

01173
3
Zey

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA

CARACTERIZACION DE COLUMNAS ASCENDENTES CON GIRO
MEDIANTE EL USO DEL ANEMOMETRO DE HILO CALIENTE

POR: LUIS MANUEL CERECEDO FIGUEROA

DIRECTOR: DR. ALEJANDRO F. ROMERO LOPEZ

Ciudad Universitaria, 1995.

FALLA DE ORIGEN



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.

Con todo mi cariño, respeto y admiración a mis padres:

Ing. Jorge Cerecedo Cabrera

Profra. Gloria E. Figueroa de Cerecedo

de quienes aprendí que:

"... todo hombre debe decidir una vez en su vida,
si se lanza a triunfar arriesgándolo todo o si se
sienta a contemplar el paso de los triunfadores.. "

A ellos, mi más profundo agradecimiento.

A mis abuelitos:

Dr. Edmundo Figueroa Sierra.

Enfermera María Natividad Marbán de Figueroa.

A mis hermanos:

Jorge Edmundo.

Gloria Leticia.

Beatriz Eugenia.

de quienes aprendí muchas cosas.

Con todo mi respeto y admiración.

Al Dr. Alejandro Romero, gran amigo y profesor y de quien recibí todo el apoyo para poder presentar el examen de grado.

Al Dr. Francisco J. Solorio O., por su apoyo, ánimo y dinamismo. Mi más sincero reconocimiento, ya que sin su ayuda no hubiera sido posible este trabajo.

A la memoria de Ismael Jaime Moreno L., gracias a quien aprendí la técnica de la anemometría de hilo caliente.

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de México y en especial a la Facultad de Ingeniería, por haberme forjado como una persona útil a la sociedad.

A todos mis compañeros y amigos del Departamento de Termoenergía y M.A. y en especial a:

M. I. Crisanto Mendoza Covarrubias.
M. I. William Vicente y Rodriguez.
Ing. Alejandro Cortés Eslava.
M. I. José Esteban Barrios Bonilla.
Ing. Agustín Hernández Quintero.
Sr. Daniel Ramírez.

quienes me ayudaron con la elaboración de esta tesis, desde montar el experimento hasta la elaboración de gráficas y fotografías.

En general a todos mis compañeros, profesores y amigos con todo respeto.

INDICE

	Pag.
NOMENCLATURA	
INTRODUCCION	1
CAPITULO I. - ANTECEDENTES	
1.1. - DEFINICIONES	4
1.2. - RESEÑA HISTORICA	5
CAPITULO II. - DESARROLLO	
2.1. - PRIMERA ETAPA DE LA INVESTIGACION	33
2.2. - SEGUNDA ETAPA DE LA INVESTIGACION	34
2.2.1. - MODELO EXPERIMENTAL DE LA SEGUNDA ETAPA	34
2.2.2. - EQUIPO DE ANEMOMETRIA	38
2.2.3. - PRIMER PASO SEGUNDA ETAPA	40
CAPITULO III. - RESULTADOS	46
CAPITULO IV. - DISCUSION	63
CAPITULO V. - CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS	70

NOMENCLATURA

- A, B y C = constantes de calibración del anemómetro de hilo caliente
- b = parámetro de adimensionalización de la coordenada radial, definido en las gráficas 23a, 23b y 23c.
- D = diámetro del chorro a la salida.
- E = voltaje medio del anemómetro de hilo caliente.
- E_i, E_r y E_s = voltajes medios en la dirección axial, radial y tangencial, respectivamente.
- e = fluctuaciones del voltaje medio.
- G = w_0 / u_0 .
- I = intensidad de turbulencia.
- K₁ = coeficiente de desvío del sensor de hilo caliente.
- K₂ = coeficiente de inclinación del sensor de hilo caliente.
- m = entrainment.
- q = fluctuaciones de la velocidad media.
- $\frac{1}{2} q^2$ = energía cinética turbulenta.
- R₁ = número de Richardson.
- R = radio del chorro a la salida.
- r = coordenada radial.
- S = grado de giro en un chorro.
- $\text{sqr}(u^2)$ = raíz cuadrática media del cuadrado de la fluctuación de la velocidad en la dirección axial.
- $\text{sqr}(v^2)$ = raíz cuadrática media del cuadrado de la fluctuación de la velocidad en la dirección radial.
- $\text{sqr}(w^2)$ = raíz cuadrática media del cuadrado de la fluctuación

de la velocidad en la dirección tangencial.

U = componente axial de la velocidad media.

U_{err} = velocidad efectiva de enfriamiento.

U_{max} = componente máxima axial en cada estación de medición.

U_{prom} = componente promedio axial de la velocidad media en cada estación de medición.

U_{oprom} = componente promedio axial de la velocidad media a la salida del chorro.

u' = componente axial de la fluctuación de la velocidad.

u_0 = valor de la componente axial a la salida del chorro.

V = componente radial de la velocidad media.

V_{max} = componente máxima radial en cada estación de medición.

v' = componente radial de la fluctuación de la velocidad.

W = componente tangencial de la velocidad.

W_{max} = componente máxima tangencial en cada estación de medición.

w' = componente tangencial de la fluctuación de la velocidad.

w_0 = valor de la componente tangencial a la salida del chorro.

x = coordenada axial.

x_0 = distancia axial desde la salida del chorro = 100.

φ = coordenada tangencial.

ρ = densidad del fluido de trabajo.

INTRODUCCION

La necesidad de evaluar el proyecto ecológico de los "macro-ventiladores", propuesto por el Ing. Heberto Castillo [1], dió la pauta para la realización de esta tesis, denominada "caracterización de columnas ascendentes de aire con giro mediante el uso del anemómetro de hilo caliente".

La propuesta contempló la construcción de 100 chimeneas verticales, de sección circular y diámetro de 35 m cada una, que se distribuirían en la ciudad de México y que crearían pequeños huracanes controlados. Cada huracán sería generado por seis ventiladores industriales, ubicados tangencialmente en la base de cada chimenea, produciendo una corriente ascendente de aire que giraría en la dirección contraria a la de las manecillas del reloj (como se mueve la tierra alrededor del eje polar), con una velocidad axial de 4.5 m/s. Cada chimenea contaría con un quemador dentro de ellas, de alta potencia, localizado en el centro y a nivel del suelo, calentando así el aire cinco grados centígrados por encima de la temperatura ambiente. El consumo de gas de las 100 chimeneas sería del orden de 170 toneladas de gas butano/hr. Con estas características, cada chimenea ecológica sería capaz de extraer $4,330 \text{ m}^3/\text{s}$ que, ya en su conjunto y trabajando todas durante 64 horas seguidas, podrían extraer el aire existente en la ciudad de México ($2,000 \text{ km}^2$ por 50 m de altura), rompiendo así la inversión térmica y anulando la contaminación.

La finalidad de proponer un giro mecánico inicial al chorro de aire caliente para generar un huracán y no un simple chorro que descargue

libre y axialmente a la atmósfera, sería para lograr una estructura coherente y muy estable, análoga a la de los "diablillos" que se observan ocasionalmente en las llanuras y los cuales logran alcanzar alturas típicas hasta de 100 m.

Sin embargo, en todo fenómeno turbulento, existen flujos secundarios que promueven la disipación de energía (tal es el caso de las columnas que descargan a gran velocidad en una atmósfera quieta) y que en condiciones no controladas son indeseables y algunas veces devastadores (como en el caso de los huracanes). Estos flujos secundarios se generan por fluctuaciones en la velocidad y las fluctuaciones dependen del grado de turbulencia existente en el fenómeno. A este grado de turbulencia se le conoce como "intensidad de turbulencia" y se define como:

$$I = \frac{[(1/3)(u^2 + v^2 + w^2)]^{1/2}}{U}$$

donde u , v y w son las fluctuaciones de la velocidad en las direcciones axial, radial y tangencial, respectivamente y U es la velocidad media del flujo.

Cabe señalar, que existen fenómenos donde sí es conveniente que existan tales fluctuaciones, como es el caso de un quemador, donde éstas se aprovechan para un mejor mezclado del combustible con el comburente. Es por esto que se torna importante investigar la magnitud y dirección de la velocidad promedio y las intensidades de turbulencia dentro de un fenómeno como el de las columnas ascendentes.

La aplicación del estudio que se llevó a cabo, no es exclusivo del proyecto del Ing. Heberto Castillo, ya que, con sus respectivas reservas, se podría aprovechar para el análisis en aquellas plantas de generación de energía eléctrica que usan agua para enfriamiento. Dichas plantas descargan horizontalmente agua tibia al mar, a través de un difusor o de una tubería, generándose un chorro que descarga en

una atmosfera quieta y que perjudica a la ecología marina en la zona de mezclado. También es aplicable en la emisión forzada de gases de una chimenea, control de flamas en cámaras de combustión y en ciertos tipos de sprays y quemadores. Aunque estos últimos han sido ampliamente estudiados, cualquier información adicional contribuirá al mejoramiento de estos procesos.

Por lo anterior, este trabajo se enfoca al estudio experimental de los perfiles de velocidades y de las intensidades de turbulencia de las columnas ascendentes de aire, con y sin giro, con la finalidad de contribuir al mejor entendimiento de este tipo de fenómenos. En especial se trata de dar una descripción más detallada de los chorros con giro aguas abajo, cuando el chorro alcanza distancias superiores a 15 veces el diámetro de su base; esta zona ha sido muy poco estudiada dado que, en general, los chorros con giro son generados en escalas pequeñas (como es el caso de un quemador o un spray) y las aplicaciones en escalas grandes y, por lo mismo, distancias considerables (como la descarga del agua de enfriamiento de una central termoeléctrica), han sido poco tratadas.

Para cumplir con los objetivos planteados, se escogió el anemómetro de hilo-caliente como equipo de medición, por sus características generales (resolución, respuesta a la frecuencia, facilidad de transportación, sensibilidad, etc.), para encontrar los perfiles de velocidad promedio y algunas características de la turbulencia de los chorros.

Finalmente, se señala que parte de los resultados experimentales que aquí se presentan, fueron muy importantes en el éxito de la evaluación del proyecto de los ventiladores ecológicos y, de hecho, lograron uno de los objetivos primordiales: conocer las condiciones iniciales de velocidad y turbulencia de un pequeño modelo físico que representaba a una de las chimeneas y que fue construido con el propósito de visualizar el desarrollo del flujo y medir las características cinemáticas y térmicas del chorro así generado.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1.- Definiciones.

Antes de empezar a desarrollar el tema, se dará una pequeña definición de lo que son las columnas de aire.

Se le llama "chorro libre" a una columna de fluido a la que inicialmente se le imparte una cierta cantidad de movimiento y que se hace descargar en una atmósfera quieta y es una fuente de flujos masicos y cantidad de movimiento. Una "pluma" es una columna de fluido que solo ha sido calentada y que presenta efectos de flotación por cambios en la densidad, con lo cual empieza a moverse tan solo por este efecto. Una columna en la que se combinan los dos efectos (calentamiento y cantidad de movimiento inicial) se le conoce como "chorro caliente". Si esta columna descarga verticalmente hacia arriba, entonces se habla de una "columna ascendente".

Técnicamente, el parámetro que diferencia a un chorro de una pluma es el número de Richardson (R_i), el cual relaciona la fuerzas de flotación con las fuerzas de inercia, de tal forma que si en una columna el valor del número de Richardson es cero, entonces se tiene simplemente un chorro, y para el caso de un chorro caliente este valor es constante y diferente de cero, aunque, paradójicamente, el número de Richardson tiene un valor limite, esto es, que no se puede hablar de que en una pluma este número es infinito, sino que, aunque R_i se mantiene constante a lo largo del eje de la columna, el valor converge a 0.6 y es el valor máximo que se pudiera esperar en una pluma [12].

Cuando $0 < R_1 < 0.6$ entonces se trata de un chorro caliente y este valor varia a lo largo del eje principal de la columna.

Tambien se clasifica a las columnas por la componente tangencial de su velocidad y por el tipo de atmósfera en la cual descargan. Si la componente tangencial tiene un valor nulo entonces se dice que la columna no tiene giro y simplemente se le llama "columna sin giro", pero si tiene un valor cualesquiera distinto de cero, entonces se dice que la columna tiene giro y se habla de una "columna con giro".

El grado de giro en un chorro se caracteriza por el llamado número de giro (swirl number), que es un número adimensional que caracteriza a un chorro con giro. Si este número tiene un valor de cero, entonces sabemos que se trata de un chorro sin giro. Este grado de giro se define como la relación entre el flujo axial del momento angular y el flujo axial del momento lineal multiplicado por el radio a la salida del chorro. Usando un sistema coordenado (x, r, ϕ) , se puede expresar como:

$$S = \frac{\int \rho U_\phi W r^2 dr}{R \int \rho (U^2 - 0.5W^2) r dr}$$

donde ρ es la densidad del fluido de trabajo, U_x y U_ϕ son las componentes axial y tangencial de la velocidad, respectivamente, r es la coordenada radial y R es el radio del chorro a la salida.

Con esta pequeña definición de los términos chorro y pluma y columna con y sin giro, se comenzará por citar algunas investigaciones antecedentes que existen sobre el comportamiento general de dichas columnas.

1.2. - Reseña Histórica.

Existe mucha bibliografía referente al tema de las columnas ascendentes que descargan libremente en una atmósfera quieta, mas ésta, en su gran mayoría, se refiere a chorros sin giro. Por esta

razón sólo se mencionarán algunos de los muchos trabajos existentes y sus principales resultados obtenidos. En lo que respecta al comportamiento de las columnas ascendentes con giro (swirling), que descargan en una atmósfera quieta, ha habido pocos estudios, en comparación con los numerosos que se han llevado a cabo en chorros con giro pero que descargan horizontalmente. Sin embargo, a pesar de la poca bibliografía, también ha habido investigaciones exitosas sobre este tema.

1.2.1.- Experimento de W.G. Rose [2].

Entre las investigaciones experimentales pioneras acerca del tema de los chorros, se encuentra el trabajo de W.G. Rose [2], quien hace las primeras observaciones sobre el comportamiento de los chorros, tanto con giro como sin él. Para generar el chorro con giro usó un tubo de 17/32 in de diámetro por 100 veces esa misma cantidad de largo, montado en cojinetes que le permitían girar a muy alta velocidad. Por medio de bandas se acopló un motor para proporcionar el giro, mientras el aire se suministraba mediante un soplador a una velocidad aproximada de 50 ft/s a la salida, lo que permitió un número de Reynolds de 1.5×10^4 . La velocidad angular del tubo se mantuvo constante a 9,500 rpm, o sea que la investigación se llevó a cabo a una sola velocidad de giro del chorro. El aparato de medición consistió en un anemómetro de hilo caliente de dos canales y un sensor de dos hilos con arreglo en X, con el cual obtuvo velocidades promedio e intensidades de turbulencia en las tres direcciones del flujo (axial, radial y tangencial). Los resultados que presenta Rose, son considerados como la base de todas las investigaciones hechas desde entonces y hasta la fecha, sobre el tema de las columnas ascendentes (con y sin giro). Dentro de estos resultados el autor presenta la variación del ángulo de la dirección principal del flujo, donde se observa cómo influye el *entrainment* en ambos chorros (con y sin giro).

El *entrainment* es el flujo másico que cruza una sección en dirección perpendicular al eje del chorro, en otras palabras, es la "entrada" de fluido de los alrededores del chorro desde las fronteras del mismo hacia adentro de la corriente turbulenta principal y que, como consecuencia, provoca un incremento en el flujo volumétrico del

chorro. Esta cantidad se acostumbra a denotarla con el símbolo m y matemáticamente se define, para chorros circulares, como:

$$m = \int 2\pi \bar{\rho} \bar{u} y dy$$

Para el caso del chorro sin giro se obtiene que la relación entre la velocidad radial y la velocidad axial, aumenta muy rápidamente en la dirección radial, mientras que para el caso del chorro con giro esta relación va aumentando en menor proporción conforme aumenta la coordenada axial (ver figura 1).

Otros resultados, de mucha trascendencia, son los perfiles de velocidad media e intensidades de turbulencia que presenta Rose de dos formas: con la distancia radial adimensionalizada y sin adimensionalizar. Todas las velocidades son adimensionalizadas con la velocidad axial máxima en el eje del chorro a la misma coordenada axial y la distancia radial con la distancia b , distancia en la cual se encuentra la mitad de la magnitud de la velocidad máxima (ver figura 23a). Para ambos casos se puede observar claramente la evolución de los perfiles de velocidades en los dos chorros, tanto con giro como sin él (ver figura 2).

