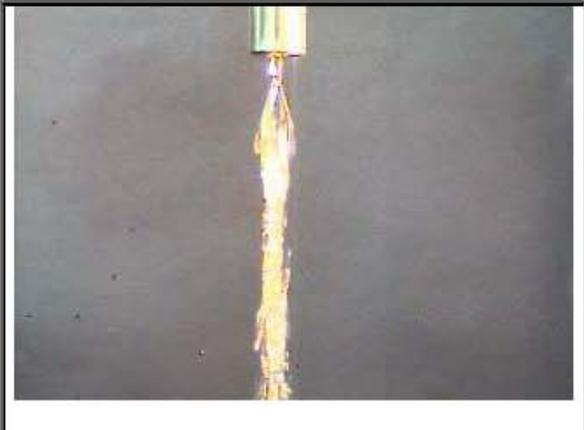


FOTO 4.3.D

CONFIGURACION TIPO IV



FOTO 4.4.A



FOTO 4.4.B

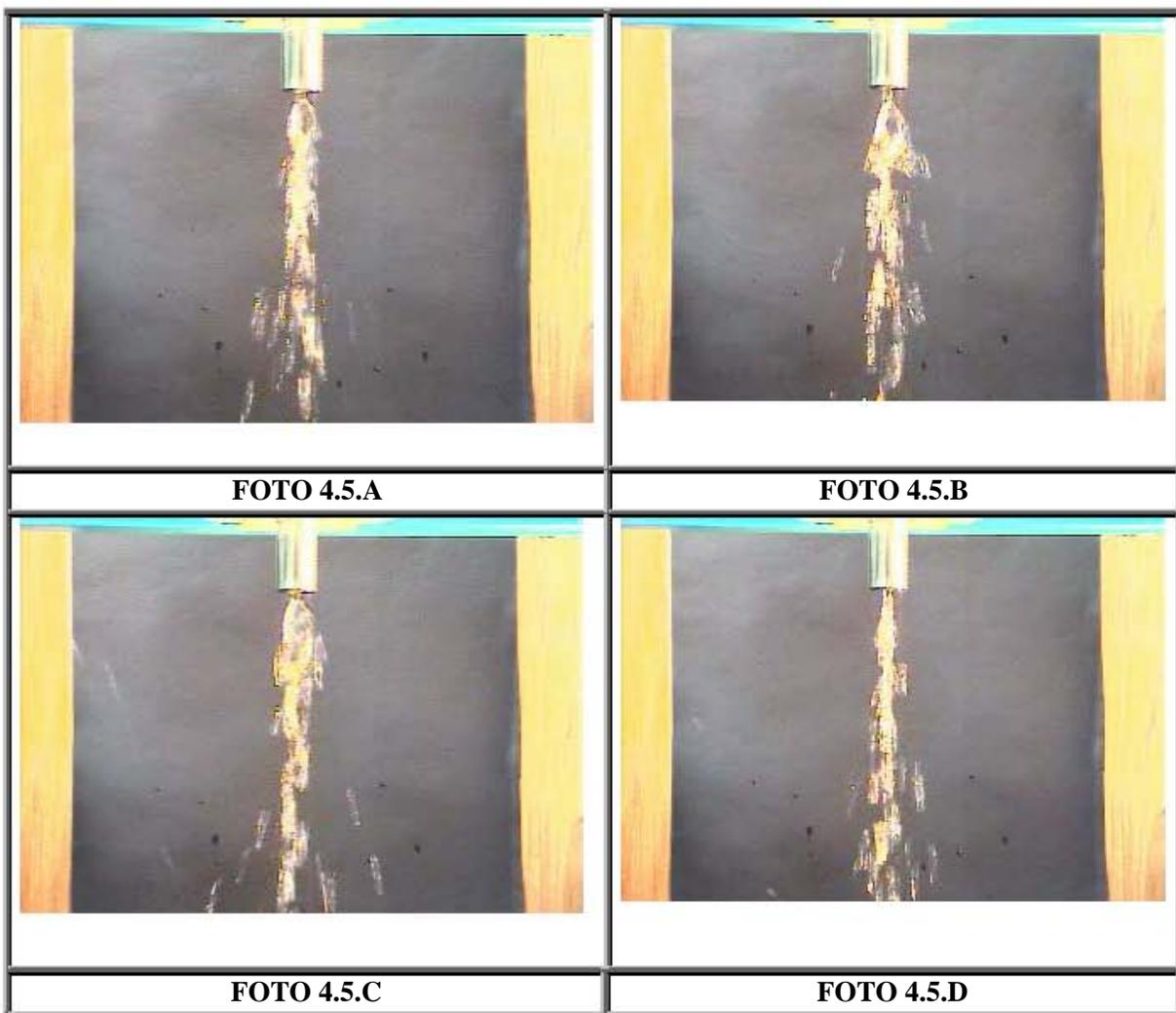


FOTO 4.4.C



FOTO 4.4.D

CONFIGURACION TIPO V



CONFIGURACION TIPO VI



FOTO 4.6.A



FOTO 4.6.B

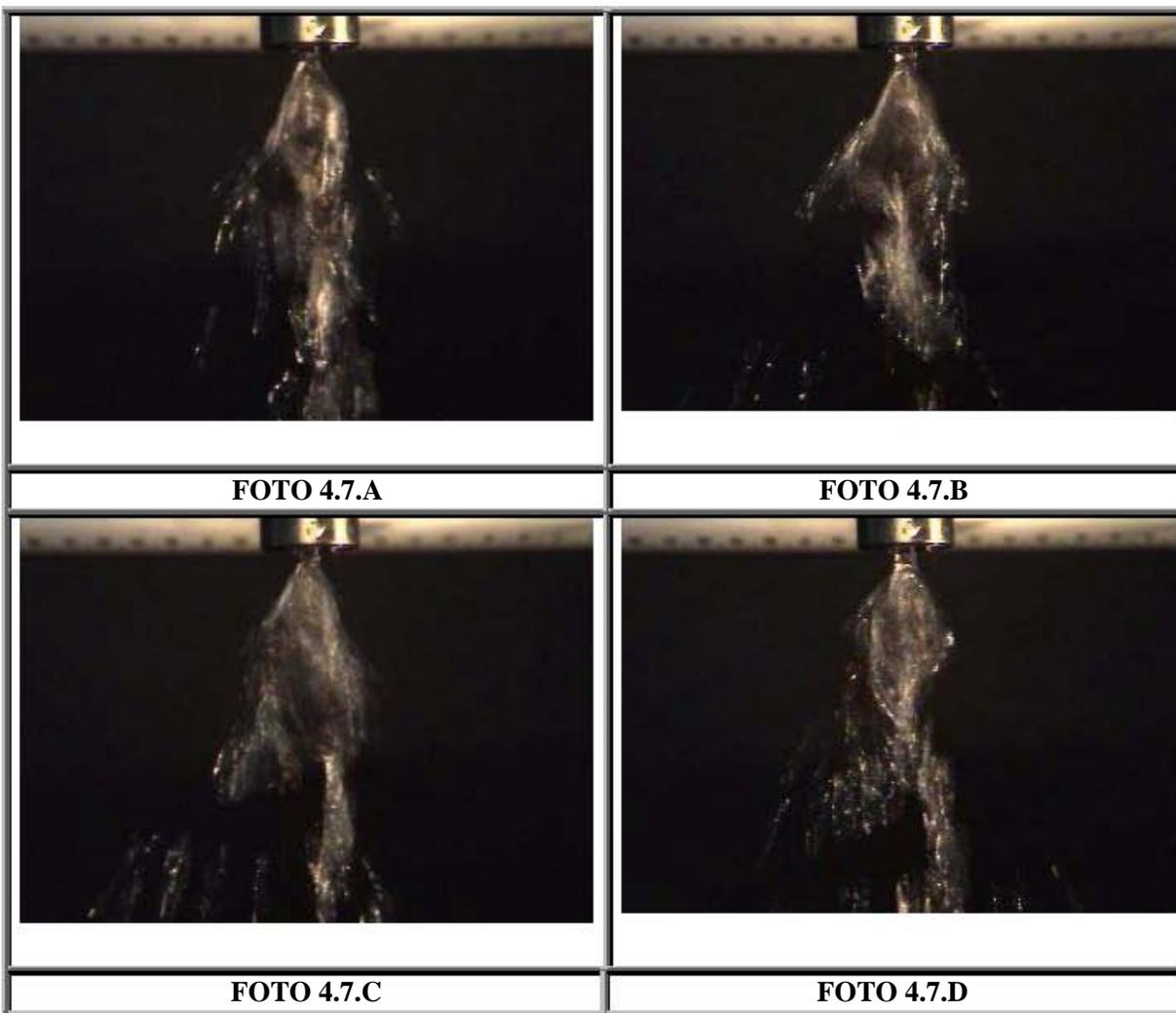


FOTO 4.6.C



FOTO 4.6.D

CONFIGURACION TIPO VII



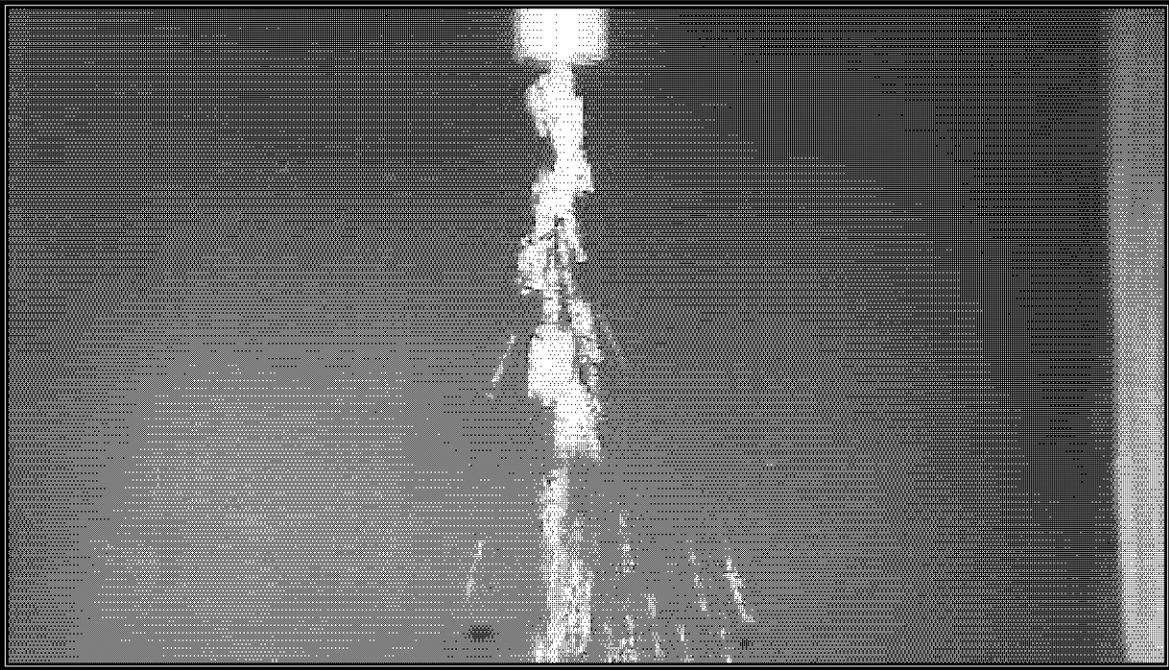
4.5 DISCUSION DE RESULTADOS

La gráfica 4.1 muestra los números de giro en función del número de Reynolds para los tres niveles de carga aplicados en el modelo experimental. Durante el desarrollo de las pruebas experimentales se reportó un rango muy estrecho de números de Reynolds.

Para un nivel mínimo de carga, mientras el número de giro del chorro en caída libre va en aumento, el número de Reynolds comienza a decaer proporcionalmente. Esto puede ser consecuencia de la disminución de la cantidad de agua que sale a través de la boquilla producto del aumento de la velocidad de giro del agitador de paleta. Para este nivel de carga en la cámara de giro, el modelo tiende a generar una mayor inestabilidad durante la etapa experimental debido al aumento de vibración.

Para un nivel máximo de carga en la cámara de giro la tendencia es similar que para un nivel mínimo; sin embargo, el aumento del número de giro no es tan pronunciado. En este caso, el gasto de entrada a la cámara de giro es constante y el nivel máximo de carga permite que nuestro modelo experimental presente el nivel mas bajo de vibración, por consiguiente, el comportamiento es el mejor. El chorro a la salida disminuye su gasto a medida que incrementamos la velocidad de giro.