La conclusión principal de la investigación es que, los resultados numéricos de las ecuaciones de conservación, que Rose resuelve, alcanzan su estado asintótico a partir de una altura de 15 veces el diámetro, es decir, que después de esta altura los valores medios de la velocidad axial coinciden tanto experimental como numéricamente, mientras que las componentes radial y axial difieren bastante con los valores experimentales (ver figura 3).

1.2.2. - Experimento de F.P. Ricou y D.B. Spalding [3]

Un trabajo no menos importante y pionero también, es el de F.P. Ricou & D.B. Spalding [3], donde estudian el comportamiento del *entrainment*.

El principio fundamental en el que se basaron para encontrar el valor de este flujo, es el hecho de que, en un chorro, la presión es

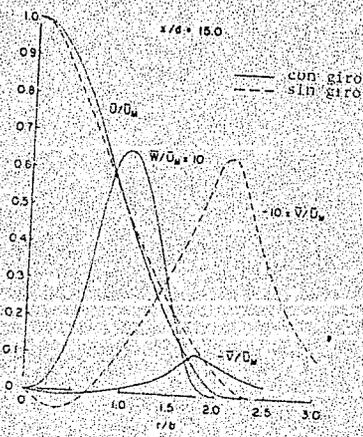
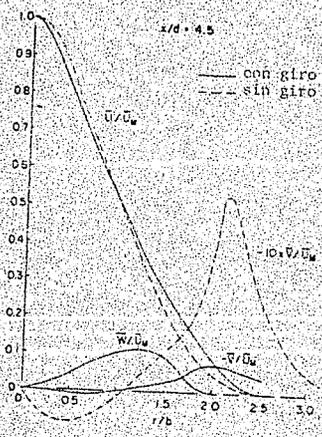
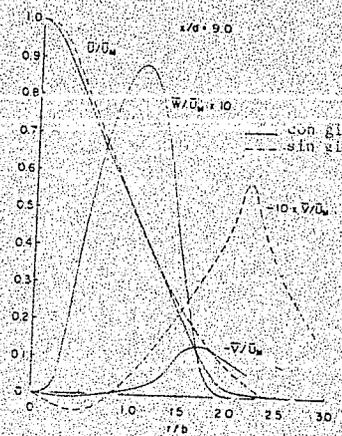
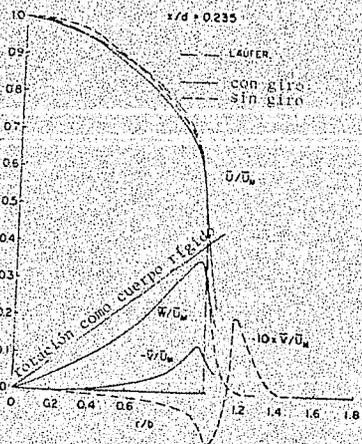


FIGURA 1. VARIACION DE LAS TRES COMPONENTES DE LA VELOCIDAD MEDIA A DIFERENTES DISTANCIAS DE LA SALIDA DEL CHORRO.

(W.G. ROSE, 1962 [2])

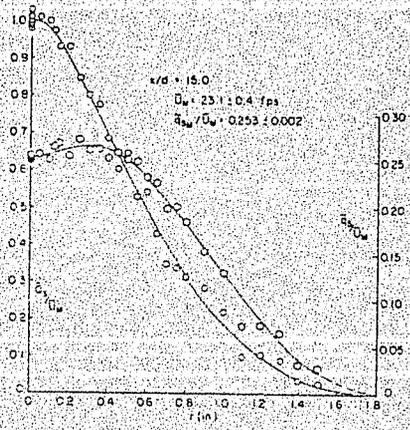
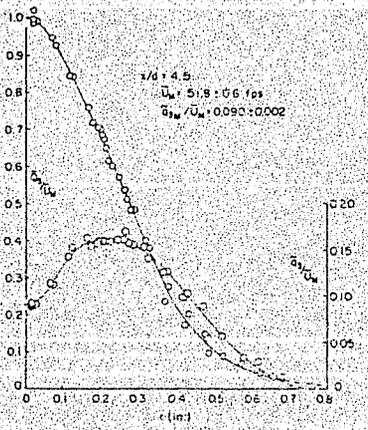
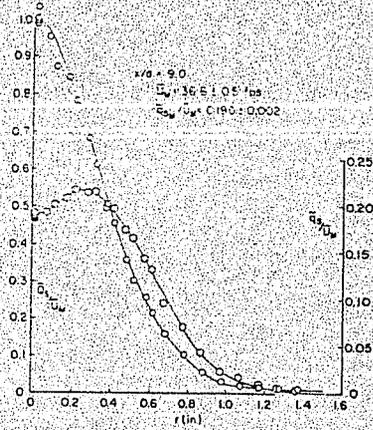
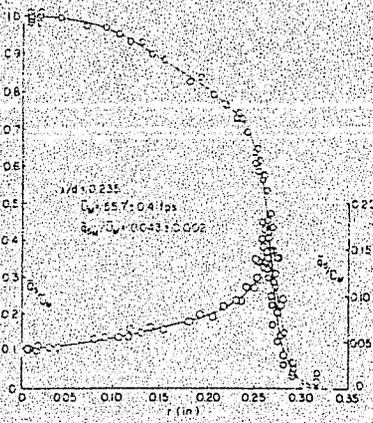


FIGURA 2a. EVOLUCION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD MEDIA
 E INTENSIDADES DE TURBULENCIA DE UN CHORRO SIN GIRO
 A DIFERENTES DISTANCIAS DE LA SALIDA DEL CHORRO.
 (W.G. ROSE, 1962 (21))

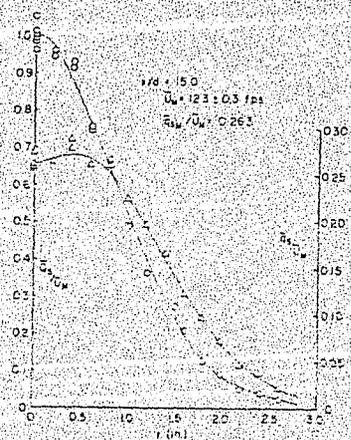
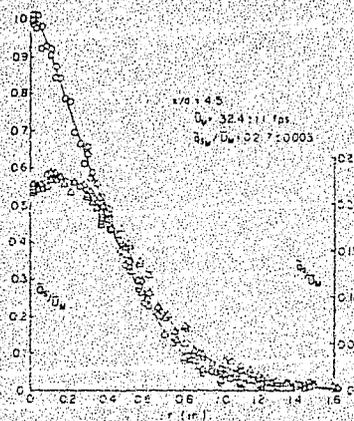
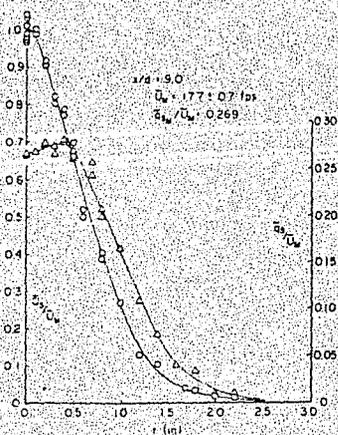
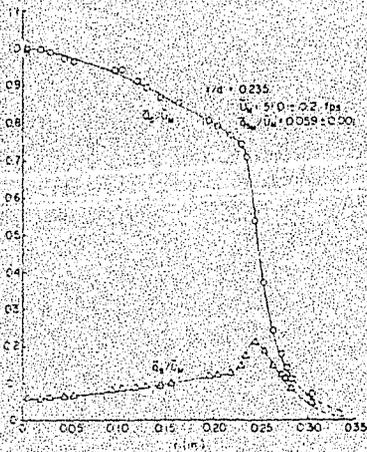


FIGURA 2b. EVOLUCION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD MEDIA
 E INTENSIDADES DE TURBULENCIA DE UN CHORRO CON GIRO
 A DIFERENTES DISTANCIAS DE LA SALIDA DEL CHORRO.

(W.C. ROSE, 1962 [2])

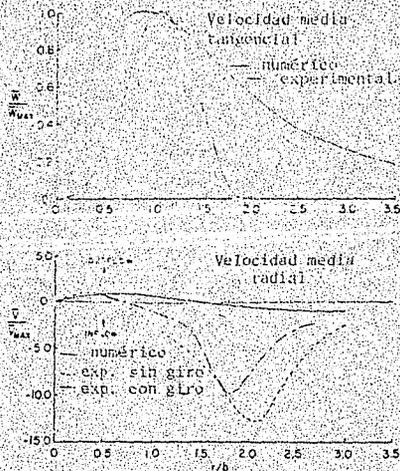


FIGURA 3. COMPARACION DE LOS RESULTADOS NUMERICOS CON LOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR W.G. ROSE. (W.G. ROSE, 1962 [2])

uniforme excepto en la vecindad del eje de este, pero al impedir la entrada radial del flujo ambiente al flujo principal (para evitar el *entrainment*), el flujo ambiente se ve obligado a fluir solo axialmente, alterando los gradientes de presión axial. Sin embargo, si las paredes que confinan al chorro son porosas y por ellas se inyecta fluido ambiente en forma radial y si dicho flujo es igual a la cantidad que debería pasar en ausencia de la pared, entonces el gradiente de presiones axial generado por el flujo axial entrante, tiende a desaparecer. Por lo anterior, el experimento consistió en generar un chorro dentro de una cámara que aislaba al flujo principal de cualquier flujo ambiente. Esta cámara con paredes porosas, a su vez, se encontraba dentro de otra cámara donde era inyectado el flujo radialmente (ver figura 4). En esta segunda cámara se tenía la posibilidad de variar el flujo inyectado para lograr que los gradientes de presiones axiales desaparecieran. De esta manera, cuando los gradientes de presiones axiales desaparecían, el flujo másico era medido y se consideraba que éste era igual a aquel que debería entrar si el chorro no se encontrara encerrado, definiéndose así el valor del *entrainment*.

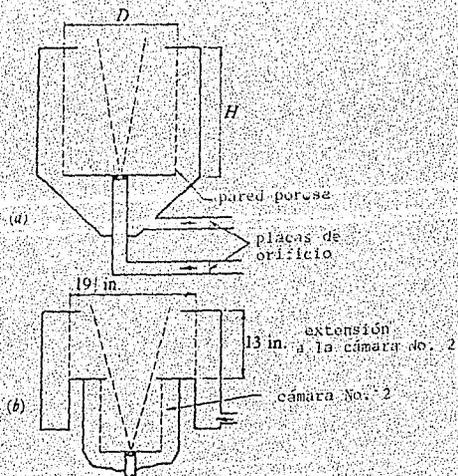


FIGURA 4. EQUIPO EMPLEADO POR RICOU Y SPALDING EN SU INVESTIGACION. a) DIMENSIONES DE LAS TRES CAMARAS. b) CAMARA No. 2 (RICOU Y SPALDING, 1961 [3])

Los resultados obtenidos son muy importantes y muestran como varia m_1/m_0 (flujo másico de aire ambiente que entra al chorro para contrarrestar el efecto en el gradiente de presiones axial entre el flujo másico que genera el chorro), con respecto al número de Reynolds. En la figura 5 se observa que la relación de flujos másicos se comporta (aproximadamente) constante, a partir de un número de Reynolds de 2.5×10^4 .

Otros resultados interesantes son las variaciones de m/m_0 (el flujo másico total, que es la suma de m_1 más m_0 , entre el flujo másico necesario para generar el chorro), con respecto a la diferencia de densidades entre el fluido ambiente y el fluido que genera al chorro (figuras 6). Estas gráficas nos muestran el comportamiento del flujo que entra al chorro para diversos casos y diversos fluidos (aire en aire, propano y dióxido de carbono en aire e hidrógeno en aire, entre otros), tanto en frío como en caliente.

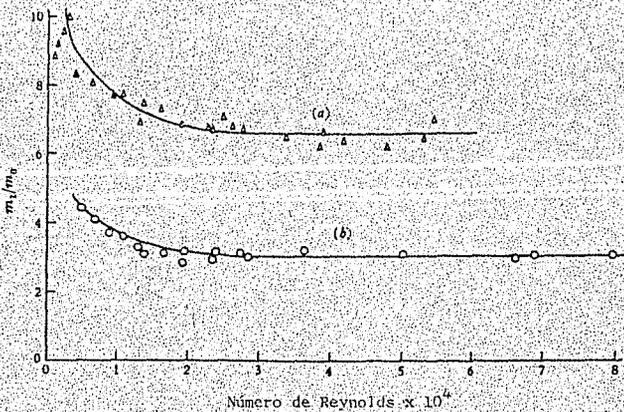


FIGURA 5. VARIACION DEL ENTRAINMENT CON EL NUMERO DE REYNOLDS. a) CAMARA No.1; b) CAMARA No.2 (RICOU Y SPALDING, 1961 [3])

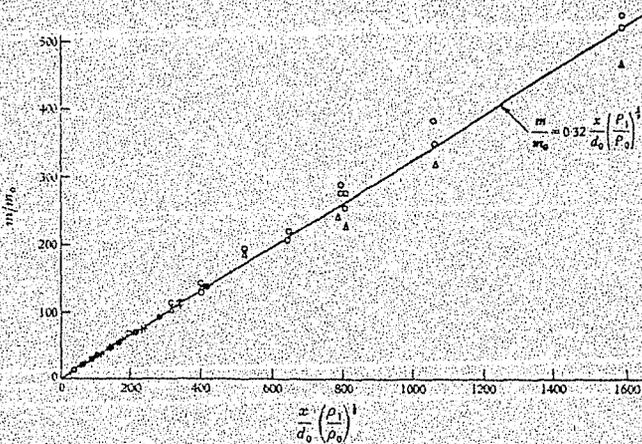


FIGURA 6. VARIACION DEL ENTRAINMENT CON LA DISTANCIA AXIAL. a) AIRE EN AIRE; b) + PROPANO Y DIOXIDO DE CARBONO EN AIRE; c) HIDROGENO EN AIRE. (F.P. RICOU Y D.B. SPALDING, 1961 [3])

1.2.3.- Experimento de L.J.S. Bradbury [4].

Posteriormente L.J.S. Bradbury [4] hace un análisis sobre la estructura de autopreservación en un chorro plano de sección transversal rectangular. Bradbury propone que la condición para que un chorro presente autopreservación es que la velocidad de este, sobre su línea central de flujo, debe ser mucho más grande que la velocidad de la corriente libre que lo rodea. Para el caso de un chorro que descarga en una atmósfera quieta, la velocidad de la corriente libre que lo rodea es igual a cero. Para evitar problemas en la medición, debidos a turbulencias en las orillas del chorro, Bradbury [4] generó un chorro plano (sección transversal rectangular con 3/8 in de espesor), el cual no descargaba en una atmósfera quieta, sino que descargaba en una corriente paralela al eje axial del chorro y cuya magnitud de velocidad (U_1) era menor que la del chorro (U_2) a la salida. Las mediciones de la velocidad promedio se hicieron con tubo de Pitot y las de presión estática con un tubo estático. Las de las intensidades de turbulencia se llevaron a cabo con un anemómetro de hilo caliente con sensores de un solo hilo. Los experimentos se realizaron con relaciones, entre la velocidad de la corriente libre y la del chorro, de $U_1/U_2 = 0.07$ y 0.16 y para ambos casos el número de Reynolds basado en la velocidad de salida del chorro (U_2) fue de 3×10^4 . Los resultados que presenta se refieren a los perfiles de velocidad media, las intensidades de turbulencia, la presión estática, los esfuerzos de Reynolds, distribuciones de energía cinética turbulenta (definida como $q^2 = u^2 + v^2 + w^2$); y presenta una gráfica muy interesante donde se muestra el comportamiento de cada uno de los términos que aparecen en la ecuación de la energía turbulenta (ver figura 7).

Como conclusiones finales se encuentra que para este tipo de chorros, que descargan en una corriente libre, la distancia a la cual la autopreservación se presenta, es mayor que para el caso de los chorros que descargan en una atmósfera quieta. Esto es, aproximadamente $x/h = 70$, donde x es la coordenada axial y h el espesor del chorro. Para el caso de la estructura turbulenta, la autopreservación apenas comienza en $x/h = 30$ y ésta permanece durante más de ciento sesenta veces el ancho del chorro (h).

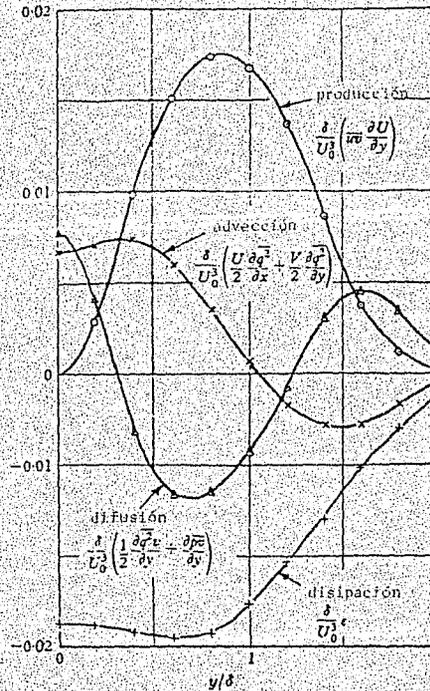


FIGURA 7. BALANCE DE LA ENERGIA TURBULENTE. (BRADBURY, 1965)

1.2.4.- Experimento de N.A. Chigier y A. Chervinsky [5]

En 1967 N. A. Chigier y A. Chervinsky [5] realizan una importante investigación en chorros con y sin giro, la cual, junto con el trabajo de Rose [2], han sido considerados como base de este tema. Para lograr el giro en el chorro mezclan aire, tanto axial como radialmente, dentro de un tubo (ver figura 8). Cuando querían observar el chorro libre sin giro tan sólo inyectaban aire axialmente y el máximo giro en el chorro lo lograron cuando sólo inyectaban aire tangencialmente.

El aparato de medición consistió de un sensor esférico de cinco orificios tipo Pitot, por lo que tan sólo presentan resultados de los perfiles de velocidad media y no de las intensidades de turbulencia. La estaciones axiales de medición se llevaron a cabo a 0.2, 1.0, 2.0,

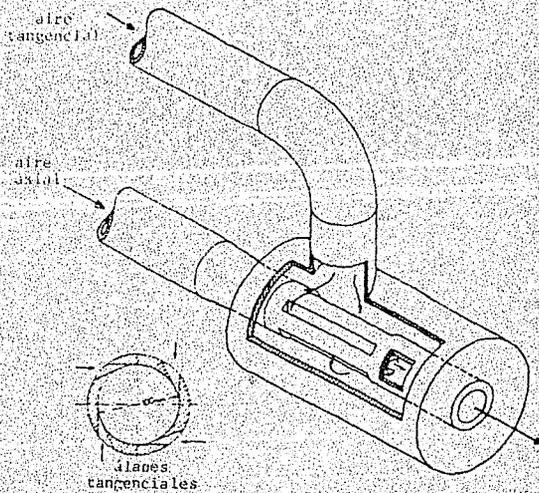


FIGURA 8. GENERADOR DE GIRO EMPLEADO EN EL TRABAJO DE CHIGIER Y CHERVINSKY. (CHIGIER Y CHERVINSKY, 1967 [5])

4.1, 6.2, 8.3, 10.0 y 15.0 veces el diámetro de salida. La presión estática se obtuvo por medio de un multi-manómetro inclinado, con alcohol como fluido manométrico.

A diferencia del trabajo de Rose [2], Chigier y Chervinsky [5] estudiaron varios grados de giro en el chorro (degree of swirl), cubriendo toda una gama de chorros que van, desde sin giro a giro débil, moderado y hasta giro fuerte.

Dentro de sus resultados, Chigier y Chervinsky presentan la distribución radial de las componentes axial y tangencial de la velocidad media, la distribución radial de la presión estática y la variación del *entrainment* respecto al grado de giro del chorro. Una gráfica importante, por su forma, es el perfil de velocidades axiales (ver figura 9), en donde presentan cómo es el cambio en la forma de éstos, conforme el grado de giro aumenta. Se observa claramente que, entre mayor sea el giro, se presenta una zona de baja presión que hace que el valor máximo de la velocidad axial se desplace del centro.

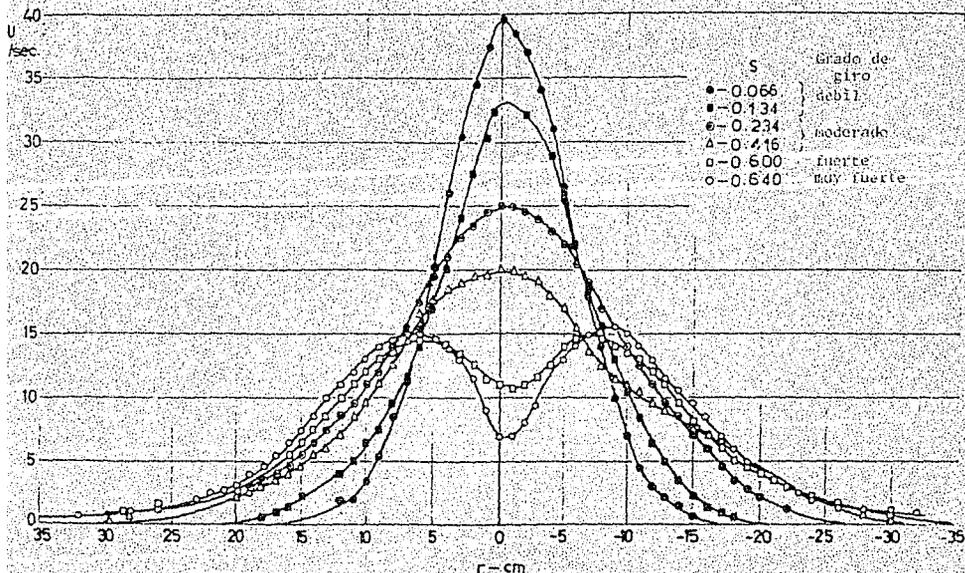


FIGURA 9.- DISTRIBUCION RADIAL DE LA VELOCIDAD ($x/D = 4.1$)

(N.A. CHICIER Y A. CHERVINSKY, 1967 (5))

1.2.5.- Experimento de I. Wagnanski y H. Fiedler [6].

Dos años después, I. Wagnanski y H. Fiedler [6] realizan otro estudio sobre la autopreservación en un chorro. Para lograr sus objetivos hacen uso de un anemómetro de hilo caliente, tanto con sensores de un solo hilo como con sensores con arreglo en X y la señal es analizada mediante amplificadores integrales. Con la finalidad de disminuir el error de medición, se usaron tres integradores al mismo tiempo procesando cada señal de distinta manera.

El estudio se llevó a cabo en un chorro sin giro y a temperatura ambiente y que descargaba a la atmósfera con un número de Reynolds de 10^5 a la salida de una tobera de 1.04 in. Los resultados se refieren a los perfiles de velocidad media e intensidades de turbulencia, esfuerzos de Reynolds y un análisis minucioso sobre las macro y microescalas de la turbulencia presentes en el fenómeno. Con base en

la ecuación general de la cantidad de movimiento, realizan un análisis de todos los términos involucrados y, manipulando un poco la ecuación, encuentran los términos que intervienen en la ecuación de la energía turbulenta en coordenadas cilíndricas. Con la ecuación de la energía turbulenta, analizan todos los órdenes de magnitud, validando y desechando teorías acerca del comportamiento turbulento y la autopreservación de un chorro.

1.2.6 - Experimento de B.D. Pratte y J.F. Keffer [7].

B.D. Pratte y J.F. Keffer [7], hacen una interesante investigación sobre los chorros con giro. El giro en el chorro se logra, como en el caso de Rose [2], por medio de un tubo giratorio. En esta ocasión la velocidad de giro se mantuvo a 8700 rpm. El tubo tenía 23 in de largo y 0.493 in de diámetro interno. El aire fue suministrado por un ventilador, de tal manera que el número de Reynolds a la salida fue de 2,300. Las mediciones se hicieron con un anemómetro de hilo caliente a temperatura constante. La energía cinética turbulenta la midieron con un analizador de espectros, conectado directamente a la salida del anemómetro de hilo caliente. Para medir la presión estática usan un manómetro convencional, sin embargo, en las regiones del flujo donde el vector velocidad cambiaba significativamente, la posición correcta del manómetro la encuentran haciendo uso de un pequeño disco que tenía orificios independientes en cada lado, el cual rotaba hasta que las lecturas de cada orificio eran iguales y en ese momento se localizaba la dirección correcta. La investigación se concreta a chorros fríos con y sin giro.

Dentro de los resultados que presentan sobresalen: los perfiles de velocidades media e intensidades de turbulencia, los esfuerzos de Reynolds, la presión estática media a lo largo del eje del chorro y un espectro normalizado de la energía cinética. Otro resultado no menos interesante es el ángulo con el cual el chorro se abre a lo largo de la coordenada axial (figura 10), observándose como: entre mayor sea el grado de giro mayor es este ángulo.

Desafortunadamente el chorro con giro estudiado, sólo se llevó a cabo a un solo grado de giro y aunque se comparan con otros trabajos, sus

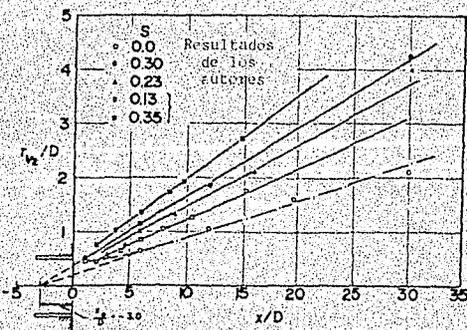


FIGURA 10. DIFUSIÓN RADIAL DE LOS CHORROS.

(B.D. PRATTE Y J.F. KEFFER, 1972 [7])

resultados y conclusiones sólo se concentran a un valor de S .

1.2.7. - Experimento de E.J. List y Jörg Imberger [8].

E.J. List y Jörg Imberger [8], en 1973, realizan un estudio teórico sobre el *entrainment*. Plantean las controversias existentes en el uso del concepto *entrainment* dentro del análisis de plumas y chorros calientes y la cuestión, que todavía permanecía irresoluble, en cuanto a cuál sería el coeficiente más apropiado de *entrainment* usado para el correcto diseño ingenieril. Simplemente hacen un razonamiento dimensional y lo acoplan a los resultados experimentales obtenidos hasta la fecha, los cuales mostraban que no existe un coeficiente de *entrainment* único para el caso de los chorros calientes que descargan verticalmente hacia arriba. Con su deducción encuentran que el comportamiento de los chorros calientes que descargan en una atmósfera quieta se gobiernan por una función de *entrainment* y una función de flotación, que son funciones del número de Froude. Para chorros calientes axisimétricos, la función de *entrainment* es una función lineal dependiente del inverso del número de Froude y la función de flotación es una constante de valor 1.16.

1.2.8. - Experimento de Jai P. Narain [9].

Con base en los trabajos de Rose [2] y de Pratte y Keffer [7], en 1974 Jai P. Narain [9] publica los resultados obtenidos en su estudio de las plumas turbulentas sumergidas con poco giro. La finalidad de este estudio es la de dar una respuesta al diseño ecológico de las descargas de agua caliente que se presentan en una planta térmica de generación de energía eléctrica. Este trabajo consiste en resolver las ecuaciones de conservación numéricamente. Estudia como es el desarrollo del chorro para varios grados de giro y para varias profundidades de descarga. Para lograr su objetivo, el modelo matemático lo calibra con algunos datos obtenidos por Chigier y Chevinsky [5] y sus resultados los compara con los obtenidos por Rose [2] y Pratte y Keffer [7].

La conclusión a la que llega es conveniente generar un pequeño giro en el chorro de la descarga con la finalidad de que la máxima temperatura alcanzada en el eje del chorro se presente lo más cerca del orificio de la descarga y así, la transferencia de calor se lleve a cabo en un zona pequeña.

1.2.9. - Experimento de C.J. Hendricks y J.A. Brighton [10].

Dentro de los tantos trabajos que se encuentran en la literatura sobre el comportamiento de los chorros turbulentos, existen bastos estudios de chorros que se encuentran confinados y que, como en el caso de la investigación hecha por Bradbury [4], descargan en una corriente libre y no en una atmósfera quieta. Estos estudios han surgido por la necesidad de mejorar el mezclado de un combustible con un comburente dentro de un quemador o en una cámara de combustión. Un trabajo muy representativo de este tipo de flujos es el realizado por C.J. Hendricks y J.A. Brighton [10], donde, mediante un modelo matemático, tratan de predecir el comportamiento del mezclado de un chorro que descarga en una corriente fluida. El modelo matemático es un modelo en diferencias finitas, las cuales se obtienen por expansión en series de Taylor. La finalidad del trabajo es el dar un mayor panorama en el diseño de quemadores y cámaras de combustión. El estudio llega a demostrar que el hecho de impartir un giro al chorro, provoca que el mezclado se lleve a cabo de mejor forma y en una menor distancia que para el caso de un chorro sin giro, lo que podría disminuir el tamaño

de un quemador y aumentar la eficiencia de la combustión.

1.2.10. - Experimento de Nikolas E. Kotsovinos [12]

Posteriormente, Nikolas E. Kotsovinos [12] publica algunos resultados sobre las características de las fluctuaciones de temperatura en chorros y en plumas. Estos resultados sólo fueron obtenidos en su parte térmica y no en la cinemática, es decir, que sólo analiza las fluctuaciones de la temperatura. Las columnas fueron generadas al descargar agua caliente a través de un orificio de diámetro variable (de 0.2 a 2 cm) dentro de un tanque de 4 m X 4 m de área por 1 m de profundidad. Para medir estas características térmicas, usa un conjunto de termistores acoplados a un puente y la señal se alimenta a un sistema de adquisición de datos en una computadora digital. Demuestra cómo las plumas presentan autopreservación de sus características térmicas, mientras que los chorros calientes no. En estos últimos, las fluctuaciones de temperatura se incrementan substancialmente conforme se incrementa la distancia de salida de la columna, por lo cual la autopreservación no se presenta. La conclusión principal es que las estructuras turbulentas-térmicas de las columnas (chorros y plumas) no son iguales, por lo que no se deben tratar de la misma forma.

1.2.11. - Experimento de K. Hayashi y M.C. Branch [13]

K. Hayashi y M.C. Branch [13] reportan resultados de perfiles de velocidades media, concentraciones de partículas, distribuciones de tamaño de partícula y formas de las ondas de choque en un chorro que descarga en una atmósfera quieta y que lleva partículas en suspensión. Muestran cómo aumenta la concentración de estas partículas en el centro del chorro y cómo los perfiles de concentraciones de partículas tienen la misma forma que los perfiles de velocidades, nada más que, en estos últimos, los perfiles son más angostos que los primeros. Con un tubo isocinético miden la velocidad media del chorro a la salida de la tobera y al mismo tiempo toman una muestra del aire con las partículas suspendidas. Observan la muestra en un microscopio electrónico y analizan la distribución del tamaño de partículas.

Concluyen que la concentración de partículas está íntimamente relacionada con la velocidad del chorro y también con la forma de la tobera de salida. Su estudio lo llevan a cabo a velocidades de 0.2, 0.8 y 1 veces el número de Mach.

1.2.12.- Experimento de L. Paulsen [14].

Un trabajo muy útil para los investigadores experimentales, que basan sus resultados en anemómetros de hilo caliente, es el llevado a cabo por L. Paulsen [14]. En este trabajo se hace un análisis de las características del equipo de calibración DISA 55D90 para anemómetros de hilo caliente. Presenta los perfiles de velocidad e intensidades de turbulencia para cada tobera con las que cuenta dicho equipo. El chorro generado a la salida de estas toberas presenta características que deben ser tomadas en cuenta al momento de calibrar un sensor de hilo caliente, con lo que, todo aquel investigador que desee realizar una buena calibración de su instrumento de medición, deberá asegurarse de que el sensor se encuentre en el "corazón del chorro", que es la zona donde el chorro presenta flujo laminar y por lo tanto la turbulencia es nula. Estos resultados ubican esta zona y previenen riesgos de mala o "falsa" calibración.

1.2.13.- Experimento de Satoru Komori y Hiromasa Ueda [15].

Por sus características turbulentas, los chorros han sido muy estudiados para conocer la capacidad de mezclado entre dos o más sustancias y así aprovechar la difusión que se genera de una especie en otra. Tal sería el caso de una chimenea que descarga diferentes sustancias y éstas a su vez, se esparcen en la atmósfera. Un trabajo que se ha enfocado a este tipo de investigaciones, es el de S. Komori y H. Ueda [15], donde investigan experimentalmente, los efectos de la turbulencia dentro de una reacción química. La reacción que consideran es de segundo orden y unidireccional entre el ozono (O_3) y el monóxido de nitrógeno (NO). El experimento consiste en generar un chorro de monóxido de nitrógeno (diluido en aire) y descargarlo en una pequeña corriente de baja velocidad de ozono diluido. Las intensidades de turbulencia se midieron con un anemómetro laser de efecto Doppler y las concentraciones con un detector quemiluminiscente para el caso del

monóxido de nitrógeno y un filtro ultravioleta para el ozono.