El nivel medio de carga presenta el rango más estrecho de números de Reynolds de las pruebas de carga estudiadas. El comportamiento del número de giro va en aumento, sin embargo, el número de Reynolds disminuye casi proporcionalmente. Esto debido, a que el gasto másico a la salida de la boquilla va en decremento al aumentar la velocidad de la paleta.



El número de giro es un parámetro adimensional que está muy ligado al tipo de configuración generada a la salida de la boquilla. Analizando los tres niveles de carga se puede concluir que:

- En niveles de carga mínimos las configuraciones generan un tipo de chorro alargado y bastante inestable, debido a las altas velocidades de giro de la paleta.
- Un nivel de carga máximo puede considerarse el más estable por la configuración tipo burbuja y cónica, las cuales están bastante bien definidas y estables.

- Para el nivel de carga medio predomina un tipo de configuración estable de tipo helicoidal, caracterizado por una columna alargada sin gotas satélites.

Finalmente, un trabajo a futuro implica el mejoramiento del modelo experimental y la posibilidad de obtener el par (T), que en el presente modelo experimental se consideró que era igual a cero, con elementos de medición de mayor precisión. Además, cabría la posibilidad de analizar otros factores de influencia, tales como la geometría de la boquilla, mayores niveles de carga y más altos números de giro.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados experimentales obtenidos en el presente trabajo se llegó a las siguientes conclusiones:

Primera, el modelo experimental generó chorros con giro en caída libre a distintas velocidades de salida sin la necesidad de utilizar diferentes tipos y configuraciones de boquillas. Las velocidades a la salida de la boquilla fueron más altas de las que se tenían contempladas. La versatilidad y flexibilidad del modelo permitió estudiar, analizar y visualizar diferentes patrones de flujo con diferentes números de giro.

Segunda, los chorros con giro generados adoptan diferentes patrones de flujo a medida que aumenta la velocidad de giro. En general, tres configuraciones fueron identificadas durante las diferentes velocidades de prueba aplicadas, las cuales debido a la ausencia de alguna clasificación previa se identificaron de acuerdo a su forma geométrica: tipo burbuja, tipo helicoidal y tipo cónico.

Tercera, el chorro a bajo nivel de carga tiene una forma alargada con gotas satélites alargadas. Su rompimiento en gotas heterogéneas se da muchos diámetros corriente abajo del orificio de la boquilla de salida.

Los chorros a media carga se caracterizan por ser alargados sin gotas satélites y tienden a romperse varios diámetros corriente abajo. Este tipo de chorros son bastante estables durante el período de pruebas, manteniendo prácticamente inalterada su forma alargada.

Las altas velocidades en el nivel de carga máximo llevan a un tipo de rompimiento en gotas (término en inglés que es descrito como spread) cónico, que se caracterizó por presentar una burbuja al inicio y alta estabilidad, lo que coincide con lo encontrado por Marshall (1967) en chorros sin giro a altas presiones.

Cuarta, de acuerdo a los resultados obtenidos para el caso particular en estudio, el número de giro es inversamente proporcional al número de Reynolds. Esto es, para un nivel de carga dado, a medida que aumenta el número de Giro tiende a disminuir en número de Reynolds a la salida (ver gráfica 4.1), como una consecuencia del aumento en la pérdida de carga en la boquilla.

APÉNDICE

En este apéndice se obtiene la expresión que relaciona los flujos de cantidad de movimiento angular en la cámara y a la salida de la boquilla.

Sea el volumen de control que se ilustra en la figura A1, en el que se supone una velocidad axial uniforme a la entrada y a la salida, igual a la velocidad media. Se usa un sistema coordenado cilíndrico, donde V_z es la componente axial de la velocidad y V_θ la componente tangencial. Se supone flujo permanente.

Aplicando la ecuación del momento de la cantidad de movimiento,

$$\sum \vec{M}_z \int_{VC} \rho \vec{r} \times \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{r} \times V(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \dots\dots\dots(1A)$$

Que para flujo permanente se reduce a

$$T = \int_1 \rho \vec{r} \times \vec{V} (V \cdot \vec{n}) dA + \int_2 \rho \vec{r} \times \vec{V} (V \cdot \vec{n}) dA \dots\dots\dots(2A)$$

Y tomando en cuenta que:

$$\vec{r} = r \cdot \vec{l}_r$$

$$\vec{V} = V_\theta \vec{l}_\theta + V_z \vec{l}_z$$

Por lo que:

$$\vec{r} \times \vec{V} = rV_\theta \vec{l}_z - rV_z \vec{l}_\theta$$

Se tiene,

$$\vec{T} = \rho \int (rV_{\theta} \vec{\ell}_z - rV_z \vec{\ell}_{\theta})(-V_z) dA + \rho \int (rV_{\theta} \vec{\ell}_z - rV_z \vec{\ell}_{\theta})(V_z) dA \quad \dots\dots\dots(3A)$$

Tomando la componente en z se tiene

$$T_z = \rho \int_0^{R_1} rV_{\theta}V_z(2\pi r)dr - \int_0^{R_2} rV_{\theta}V_z(2\pi r)dr \quad \dots\dots\dots(4A)$$

$$T_z = -2\pi\rho \left[V_{z_2} \int_0^{R_2} r(wr)rdr - V_{z_1} \int_0^{R_1} r(wr)rdr \right] \quad \dots\dots\dots(5A)$$

Que integrando da

$$T_z = -2\pi\rho \left[V_{z_2} w_2 \frac{R_2^4}{4} - V_{z_1} w_1 \frac{R_1^4}{4} \right]$$

$$T_z = -2\rho \left[\frac{\pi R_2^2}{4} \cdot V_{z_2} \cdot w_2 R_2^2 - \frac{\pi R_1^2}{4} \cdot V_{z_1} \cdot w_1 R_1^2 \right]$$

$$T_z = -2\rho \frac{Q}{4} [w_2 R_2^2 - w_1 R_1^2]$$

$$T_z = -\frac{\dot{m}}{2} [w_2 R_2^2 - w_1 R_1^2]$$

$$T_z = -\frac{\dot{m}}{2} [V_{\theta_2} R_2 - V_{\theta_1} R_1]$$

$$T_z = \frac{\dot{m}}{2} [V_{\theta_1} R_1 - V_{\theta_2} R_2] \dots\dots\dots(6A)$$

En el presente trabajo se supone que el par (T) es pequeño, por lo que

Flujo de cantidad de movimiento de entrada = Flujo de cantidad de movimiento a la salida

Se toma el flujo de cantidad de movimiento de entrada en el cilindro de la cámara de giro, debido a que es el que se puede determinar en el experimento.

REFERENCIAS

1. Arai M., Shimizu M., Hiriyasu H., “Breakup length and spray formation mechanism of a high speed liquid jet”, In: Proceedings of the international conference of liquid atomization and spray systems (ICLASS-88) (1988), p.p. 177-184.
2. Blaisot J.B., Adeline S., “Instabilities on a free falling jet Under an internal flow breakup mode regime”, *Multiphase Flow* 29 (2003): 629-653.
3. Brillant P, Chomaz J M, Huerre P, Experimental study of vortex breakdown in swirling jets, *J. Fluids Mech* 376 (1998): pag. 183-219.
4. Chandrasekhar S., “The capillary instability of a liquid jet” In: *Hidrodinamic and Hidromagnetic stability*, Oxford University Press, Oxford, pag. 537-542.
5. Chigier N.A. y Beér J.M., *Combustion Aerodinamics*, (1972), pp. 102-109.
6. Chigier. N., “*spray technology short course*”, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pensilvania, Estados Unidos, 1995.
7. Haenlein, A. *Forsch. Gabiete Ingenieurw.*, *Forschungsheft* 2, (1931), pag. 139; translation, *Nat. Advisory Comm. Aeronaut., Tech. Mem.*, (1932): pag. 659.