La conclusión principal a la que llegan es que la turbulencia, en gran medida, promueve la reacción química entre dos sustancias.

1.2.14. - Experimento de Chwen Yuan Guo y W. Hall C. Maxwell [16].

Para 1984 Chwen Yuan Guo y W. Hall C. Maxwell [16] realizan un estudio sobre las características de un chorro plano, sumergido y turbulento. Hacen un estudio numérico con un modelo de turbulencia K- ϵ y encuentran: la variación de la velocidad axial en el centro del chorro, la distribución radial de la viscosidad de remolino (eddy viscosity), los esfuerzos cortantes, las componentes axial y tangencial de la velocidad y la vorticidad. Parten de la hipótesis de la "longitud de mezcla de Prandtl" y derivan las formulaciones correspondientes de la función de corriente, vorticidad, viscosidad de remolino y esfuerzos de Reynolds. También presentan el esquema de diferencias finitas que usan para resolver las ecuaciones simultáneamente. Concluyen que sus aproximaciones son suficientemente exactas y más adecuadas, por el hecho de que, los métodos que se basan en las leyes de similitud, consideran patrones de flujo lineales, mientras que su formulación no, y por lo tanto, mejora el diseño en la ingeniería.

1.2.15. - Experimento de Satoru Komori y Hiromasa Ueda [17].

Un año más tarde S. Komori y H. Ueda [17] enfocan sus estudios a encontrar una estructura coherente en la región de auto-preservación de un chorro libre sin giro. Su objetivo lo logran generando el chorro en una tobera de 1 cm de diámetro y haciéndolo descargar dentro de una corriente libre de baja velocidad ($U = 0.15$ m/s). El chorro descarga a 16.1 m/s, con lo cual el número de Reynolds a la salida de la tobera fue de 9,280. Para medir la velocidad media y las intensidades de turbulencia usan un anemómetro láser y para medir las temperaturas un termómetro de hilo caliente. Los resultados que obtienen, respaldan la existencia de una estructura vorticosa coherente en la región de autopreservación del chorro (que para este caso resultó encontrarse entre $43 < x/D < 47$ (ver figura 11)). Esta estructura se genera por

los movimientos turbulentos fuertes desde adentro del chorro hacia el ambiente (corriente libre) y por el *entrainment*.

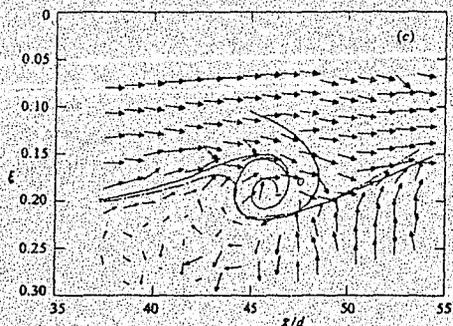


FIGURA 11. ESTRUCTURA VORTICOSA ENCONTRADA POR KOMORI Y UEDA EN UN CHORRO LIBRE. (S. KOMORI Y H. UEDA, 1985 [17])

Por este efecto, en esta zona se presenta un patrón de los esfuerzos de Reynolds tal que se pueden observar valores negativos (ver figura 12).

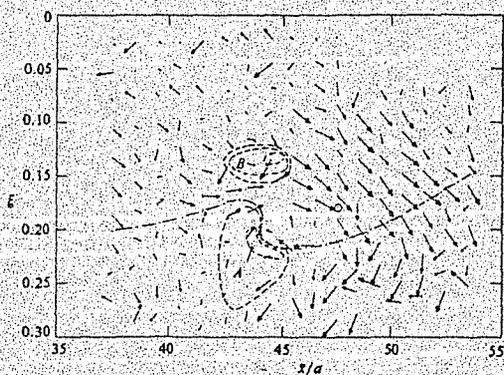


FIGURA 12. PATRON DE ESFUERZOS DE REYNOLDS PROMEDIO OBTENIDOS POR KOMORI Y UEDA. (S. KOMORI Y H. UEDA, 1985 [17])

En este mismo año, S. Komori y H. Ueda [18] continúan sus experimentos en chorros que descargan en una corriente libre. Esta vez analizan la estructura turbulenta de un chorro con giro fuerte, con giro medio y sin giro, haciendo uso, otra vez, de un anemómetro láser y de un termómetro de hilo caliente para medir la temperatura. El trabajo es teórico-experimental, aprovechando los resultados experimentales para calibrar un modelo matemático K- ϵ .

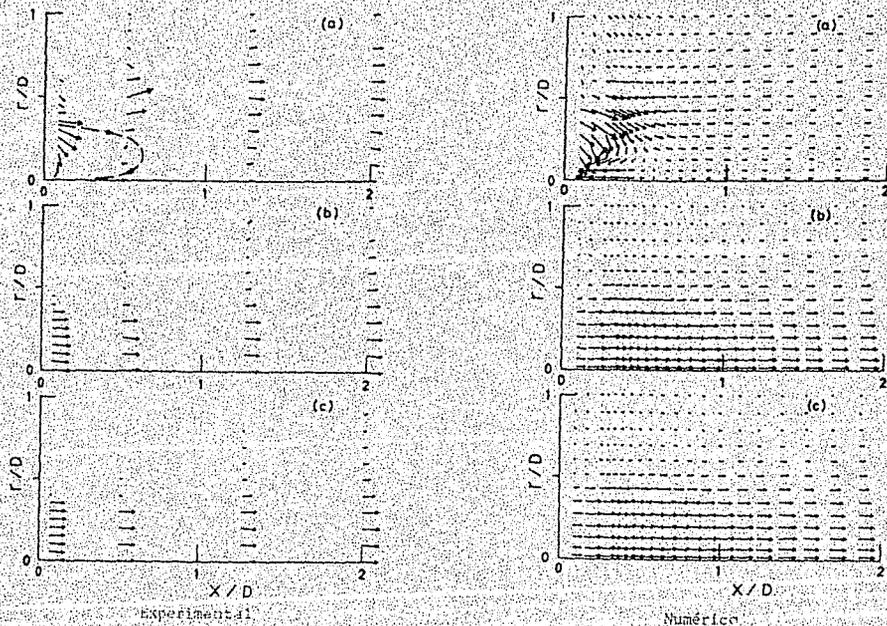


FIGURA 13. ORIENTACION DE LOS VECTORES DE LA VELOCIDAD MEDIA DENTRO DEL CAMPO DE FLUJO. (S. KOMORI Y H. UEDA, 1985 [18])

El giro del chorro lo logran como en el caso de Rose [2] y el de Pratte y Keffer [7] (haciendo girar un ducto a gran velocidad), nada más que en este caso, el conducto giratorio está acoplado a una tobera convergente de 4 cm de diámetro. Para lograr varios números de giro,

hacen variar la velocidad de giro del ducto (a cero rpm para el caso de un chorro sin giro y a 200 y 1,000 rpm para el caso de un chorro con giro). La investigación se concentró en una zona muy cercana a la tobera de salida donde $x/D \leq 15$. En sus resultados muestran la distribución de velocidades, temperaturas, presión estática y energía cinética turbulenta a lo largo del eje del chorro, los esfuerzos de Reynolds y también presentan unas gráficas muy interesantes sobre el comportamiento de los vectores de la velocidad dentro del campo de flujo (ver figura 13). Estas figuras fueron obtenidas tanto con valores experimentales como por medio de su análisis teórico.

La conclusión principal a la que llegan es que entre mayor sea el grado de giro en el chorro, la energía turbulenta se disipa más rápidamente, mientras que a menor grado de giro (e incluso sin giro), la energía turbulenta toma mayor tiempo y distancia en hacerlo.

1.2.17. - Experimento de J.W. Elsner y L. Kurzak [19].

También sobresalen los estudios llevados a cabo por J.W. Elsner y L. Kurzak [19], donde realizan una investigación muy completa sobre el comportamiento de los chorros con y sin giro y con y sin calentamiento. Con la finalidad de lograr diferentes grados de giro, en dicho estudio los chorros fueron generados por medio de un conjunto de álabes móviles localizados a la salida de un túnel de viento (ver figura 14).

Para homogeneizar el flujo circunferencialmente, la salida del túnel de viento fue contraída desde un diámetro de 0.14 hasta 0.04 m (figura 14). El calentamiento se llevó a cabo por medio de una resistencia eléctrica a una temperatura de 40°C. La velocidad a la salida de la tobera se mantuvo constante a 37.5 m/s, lo que llevó a un número de Reynolds de 8×10^4 . La magnitud de la velocidad y su dirección se determinaron por medio de una sonda esférica miniatura, de cinco orificios. Las características turbulentas se midieron con un anemómetro de hilo-caliente y con un sensor 55P61 en arreglo X, un sensor 55P71 de temperatura compensada en arreglo paralelo y un sensor 55P31 para medir temperaturas.

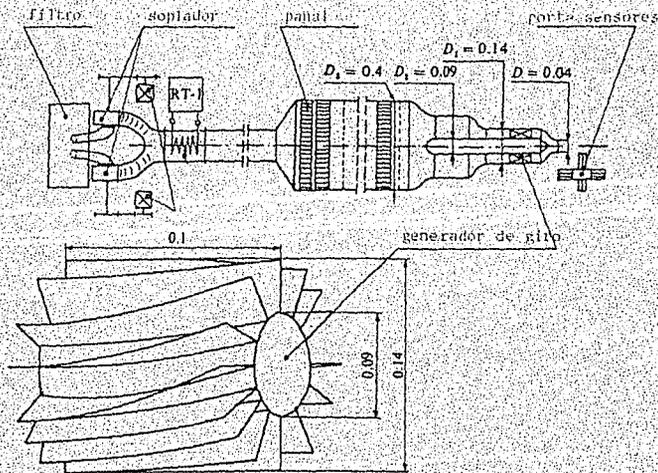


FIGURA 14. TUNEL DE VIENTO Y GENERADOR DE GIRO EMPLEADOS POR ELSNER Y KURZAK EN SU INVESTIGACION.

(J. W. ELSNER Y L. KURZAK, 1987. [19])

Llegan a demostrar que el giro en un chorro intensifica el momento turbulento, así como los fenómenos de transporte (momentum y calor) a la salida del chorro y, que esta fuerte intensificación de los procesos de transporte, tienden a atenuarse aguas abajo.

1.2.18.- Experimento de T. Mahmud, J.S. Truelove y T.F. Wall [20].

Para conocer más sobre el comportamiento de los quemadores de flamas de difusión, T. Mahmud, J. S. Truelove y T. F. Wall [20] realizan un estudio sobre las características de dos chorros que descargan coaxialmente en una tobera divergente. Primeramente definen cuatro tipos de patrones de flujo, patrones que ellos denominan tipo 1, tipo 2; tipo 3 y tipo 2A. Estos patrones se muestran en la figura 15.

La diferencia que existe entre estos patrones de flujo se deriva de la forma en que se generan. Por ejemplo, el patrón tipo 1 se presenta cuando el chorro exterior descarga con un giro inicial, mientras que el chorro interior descarga libremente (sin giro) a gran velocidad. En

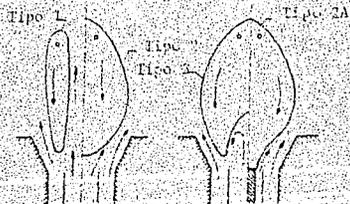


FIGURA 15. PATRONES DE FLUJO CON GIRO EN QUEMADORES

(T. MAHMUD, J.S TRUELOVE Y T.F. HALL, 1987 [20])

el tipo 2 tanto el chorro interior como el chorro exterior descargan con giro inicial. El tipo 3 se presenta con las mismas condiciones que el tipo 1, nada más que para este último el chorro interior descarga a baja velocidad. Finalmente, el patrón de flujo tipo 2A se genera exactamente igual que el tipo 2, pero en este caso, se inserta un obstáculo cilíndrico en el eje del ducto. Las mediciones se llevaron a cabo por medio de un sensor esférico de cinco orificios y las intensidades de turbulencia se midieron con un anemómetro de hilo caliente. Estas mediciones sirvieron para calibrar un modelo matemático k-ε, con el que calcularon las líneas de corriente cercanas a la salida de la tobera. La distancia hasta la cual midieron se concentró a $0 \leq x/D \leq 1.8$ y sus resultados teóricos también.

Los resultados más interesantes que presentan, son las líneas de corriente que se generan para los patrones de flujo tipo 2, tipo 3 y tipo 2A (ver figura 16). Las conclusiones a las que llegan son que: entre mayor sea el grado de giro del flujo exterior, la zona donde se presenta el contra-flujo se acerca más a la tobera y además, que la magnitud del flujo másico de recirculación en esa misma zona, se incrementa, principalmente, conforme el grado de giro se incrementa y cuando la cantidad de movimiento decrece.

1.2.19 - Experimento de M. Samet y s. Elnav [21].

Dentro de los muchos estudios que se han llevado a cabo para conocer más acerca del comportamiento de los chorros, se encuentra el de M.

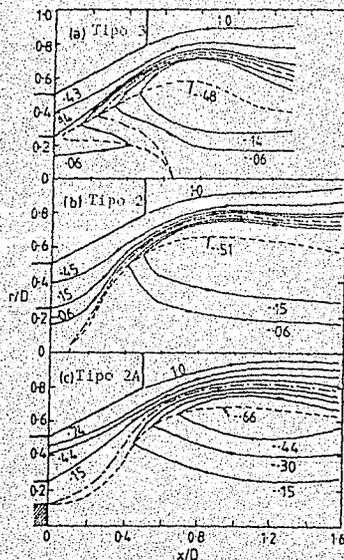


FIGURA 16. LINEAS DE CORRIENTE PARA LOS DIFERENTES TIPOS DE FLUJO. (T. MAHMUD, J.S. TRUELOVE Y T.F. WALL, 1987 [20])

Samet y S. Einav [21], quienes, en un trabajo muy sencillo, muestran como varía el ángulo respecto a la coordenada radial, con el cual un chorro se difunde en su camino aguas abajo. El trabajo es experimental y los chorros se generan con y sin giro y descargan dentro de una corriente libre. Las tres componentes de la velocidad se miden con un sensor de cinco orificios y con las tres componentes encuentran el vector velocidad y sus ángulos ϕ y α respecto a los ejes coordenados. En sus resultados puede observarse como el ángulo de apertura del chorro disminuye aguas abajo para este tipo de arreglo y, también, como varía este ángulo conforme cambia el grado de giro del chorro.

1.2.20.- Experimento de Y.C. Chao [22]

En los trabajos dedicados a los chorros, con fines de uso en quemadores, han habido discrepancias en cuanto a la forma de la zona de recirculación. Sin embargo, Y.C. Chao [22] demuestra que en

realidad existen dos zonas de recirculación de flujo, es decir, dos zonas donde la velocidad del chorro tiende a regresarse, o sea que toma valores negativos en la dirección principal del flujo. Su estudio consistió en simular la acción de un quemador de flama de difusión. Este quemador generaba dos flujos coaxiales: el chorro exterior siempre descargó con giro, mientras que el chorro interior descargó con y sin giro. El grado de giro se tomó como el resultante de ambos efectos ya que, incluso, los chorros se estudiaron cuando éstos tenían giros opuestos. El giro resultante varió desde débil ($S = 0.032$) hasta fuerte ($S = 0.64$) y con este rango de giro en los chorros, demostraron que cuando el giro es mayor que, aproximadamente, 0.3 entonces se generan dos zonas de contraflujo. Las mediciones se hicieron con un tubo de Pitot de cinco orificios y así midieron las velocidades medias, la presión estática y determinaron la dirección del flujo.

Finalmente, concluyen que este fenómeno pudiera deberse al hecho de que la presión estática es mínima en la región que divide a las dos zonas de contraflujo y a partir de esa región empieza a crecer hasta alcanzar un valor asintótico.

1.2.21.- Trabajo de F. Méndez, E. Medina y J. Cervantes [23].

Otra investigación interesante es la llevada a cabo por F. Méndez, E. Medina y J. Cervantes [23], donde muestran que los efectos combinados de la rotación y calentamiento, impartidos a un chorro, son contraproducentes si se quiere alcanzar mayor altura de la columna. Este trabajo es numérico y consiste en resolver las ecuaciones de conservación en forma integral para encontrar las características dinámicas de las columnas con y sin giro y con y sin efecto de flotación. Presentan gráficas donde se observa la evolución espacial del momento lineal y como influye el giro en la altura que alcanza un chorro que descarga en una atmósfera quieta. También presentan que el giro es perjudicial para la flotación y que el *entrainment* aumenta conforme aumenta dicho giro, lo cual es perjudicial por la cantidad de movimiento axial.