8. Hiroyasu H., "Spray breakup mechanism from the hole-type nozzle and its applications. *Atomize Sprays* 10 (2000): pag. 511-521.
9. Lefebvre A.H. "Atomization and spray", Hemisphere, Washington, D.C. (1989),
10. Leroux S. Dumouchel C., Ledoux M., "The stability curve of Newtonian liquid jets", *Atom Sprays* 6 (1996): pag. 623-647.
11. Lin S.P., Reitz R.D., "Drop and spray formation from a liquid jet", *Ann. Rev. Fluid Mech.* 30 (1998): pag. 85-105.
12. Macdonald, J., Private communication (1954), como se cita en Marshall, W. R. Jr., "Atomization and spray drying", Chapter I "Principles of jets breakup", (1967).
13. Marshall, W. R. Jr., "Atomization and spray drying", Chapter I "Principles of jets breakup", (1967).
14. Ohnesorge W. "Formation of drops by nozzles and the breakup of liquid jets" *Z. Angew Math Mech* 16 (1936): pag. 355-358.
15. Panda J. y MacLaughlin DK, "Experiments on the instabilities of a jets of a swirling jet", *Phys Fluids* 6 (1994): pag. 263-276.
16. Plateau, "Statiques des Liquides" (1873), como se cita en Marshall, W. R. Jr., "Atomization and spray drying", Chapter I "Principles of jets breakup", (1967).
17. Prabir Basu, Cen Kefa y Louis Jestin, "Boilers and Burners", Springer (2000), pag. 212-224.

18. Rayleigh Lord, "On the capillary phenomena of jets" Proc. R. Soc. Lond. 29 (1879): pag. 71-97.
19. Rayleigh, Lord, Proc. London Math. Soc., 10 (1878),
20. Tamaki N., Shimizu M., Nishida K., Hiroyasu H., "Effects of cavitation an internal flow on atomization of a liquid jet, Atomiz Sprays 8 (1998): pag. 179-197.
21. Tapia Ramirez Zoili, "Spray Formation in a Twin Fluid atomiser", University of Salford, U.K. Tesis Doctoral (1997), chapter I, II y III.
22. Vágó N., Spiegel Ä., Couty P., Wagner F.R., Richerzhagen, "New Technique for high-speed microjet breakup analysis", Experiments in fluids 35 (2003): 303-309.
23. Vahedi Tafreshi H. y Pourdeyhimi B., "The effects of nozzle geometry on waterjet breakup at high Reynolds Number", Experiments in fluids 35 (2003): 364-371.
24. Weber, W. H. and W.C. Prewett, Proc. Phys. Soc. (London), 62B, (1949), pag. 341.

NOTAS ADICIONALES

Después de analizar las diferentes maneras de generar un giro en un chorro líquido (conductos de inyección tangenciales, boquillas giratorias, etc.) se optó por generar el giro por medio un agitador de paletas antes de la salida de la boquilla. El modelo experimental propuesto tuvo las cualidades de flexibilidad y simplicidad, es decir, no únicamente generó chorros con giro, sino que también permitió variar la velocidad del giro a la salida con relativa facilidad.

PROBLEMAS DEL MODELO Y SU SOLUCIÓN.

Durante la construcción se llevaron a cabo pruebas preliminares antes de llegar al modelo final presentado en este trabajo. Dichas pruebas fueron de gran ayuda ya que permitieron encontrar y corregir oportunamente problemas de funcionamiento y fabricación antes de realizar las mediciones y grabaciones definitivas. Algunos de los problemas más importantes fueron:

1. El acoplamiento y alineación entre motor eléctrico y el agitador mecánico de paleta, y
2. La vibración de la estructura soporte del modelo experimental

Ambos problemas estaban ligados entre sí, debido a que la vibración fue generada por la desalineación entre el motor eléctrico y el agitador de paleta. La solución a esto fue el reforzamiento de la estructura soporte, así como el mejoramiento de la alineación a través de una pieza adecuada de acoplamiento. Con ello se logró minimizar la vibración durante la operación del modelo experimental.

Debe agregarse un problema de vital importancia que influyo durante la grabación de las pruebas experimentales:

3. La iluminación del chorro.

Este factor fue clave para la obtención de imágenes claras y nítidas durante la etapa de grabación del experimento. Después de varias pruebas se pudo comprobar que las mejores imágenes se obtuvieron durante la tarde, cuando la luz natural es menos intensa, ya que una iluminación natural muy intensa genera una imagen del chorro difusa y reflejos de otros objetos. Por otro lado, una iluminación muy pobre provoca que la imagen del chorro fuera casi imperceptible por la cámara. Cabe mencionar que dependiendo de la luz natural (si estaba nublado o soleado el día) se encendía una o dos de las lámparas de 100 Watts utilizadas. Por estas razones, las condiciones de iluminación artificial llegaron a ser esenciales para el buen desarrollo del experimento, sin embargo, es importante aclarar que se consiguió obtener una mejor calidad de imágenes combinando la luz artificial con la luz natural.