1.2.22.- Experimento de John M. Kuhlman y Robert W. Gross [24].

Dentro de los trabajos más recientes sobre el tema, se encuentra el de John M. Kuhlman y Robert W. Gross [24], donde estudian el chorro libre, sin giro, por medio de un anemómetro láser y con cuyo arreglo miden las tres componentes de la velocidad simultáneamente. El chorro es estudiado hasta que alcanza una longitud de 16 veces el diámetro de la salida ($x/D \leq 16$). Este chorro se genera horizontalmente en una tobera de 10.54 mm de diámetro y con una velocidad de salida de 22 m/s, es decir, con un número de Reynolds de 23,000, aproximadamente. Los resultados que presentan tienen un alto porcentaje de confiabilidad, debido a la técnica de medición, así como a la instrumentación empleadas. Los autores presentan 6 gráficas muy interesantes, donde logran demostrar que el chorro, así generado es completamente axisimétrico, además de que sus resultados coinciden notablemente con los obtenidos por otros autores.

Presentan el perfil de velocidad media axial, las intensidades de turbulencia axial, radial y tangencial y los esfuerzos de Reynolds. Por su confiabilidad, este artículo tiene el mérito de haber comprobado las características del chorro libre sin giro antes mencionadas y que ya han sido extensamente estudiadas.

1.3 - Observaciones.

Como se ha podido observar en esta revisión bibliográfica, los chorros han sido estudiados, experimentalmente, hasta una distancia $x/D < 20$ desde la salida del flujo (siendo x la coordenada axial y D el diámetro a la salida), con lo cual, la parte concerniente a la preservación del chorro, aguas abajo, quedó incompleta, a pesar de trabajos como los de Pratte y Keffer [7] y Wygnanski y Fielder [6] que analizan los chorros hasta $x/D = 100$. Sin embargo, Pratte y Keffer tan sólo estudian un grado de giro y los valores presentados son valores extrapolados de ecuaciones empíricas, calibradas con valores hasta de $x/D = 30$, y Wygnanski y Fielder estudian tan sólo el chorro sin giro, quedando esta zona del chorro (donde $x/D \geq 30$), todavía sin analizar.

Por su gran aportación, los trabajos de Rose [2], Chiglier y Chervinsky [5] y J.W. Elsner y L. Kurzak [19], serán considerados, en el presente trabajo, como la base de la cual se partirá y los trabajos de Pratte y

Keffer [7] y Wagnanski y Fielder [6] se tomarán como referencias comparativas de los resultados que aquí se obtengan.

Así pues, se pretende complementar el conocimiento sobre los chorros con giro al estudiarlos a una distancia mayor aguas abajo desde la salida donde se generan.

CAPITULO II

DESARROLLO

MODELO EXPERIMENTAL

2.1.- Primera Etapa de la Investigación

Para lograr los objetivos planteados, y como primera etapa del proyecto, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM se instaló un pequeño cuarto de 6 m de ancho, 7 m de largo y 4 m de altura, dentro del cual se instaló un pequeño modelo en el cual simuló el chorro generado por uno de los macro-ventiladores. Con este modelo se pudo visualizar el comportamiento de las columnas con y sin giro, producidas por los ventiladores. Estas primeras pruebas se llevaron a cabo exclusivamente a la salida de la chimenea simulada, a la temperatura ambiente, y se realizaron con un sensor de hilo caliente DISA SSR14 de un solo hilo. Las pruebas se hicieron con 3 gastos distintos. Los resultados que se obtuvieron sirvieron para dar las condiciones iniciales de las características de los chorros así generados, y con estos resultados, se calibró el programa PHOENICS, que es un código computacional que resuelve numéricamente, las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y de la energía y que sirvió para ilustrar el panorama del comportamiento que los macroventiladores tendrían estando en funcionamiento.

2.2- Segunda Etapa de la Investigación.

La segunda etapa se dividió en dos pasos. El primero consistió en asegurarse de que la metodología de medición fuera la adecuada, mientras que el segundo paso se enfocó a estudiar el problema fundamental: las columnas ascendentes, con giro y descarga a la temperatura ambiente.

2.2.1.- Modelo experimental de la segunda etapa.

El experimento, de toda la segunda etapa del proyecto, se instaló dentro del Departamento de Termoenergía y Mejoramiento Ambiental en la Facultad de Ingeniería de la UNAM, haciendo uso del equipo de calibración (DISA 55D90), del mismo anemómetro de hilo caliente para aprovechar las características de velocidad variable y baja turbulencia. (Figura 17).

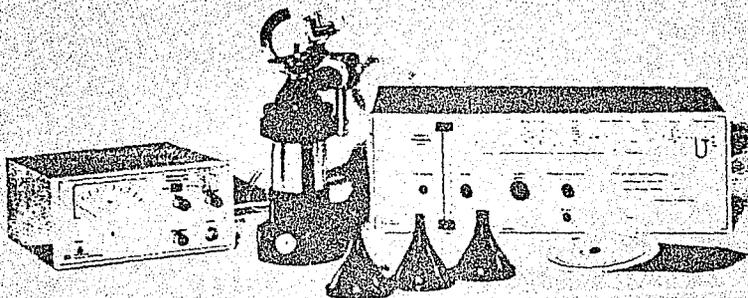


FIGURA 17. EQUIPO DE CALIBRACION DISA 55D90 DEL ANEMOMETRO DE HILO CALIENTE.

El equipo de calibración para el sistema de anemometría de hilo caliente, tiene por objetivo producir un chorro libre de aire. Consta de 3 elementos principales:

- 1) Una unidad de control de presión.
- 2) Una unidad de toberas (con 4 toberas de diferentes diámetros).
- 3) Un convertidor de presión que transforma las señales de presión en señales eléctricas.

Para su funcionamiento requiere de una alimentación de aire a una presión mínima de 12 bares absolutos. Por sus características, se puede generar un chorro libre dentro de un rango de velocidades de 0.5 m/s hasta Mach 1 [29].

Arbitrariamente se usó la tobera de calibración de 60 mm^2 de área (8.74 mm de diámetro) para el caso de un chorro libre y la tobera de calibración de 120 mm^2 de área (12.36 mm de diámetro) para el caso de los chorros con giro. Para los chorros libres, la velocidad de salida se fijó en 40 m/s, registrándose números de Reynolds de 23 091, 21 768 y 20 588 para el chorro en frío, a 30°C y 40°C, respectivamente. Se tomaron lecturas tanto a la salida (4 mm de la tobera) como a 5, 10, 20, 40 y 60 veces el diámetro de salida. Para el caso de los chorros con giro, los números de Reynolds que se registraron, con base en la componente axial, fueron de 8 160 y 16 320 para los grados de giro de 0.1775 y 0.2963, respectivamente, y las lecturas se hicieron a la salida (4 mm de la tobera) y a 5, 10, 20 y 40 veces el diámetro de la tobera.

Para asegurar que el chorro descargara verticalmente, se utilizó un nivel de burbuja de agua para poner la boquilla de la tobera completamente horizontal y para que el sensor se desplazara estrictamente vertical, se colocó una plomada y se aseguró que el sensor se desplazara, a lo largo de toda la carrera del posicionador, sin perder la distancia horizontal entre el sensor y la plomada (fotografías 18a y 18b).

El posicionador tenía la versatilidad de moverse en las tres coordenadas cartesianas, sin embargo, fue necesario adaptar el posicionador original de la unidad de toberas, del equipo de calibración, con la finalidad de que el sensor de hilo caliente pudiera posicionarse en las direcciones convenientes.

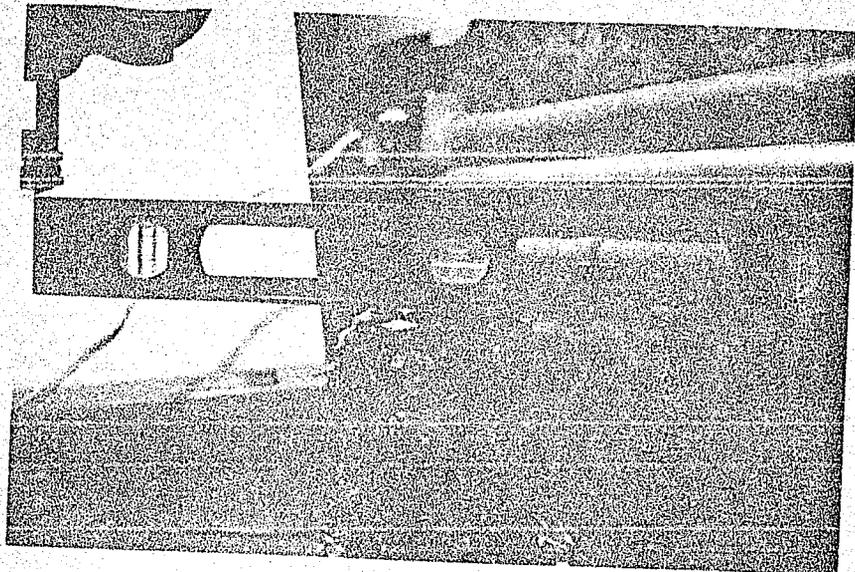


FIGURA 19a. NIVELACION HORIZONTAL DEL JUEGO DE TOBERAS.

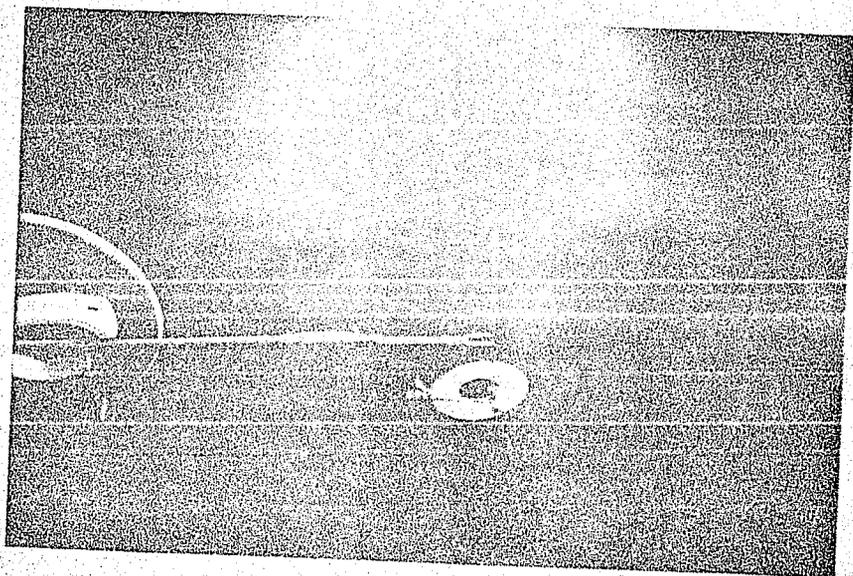


FIGURA 18b. NIVELACION VERTICAL DEL POSICIONADOR.

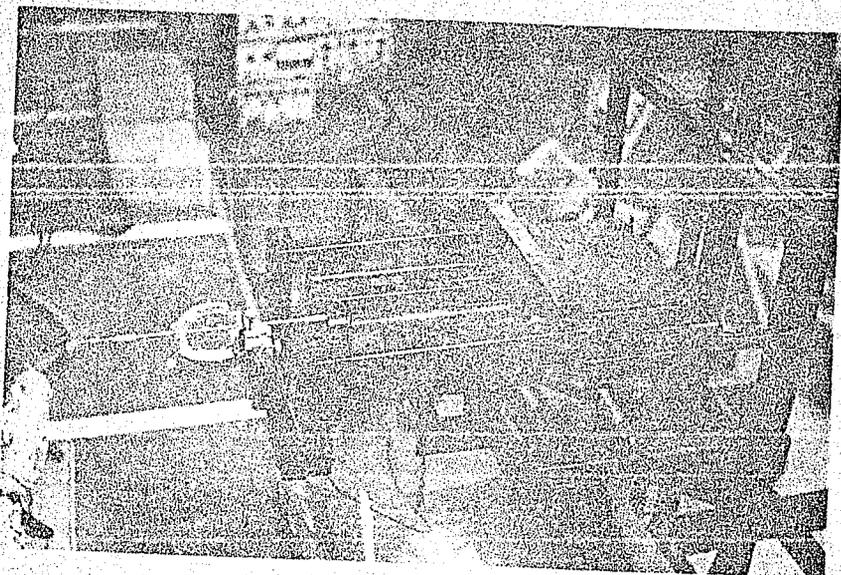


FIGURA 19a. POSICIONADOR TRIDIMENSIONAL.

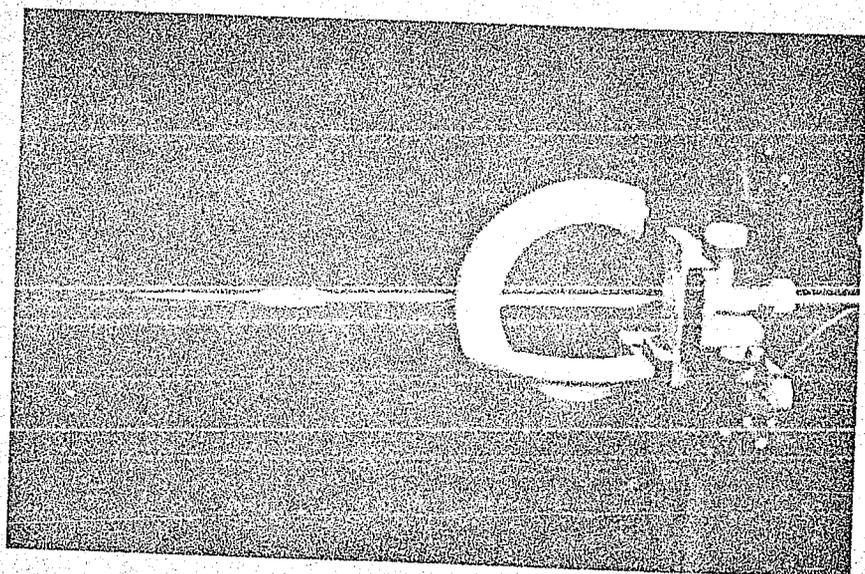


FIGURA 19b. ADAPTACION AL POSICIONADOR TRIDIMENSIONAL.

2.2.2. - Equipo de Anemometría Empleado en la Segunda Etapa.

Para realizar las mediciones de la velocidad media y las intensidades de turbulencia, se decidió emplear el anemómetro de hilo caliente. Este anemómetro ha sido empleado, durante mucho años, como una herramienta en la investigación dentro del campo de la mecánica de fluidos y, aunque recientemente su uso ha sido desplazado por el anemómetro laser de efecto Doppler, sus aplicaciones siguen siendo amplias.

Podríamos definir al anemómetro de hilo caliente como un hilo de alambre muy pequeño que se calienta al hacer pasar una corriente eléctrica por él. Este elemento, ya calentado, al ser expuesto a un medio fluido, transfiere calor principalmente por convección. La propiedad más común de un fluido que podemos medir, es la velocidad; aunque, aprovechando la sensibilidad de estos elementos en la transferencia de calor, entre el sensor y el ambiente, estos equipos también pueden ser empleados como termómetros y para la medición de la composición de las sustancias [27].

El equipo de anemometría de hilo caliente, empleado en el presente trabajo, funcionaba en la modalidad de temperatura constante. Cabe hacer la aclaración de que existen dos modos de operación de un equipo de hilo caliente: 1) a temperatura constante para medir velocidades (anemómetro) y 2) a corriente constante para medir temperaturas (termómetro). En la modalidad de temperatura constante es necesario alimentar la corriente, que pasa a través del sensor, con mayor voltaje cuando aumenta el enfriamiento y viceversa. Por tanto, el anemómetro mide, a través de un voltímetro, el valor proporcional a la velocidad del flujo incidente, en unidades de voltaje [28].

Aunado al anemómetro de hilo caliente, el cual tan solo consiste de un puente de Wheatstone o como se conoce en la literatura "simple puente estándar", se hizo uso también de un equipo de linearización [31], de un voltímetro R.M.S. [32] y de un voltímetro para medir el voltaje medio; tal y como se presenta en el diagrama de bloques de la figura 20.

La finalidad del linealizador es la de transformar la señal que sale del puente, que no es lineal, a una señal lineal. De acuerdo con la ley del enfriamiento de King, el cuadrado del valor del voltaje que entrega el anemómetro, es directamente proporcional a la potencia n de la velocidad, esto es:

$$E^2 = A + B U^n$$

donde E es el voltaje medio, U la velocidad media y A , B y n son constantes que dependen de las propiedades del fluido. Así pues, el linealizador cumple la función de transformar esta relación no lineal en una relación lineal del tipo:

$$E = C U$$

siendo E el voltaje medio, U la velocidad media y C una constante de proporcionalidad que tan sólo depende de las necesidades del usuario.

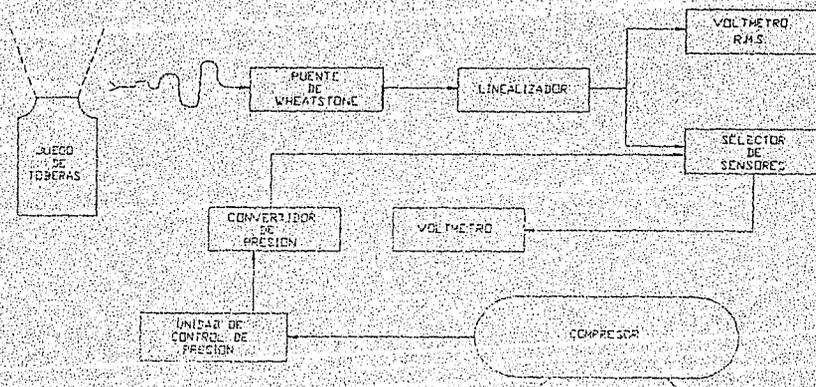


FIGURA 20. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA INSTALACION DEL MODELO EXPERIMENTAL.

El voltmetro R.M.S. es otro equipo auxiliar, que proporciona la medida de la desviación estándar de las fluctuaciones del voltaje, que se deben a la turbulencia del fenómeno. Para entender mejor la aplicación de los valores que da el voltmetro R.M.S., se analiza lo

siguiente.

Una de las formas de evaluar la turbulencia en un flujo dado, es mediante la estimación de la "intensidad de turbulencia", que como ya se ha mencionado anteriormente, se define como:

$$I = \frac{(1/2 q^2)^{1/2}}{U}$$

donde $1/2 q^2$ es la energía cinética instantánea de la turbulencia por unidad de masa y que a su vez se define como:

$$1/2 q^2 = 1/2 (u^2 + v^2 + w^2)$$

U es la velocidad media en el tiempo. En otras palabras: I establece la proporción existente entre la desviación estándar y la velocidad media del flujo. Por este motivo conocer la desviación estándar proporcionada por el voltmetro R.M.S. es de gran ayuda para conocer las intensidades de turbulencia en cualquier punto del flujo.

Con todo esto la ecuación empleada para conocer las intensidades de turbulencia se reduce a:

$$I = \frac{e}{E}$$

donde e es el voltaje R.M.S. obtenido del voltmetro R.M.S. y E es el voltaje medio obtenido del voltmetro normal.

Por disponibilidad, el sensor usado, en toda esta segunda etapa, fue un sensor miniatura DISA 55P01.

2.2.3. - Primer Paso de la Segunda Etapa.

Para asegurar la metodología de la medición, se hicieron mediciones en flujos ya conocidos. El flujo escogido fue un chorro libre vertical

sin giro que descargaba en una atmósfera quieta y se midieron solamente los perfiles de velocidades medias axiales y sus intensidades de turbulencia. El chorro se hizo descargar a la temperatura ambiente (19°C), a 30°C y 40°C , dentro de la atmósfera. El calentamiento se hizo con la finalidad de observar el comportamiento y la respuesta del equipo de medición.

2.2.4.- Segundo Paso de la Segunda Etapa.

Una vez establecida la metodología de medición, el segundo paso de la segunda etapa, consistió en encontrar los perfiles de velocidad media y las intensidades de turbulencia del fenómeno que se estudia (los chorros con giro a temperatura ambiente que descargan en una atmósfera quieta).

Esto se logró al insertar un generador de giro, consistente en las aspas de un pequeño ventilador, que al ser introducidas dentro del cilindro de la unidad de toberas del equipo de calibración, servían como álabes guías del flujo, generando así, el giro deseado. (Ver figura 21).

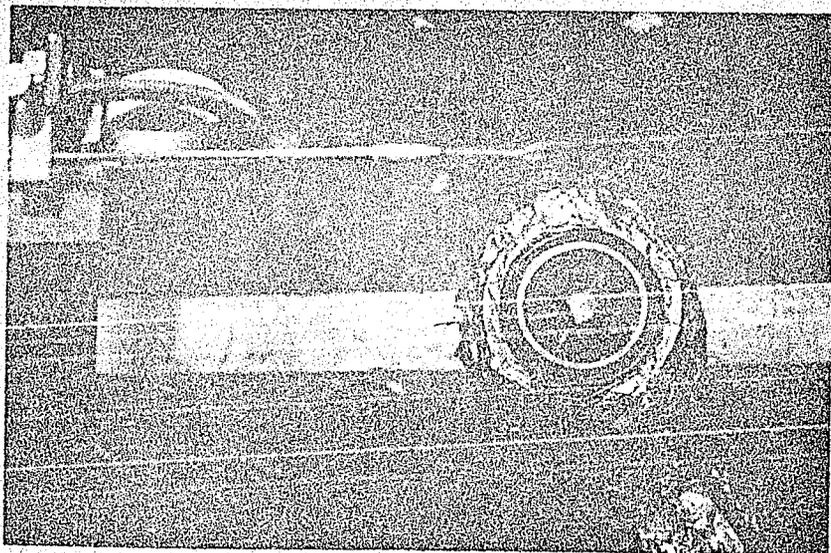


FIGURA 21. GENERADOR DE GIRO DE ALABES FIJOS.

En esta etapa del proyecto ya se midieron las tres componentes de la velocidad media (componentes axial, tangencial y radial), así como sus respectivas intensidades de turbulencia.

Para encontrar las tres componentes de la velocidad, se recurrió a la ecuación de la velocidad de enfriamiento efectivo, la cual se expresa como:

$$U_{\text{eff}}^2 = U_x^2 + K_1^2 U_y^2 + K_2^2 U_z^2$$

siendo K_1 el factor de desvío y K_2 el factor de inclinación, cuyos valores se encuentran al rotar el sensor 90° respecto al eje de calibración [25].

Teniendo los valores de K_1 y K_2 , el siguiente paso fue encontrar el sistema de ecuaciones que se requerían para encontrar los valores de las velocidades en las tres direcciones principales (axial, radial y tangencial). El sistema que se tuvo que resolver fue:

$$\begin{aligned} U_{\text{effI}}^2 &= U_x^2 + K_2^2 U_y^2 + K_1^2 U_z^2 = E_I^2 / C \\ U_{\text{effII}}^2 &= K_1^2 U_x^2 + U_y^2 + K_2^2 U_z^2 = E_{II}^2 / C \\ U_{\text{effIII}}^2 &= K_2^2 U_x^2 + U_y^2 + K_1^2 U_z^2 = E_{III}^2 / C \end{aligned}$$

donde U_x , U_y y U_z son las componentes axial, radial y tangencial de la velocidad. E_I , E_{II} y E_{III} los voltajes en la dirección axial, radial y tangencial, respectivamente, y C la constante de proporcionalidad del linealizador.

Este sistema de ecuaciones coincide con un sistema deducido para los mismos fines y que fue usado por Jesús V. Benajes [26] en un estudio del movimiento del aire dentro del cilindro de un motor alternativo, el cual dio excelentes resultados al transducir sus valores de voltaje (señal detectada con el anemómetro de hilo caliente), a velocidades medias.

Así pues, el sensor era colocado en las tres posiciones

perpendiculares, tal y como se muestra en la figura 22. Antes de cada medición el sensor era calibrado para encontrar los valores de los factores de inclinación y desvío. Una vez obtenidos los valores de los voltajes en cada posición del sensor, los resultados se substituyeron en el sistema de ecuaciones anterior y se encontraron los valores de la velocidad, en sus tres componentes.

Las mediciones se realizaron con dos números de giro: 1) $S = 0.1775$ y 2) $S = 0.2963$. Para variar el número de giro, se hizo variar la componente axial de la velocidad, ya que el generador de giro tenía los álabes fijos. La componente axial se logró variar gracias a la versatilidad del equipo de calibración.

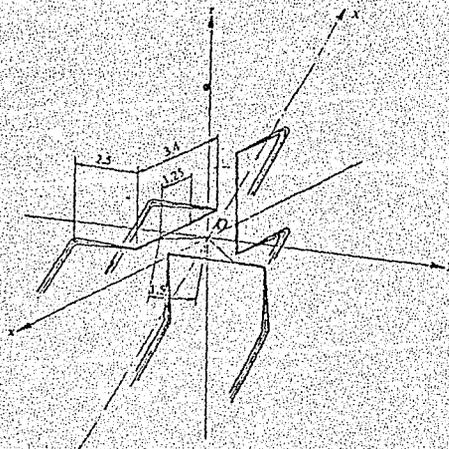


FIGURA 22. POSICIONES DEL SENSOR DE HILO CALIENTE PARA CALIBRACION Y TOMA DE LECTURAS.

Para encontrar los valores de S se recurrió a la ecuación del número de giro, que para el caso de que un flujo gire como un cuerpo sólido, con una distribución uniforme de las velocidades axial, obteniéndose [4]:

$$S = \frac{\int \rho U_x U_\phi r^2 dr}{R \int \rho (U_x^2 - 0.5 U_\phi^2) r dr} = \frac{G_\phi}{G_x R} = \frac{1/2 G}{1 - 1/4 G^2}$$

siendo $G = w_0 / u_0$, que es la relación entre los máximos valores de las componentes tangencial (w_0) y axial (u_0) a la salida de la tobera.

En la siguiente tabla se presentan los valores máximos de las componentes tangencial y axial y el número de giro que estas representan.

Componente Tangencial	Componente Axial	Número de Giro
2.0215 m/s	5.866 m/s	0.1775
14.7547 m/s	26.92 m/s	0.2963

Por último, en las figuras 23a, 23b y 23c se presentan los criterios para adimensionalizar los ejes de las abscisas en las gráficas de los resultados. El valor de b en las componentes axiales, se define como la coordenada radial en donde la velocidad es la mitad de la velocidad máxima en cada estación de medición (figura 23a). En el caso de las componentes tangenciales, b es la coordenada en donde se encuentra la magnitud máxima de la velocidad en cada estación de medición (figura 23b), y para las componentes radiales, b representa la coordenada radial en donde la velocidad cambia de dirección y pasa por cero (figura 23c).

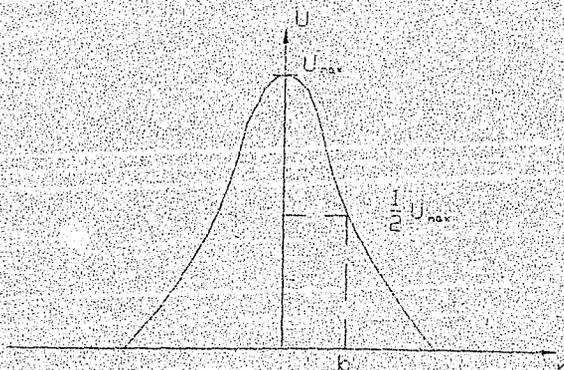


FIGURA 23a. DEFINICIÓN DE b EMPLEADO PARA ADIMENSIONALIZAR LA COORDENADA RADIAL r PARA EL CASO DE LAS VELOCIDADES AXIALES.

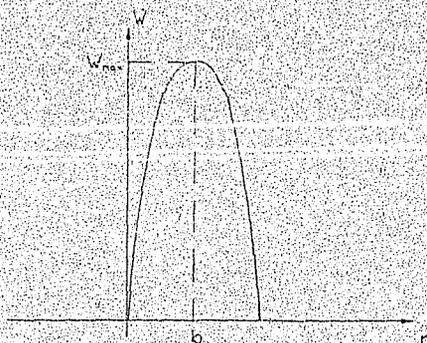


FIGURA 23b. DEFINICION DE b EMPLEADO PARA ADIMENSIONALIZAR LA COORDENADA RADIAL r PARA EL CASO DE LAS VELOCIDADES TANGENCIALES.

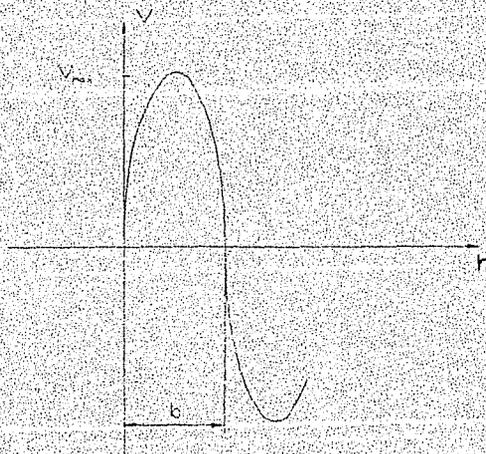


FIGURA 23c. DEFINICION DE b EMPLEADO PARA ADIMENSIONALIZAR LA COORDENADA RADIAL r PARA EL CASO DE LAS VELOCIDADES RADIALES.

CAPITULO III

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante la presente investigación.

Los primeros resultados que se presentan, son los obtenidos en la primera etapa de la investigación (realizados en el Instituto de Ingeniería). Como puede observarse, en las figuras 24a y 24b, el flujo tendía a cargarse hacia un lado del tubo de salida que representaba a la chimenea, es decir, el flujo no era simétrico. Este fenómeno se debió a la existencia de un codo localizado a 20 cm de la salida del

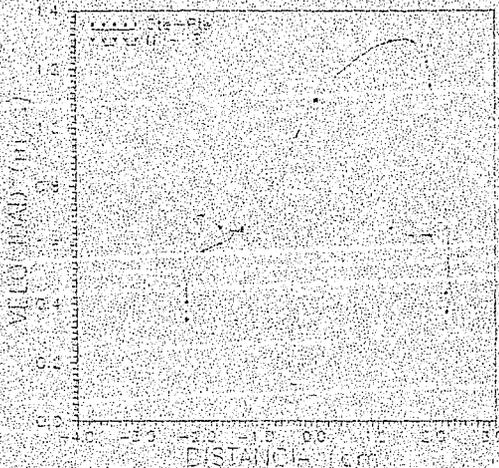


FIG. 24a - PERFIL DE VELOCIDADES A LA SALIDA DE LA CHIMENEA, APEPURA DE LA VELOC. 3.78

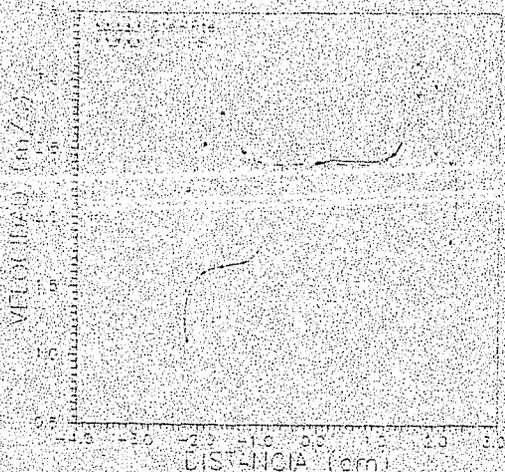


FIG. 24E. - PERFIL DE VELOCIDADES A LA SALIDA DE LA CHIMENEA. APERTURA DE LA VALVULA 5.8.

chorro; esta distancia era tan pequeña que no permitía que el flujo se desarrollara, provocando flujos secundarios y recirculaciones. Por este motivo se decidió cambiar la instalación y así, trabajar con un chorro simétrico.

Los resultados de la segunda etapa, primer paso, se presentan en las figuras 25a, 25b, 25c y 25d. Puede observarse que las formas de los diferentes perfiles coinciden, favorablemente, con las reportadas en la literatura especializada, como en el caso del trabajo realizado por Chigier y Chervinsky [5] (ver figura 9). Este paso permitió asegurar la metodología de medición, para continuar con la última etapa del proyecto.

En este primer paso se esperaba que el sensor respondiera fielmente a las predicciones hechas previamente: que el efecto de la flotación se manifestara fuertemente. Sin embargo, como puede apreciarse en la gráfica 26, el número de Richardson fue muy pequeño, es decir, que las fuerzas de inercia fueron muy grandes, comparadas con las fuerzas de flotación.

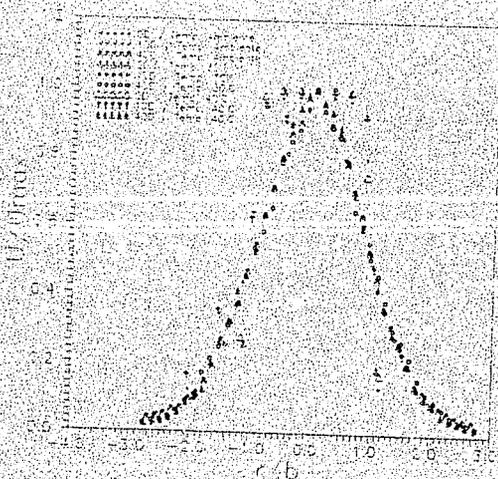


FIG. 25. COMPARACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO DE UN CHORRO LIBRE, DIFERENTES ALTURAS Y DIFERENTES TEMPERATURAS

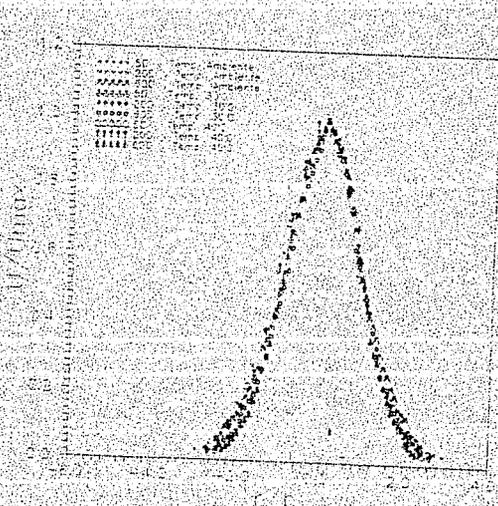


FIG. 26. COMPARACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO DE UN CHORRO LIBRE, DIFERENTES ALTURAS Y DIFERENTES TEMPERATURAS

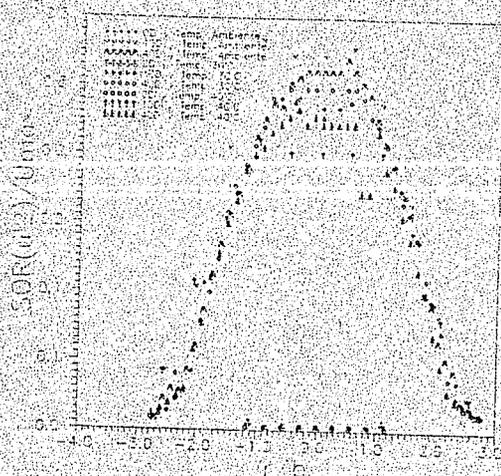


FIG. 25c. COMPARACION DE LOS PERFILES DE LAS FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD DE UN VORTEX LIBRE, DIFERENTES ALTURAS Y DIFERENTES TEMPERATURAS.

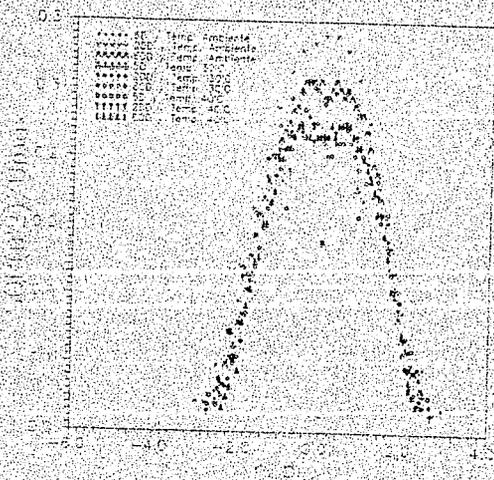


FIG. 25d. COMPARACION DE LOS PERFILES DE LAS FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD DE UN VORTEX LIBRE, DIFERENTES ALTURAS Y DIFERENTES TEMPERATURAS.

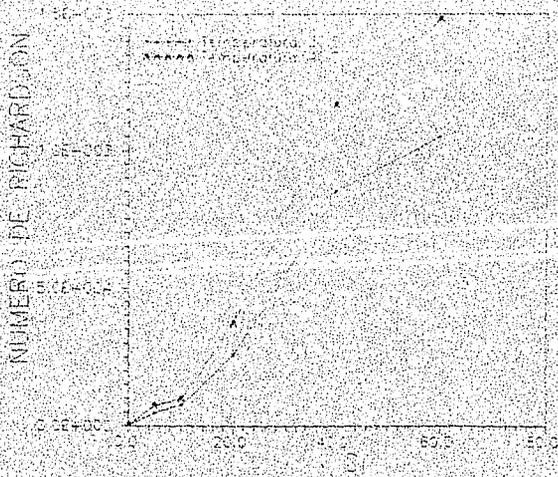


FIG. 26. VARIACION DEL NÚMERO DE RICHARDSON CON LA DISTANCIA AXIAL.

En las gráficas 27 a 32, se presentan los resultados obtenidos en la última etapa del proyecto y en ellas se puede apreciar el siguiente comportamiento:

En las componentes axiales de la velocidad media (gráficas 27a y 27b) se observa claramente el comportamiento esperado. La magnitud de la velocidad es mayor en el centro que en las fronteras del chorro, debido a la transferencia de momentum lineal. Este intercambio de momentum entre el chorro y el ambiente, provoca que el flujo se frene en lo que en la literatura especializada llaman la *zona de mezcla*, que es una zona existente en la frontera y que delimita al chorro con el ambiente.

En las componentes tangenciales (gráficas 28a y 28b), se observa que la magnitud aumenta desde el centro geométrico del chorro hasta llegar a un máximo, a partir del cual empieza a disminuir, debido a la transferencia de momentum angular con el ambiente. Mientras que el chorro tiende a girar, el ambiente se encuentra en reposo y en esta frontera (*zona de mezcla*), el chorro intercambia cantidad de movimiento angular con el ambiente; el ambiente frena al chorro y por

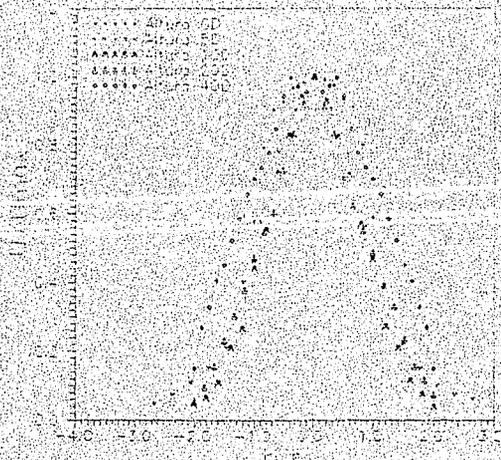


FIGURA 1. PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO EN LA DIRECCION AXIAL DE UN CHORRO CON GASE A TEMPERATURA AMBIENTE DIFERENTES ALTURAS Y $S=0.755$

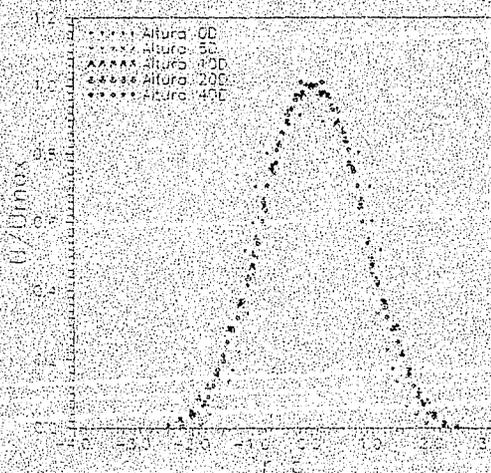


FIGURA 2. PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO EN LA DIRECCION AXIAL DE UN CHORRO CON GASE A TEMPERATURA AMBIENTE DIFERENTES ALTURAS Y $S=0.693$

esto es que la magnitud de la velocidad tangencial disminuye. En cuanto al centro del chorro, que es el centro geométrico, no existe

componente tangencial de la velocidad, ya que allí existe un cambio en la dirección de ésta y por eso es que la velocidad es cero, en el centro geométrico del chorro.

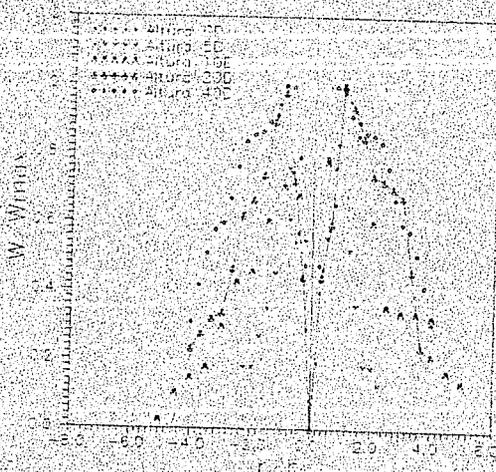


FIG. 25a. - PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO EN LA DIRECCIÓN TANGENCIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE, DIFERENTES ALTURAS Y $S=0.1775$.

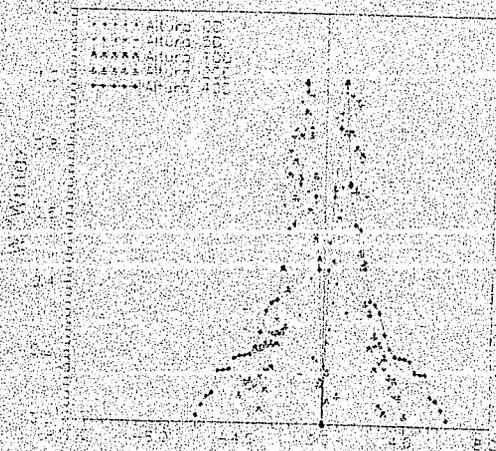


FIG. 25b. - PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO EN LA DIRECCIÓN TANGENCIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE, DIFERENTES ALTURAS Y $S=0.2963$.

Para las componentes radiales (gráficas 29a y 29b), existe un fenómeno natural: A partir del centro geométrico del chorro la velocidad radial

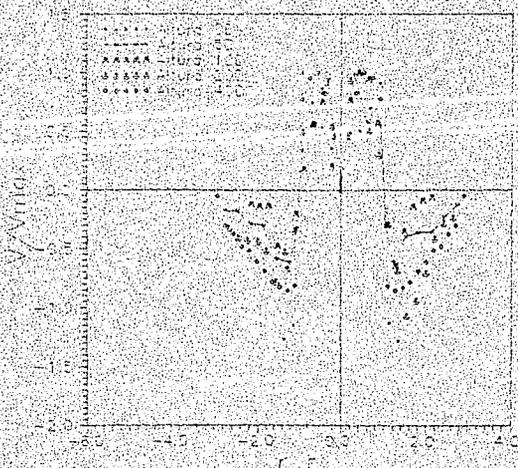


FIG. 29a - PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO EN LA DIRECCION RADIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE DIFERENTES ALTURAS Y $S=0.1775$.

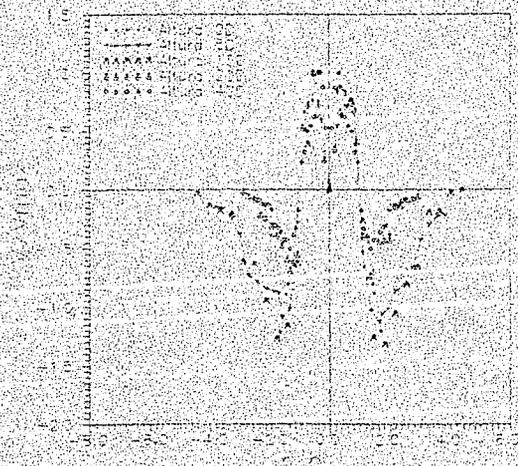


FIG. 29b - PERFILES DE VELOCIDAD PROMEDIO EN LA DIRECCION RADIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE DIFERENTES ALTURAS Y $S=0.1775$.

aumenta y después disminuye, incluso hasta valores negativos, debido a que en la parte externa del chorro se presenta el *entrainment*, el cual marca la entrada del flujo ambiente hacia el centro del chorro. El intercambio de cantidad de movimiento, entre el chorro y el ambiente, genera una estela y con ésta, la generación de pequeños vórtices; estos vórtices se difunden en el chorro, desde el ambiente hasta el interior del chorro. Así pues, si el intercambio de cantidad de movimiento provoca la difusión de vórtices en el chorro y el mismo chorro tiende a difundirse en el ambiente generando la salida de flujo hacia este último, entonces no es sorprendente que exista un cambio en la dirección del flujo radial. Por esta razón existen valores negativos que indican el cambio de sentido en la dirección de la coordenada radial.

En las gráficas 30 a 32, se presentan las intensidades de turbulencia. Se observa que, para todo momento, en todas las componentes y para los dos tipos de chorros (con y sin giro), las intensidades de turbulencia son muy pequeñas a la salida de la tobera, con lo que se reafirman las características de baja turbulencia en el equipo de calibración.

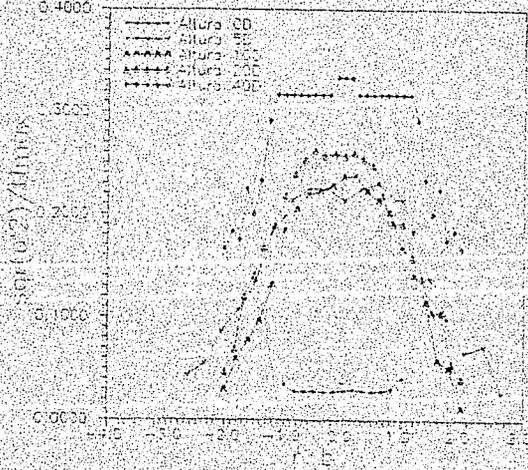


FIG.30d.— FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD AXIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE, DIFERENTES ALTURAS Y SEGUNTS.

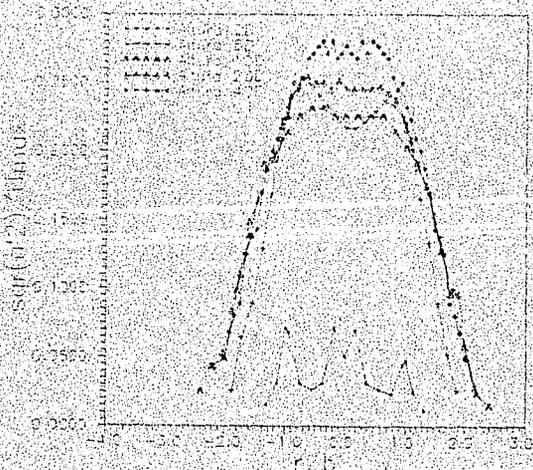


FIG 30b FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD AXIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE, DIFERENTES ALTURAS. $U_0 = 0.2967$

El comportamiento de la turbulencia en la componente axial (figuras 30a y 30b), muestra, en general, un comportamiento lógico, si se retoma la definición de la zona de mezcla. Exactamente en esta zona (que para el presente caso se encuentra alrededor de $r/b = \pm 1$), es donde la magnitud de la turbulencia es mayor, debido al intercambio de energía cinética entre el chorro y el ambiente. Así pues, la turbulencia parte de un valor en el centro y se intensifica en esta zona, volviendo a caer drásticamente en los extremos del chorro, incluso hasta cero.

En cuanto a las fluctuaciones de la velocidad tangencial (figuras 31a y 31b), el comportamiento no es muy claro, sin embargo, alrededor de $r/b = \pm 1$ se aprecia que existe un máximo. Este máximo coincide con el máximo valor de la velocidad media tangencial, lo cual indica que se están generando fuertes remolinos, que crecen ayudados por el movimiento tangencial. El comportamiento es muy irregular, pero es muy parecido al que tienen las fluctuaciones en la dirección axial.

En la componente radial (gráficas 32a y 32b), tampoco se aprecia un comportamiento definido. Se aprecia que la máxima turbulencia se

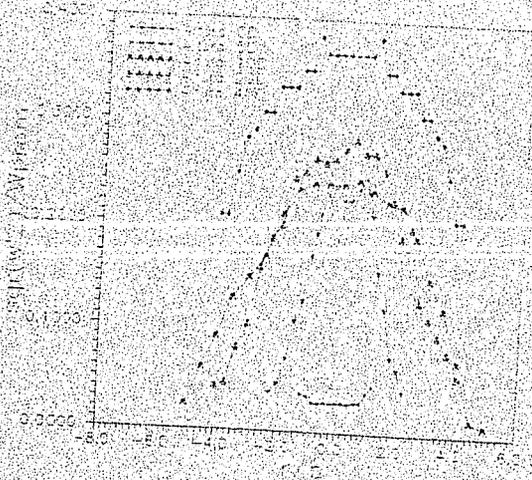


FIG. 31b - FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD TANGENCIAL DE UN VORTEX CON RESPECTO A TEMPERATURA AMBIENTE DIFERENTES A DISTANCIAS r/b DIFERENTES.

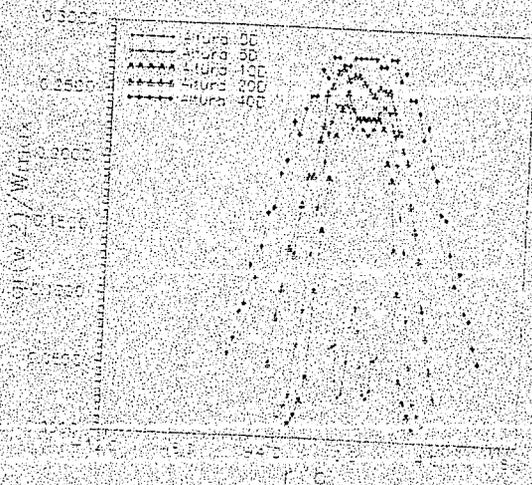


FIG. 31c - FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD TANGENCIAL DE UN VORTEX CON RESPECTO A TEMPERATURA AMBIENTE DIFERENTES A DISTANCIAS r/b DIFERENTES.

presenta también alrededor de $r/b = \pm 1$, que es la zona donde la componente radial de la velocidad media, cambia de dirección. La forma

de los perfiles es muy parecida a la que presentan los perfiles de las fluctuaciones en la componente axial y en la componente tangencial.

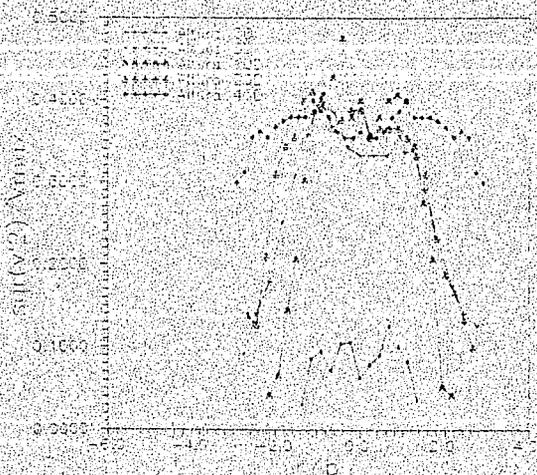


FIGURA A. FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD RADIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE, DIFERENTES ALTURAS Y $\Omega = 1775$.

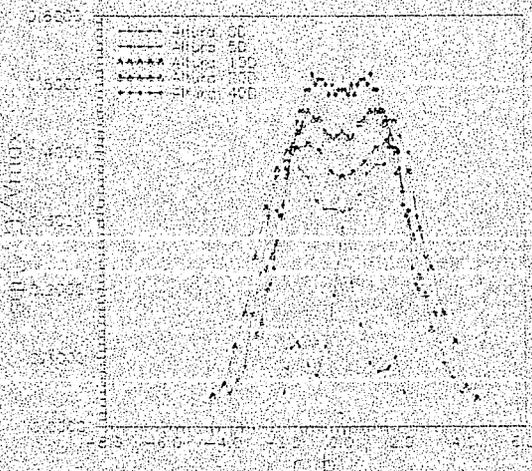


FIGURA B. FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD RADIAL DE UN CHORRO CON GIRO A TEMPERATURA AMBIENTE, DIFERENTES ALTURAS Y $\Omega = 1363$.

En general, la forma de los perfiles de las fluctuaciones, en las tres direcciones, es muy ordenada y tiende a aumentar progresivamente respecto a la coordenada axial y, aunque en su forma son parecidas, cada una tiene una explicación lógica cuando se recurre a las definiciones respectivas de b (figuras 23a, 23b y 23c).

En las gráficas 33a, 33b y 33c, se muestra la evolución sobre la coordenada axial de las componentes axial, tangencial y radial, respectivamente, de la velocidad máxima de los distintos chorros. La velocidad U_{prom} que se usa para adimensionalizar estas curvas, es la velocidad axial promedio, a la salida de la tobera.

En la componente axial se presenta una caída drástica que remarca como el ambiente frena al chorro. Conforme se calienta el chorro, los efectos de flotación ayudan y la pendiente disminuye, pero, cuando se le imparte giro al chorro, esta caída es más pronunciada, es decir la pendiente aumenta considerablemente. De hecho, el mismo comportamiento se puede observar en las componentes tangencial y radial; a mayor número de giro, la caída de la velocidad máxima en la dirección axial, es más pronunciada.

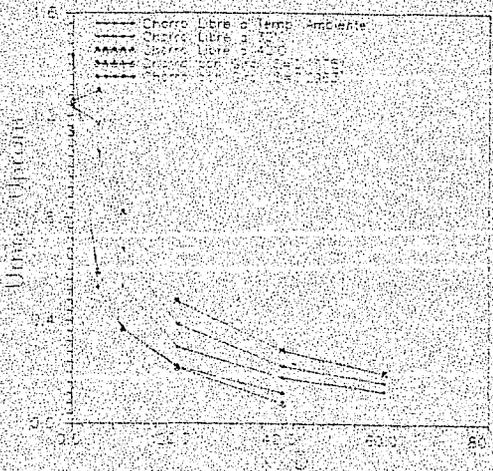


FIG. 33a - EVOLUCIÓN DE LA VELOCIDAD AXIAL EN EL CENTRO DE LOS CHORROS.

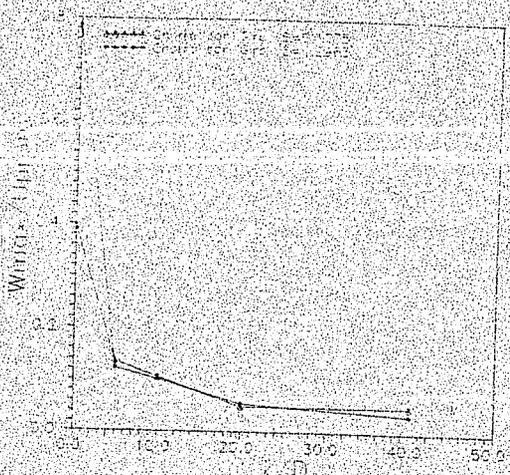


FIG. 33b- EVOLUCION DE LA VELOCIDAD TANGENCIAL MAXIMA DE LOS CHORROS.

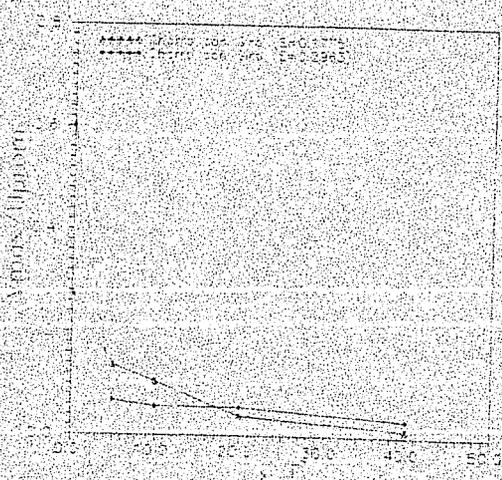


FIG. 33c- EVOLUCION DE LA VELOCIDAD RADIAL MAXIMA DE LOS CHORROS.

Para darse una idea del comportamiento tan similar que tienen ambos tipos de chorros (con y sin giro), en la gráfica 34 se presenta una comparación de la forma de los perfiles de la velocidad axial a través

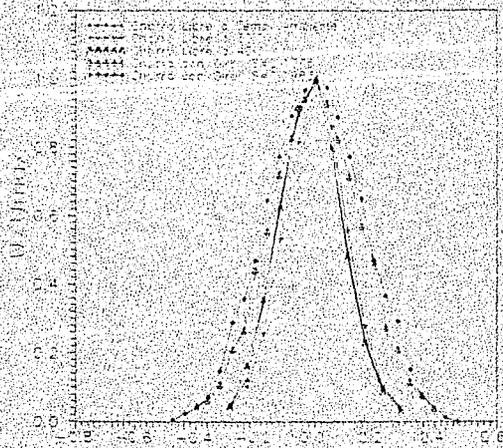


FIG. 34.- PERFILES DE VELOCIDAD AXIAL A TRAVÉS DE CHORROS CON Y SIN GIRO. $T_a = 100^\circ\text{C}$

del chorro, pero ahora la coordenada radial se adimensionalizó con la distancia axial desde la salida de la tobera, que para este caso fue de $x_n = 10D$. En ésta se puede apreciar cómo, independientemente del calentamiento e independiente del grado de giro que se le imparta al chorro, existe una gran similitud en la forma de los perfiles de la velocidad media axial. Estos resultados, en cuanto a su forma, también concuerdan con los presentados por Komori y Ueda [14] y Elsner y Kurzak [18] (figura 35).

En la gráfica 36 se observa la variación del ancho del chorro con la distancia axial. Cuando el chorro es libre, independientemente de la temperatura, presenta un comportamiento normal. Al principio, por la cantidad de movimiento que tiene el chorro, tiende a no difundirse tan fuertemente (la pendiente $m = x/r$ es muy grande) y después de $x = 3D$ la pendiente x/r disminuye, a partir de lo cual la difusión del chorro en el ambiente es mayor, y por lo tanto, el ancho el chorro.

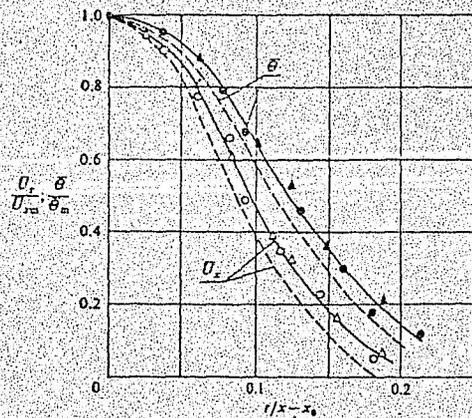


FIGURA 35. COMPARACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR ELSNER Y KURZAK Y LOS OBTENIDOS POR KOHORI Y UEDA CON $s = 0.31$ Y A UNA ALTURA DE $x/D = 9$.
(J.W. ELSNER Y L. KURZAK, 1987 (18))

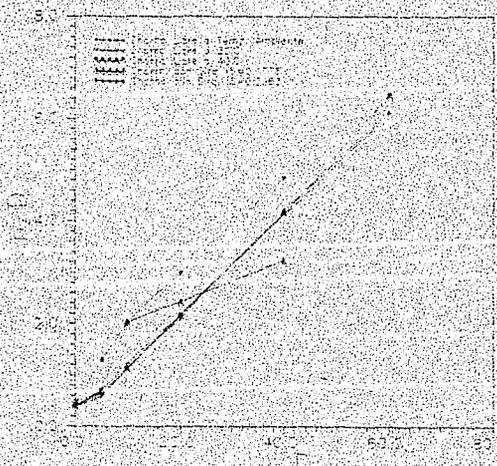


FIGURA 36. COMPARACION DE LOS PERFILES DE VELOCIDAD OBTENIDOS POR ELSNER Y KURZAK Y KOHORI Y UEDA.

Cuando al chorro se le impartió un giro de $S = 0.1775$, se presentó un fenómeno interesante. Al principio la pendiente x/r es igual a la de un chorro libre y alrededor de $5 \leq x/D \leq 10$ esta pendiente disminuye, para después ($x/D \geq 10$) volver a aumentar. Este comportamiento provoca que el chorro se abra y se vuelva a cerrar en esta zona y posteriormente tome ya la forma de un chorro libre.

Finalmente, se presenta la variación de la energía cinética turbulenta a lo largo del centro geométrico del chorro (figura 37). Se observa que al principio, en un chorro libre, esta energía es pequeña pero inmediatamente crece en forma violenta ($0 \leq x \leq 10$), para luego caer en forma suave. Sin embargo, con los datos presentes, no pudo apreciarse realmente el corazón del chorro libre, que es una zona donde el flujo es laminar y que se ubica entre $0 \leq x/D \leq 5$ [33], observándose, tan sólo, un cambio muy drástico. Se aprecia que la energía turbulenta, en los chorros libres, realmente es muy grande en el rango $5 < x < 10$. Para los chorros con giro, el fenómeno sí es congruente con la literatura, ya que, en el rango $0 < x < 10$ la energía cinética turbulenta es muy grande, debido a la zona de baja presión, la cual genera una contraposición al movimiento axial del chorro y disminuye rápidamente aguas abajo.

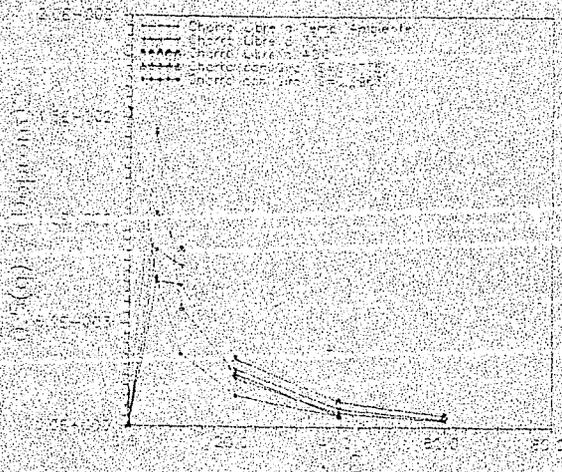


FIG. 37 - VARIACION DE LA ENERGIA CINETICA TURBULENTE EN EL CENTRO GEOMETRICO DEL CHORRO CON LA COORDENADA AXIAL.

CAPITULO IV

DISCUSION

Los resultados de la presente investigación muestran que la turbulencia generada por el intercambio de energía cinética entre un chorro y el ambiente, en el rango de $x/D \leq 5$, es mayor en un chorro con giro que en otro sin giro (figura 37). Es por esta razón que en los quemadores, donde el mezclado del combustible con el comburente es muy importante, siempre se genera un giro (swirl) con la finalidad de intensificar las características turbulentas y mejorar el mezclado. Claro que esto es a pequeña escala, ya que para $x/D \geq 10$ la energía cinética turbulenta es mayor para un chorro sin giro que para otro con giro.

La pérdida de energía cinética provoca que en un chorro, que descargue verticalmente, pierda altura, esto es, que el chorro se frene. De hecho la interacción de un chorro sin giro con el ambiente es más "dosificado" que en el caso de otro con giro.

En la siguiente tabla se muestra lo indicado, al comparar las velocidades axiales en el centro geométrico del chorro (para un chorro sin giro y para tres con giro), adimensionalizadas con la velocidad máxima a la salida de la tobera y a diferentes alturas:

CHORRO	0D	5D	10D	20D	40D
CON GIRO (S=0.17)	1.0	0.516	0.323	0.19	0.068
CON GIRO (S=0.18)	1.0	0.496	0.315	0.166	0.083
CON GIRO (S=0.29)	1.0	0.369	0.025	0.015	0.008
SIN GIRO	1.0	0.850	0.431	0.237	0.142

Con estos valores, además, se puede concluir que mientras mayor sea el grado de giro de un chorro, menor altura axial alcanzará; ya que en los chorros con giro las componentes radial y tangencial se intensifican, provocando pérdida de energía cinética en dos componentes más.

No en todas las gráficas se puede observar un chorro completamente simétrico, a pesar de haber tomado la experiencia de Elsner y Kurzak [19], quienes lo lograron al contraer la salida de su túnel de viento con una tobera. Esto puede deberse a alguna asimetría en el generador de giro o definitivamente a errores en la medición; el sensor de hilo caliente es demasiado sensible y cualquier perturbación pudo haber afectado la medición.

En cuanto a las intensidades de turbulencia, siempre se observó un comportamiento muy definido: independientemente de la componente o del número de giro, las fluctuaciones de la velocidad aumentaron conforme la coordenada axial aumentaba.

Cabe hacer la observación de que, cuando las fluctuaciones de la velocidad se adimensionalizan con la velocidad promedio, la componente axial del chorro presenta autopreservación de las características turbulentas a partir de $x = 10D$, y no así sus velocidades medias, que al ser adimensionalizadas con la velocidad promedio, no presentan la característica de autopreservación (figuras 38a, 38b, 38c y 38d).

En las componentes tangenciales (figuras 31a y 31b), debió presentarse un máximo en el centro geométrico del chorro, que es el punto donde se presenta el cambio en la dirección de la velocidad en esta componente. Después debería caer un poco y volver a aumentar en la zona de mezcla

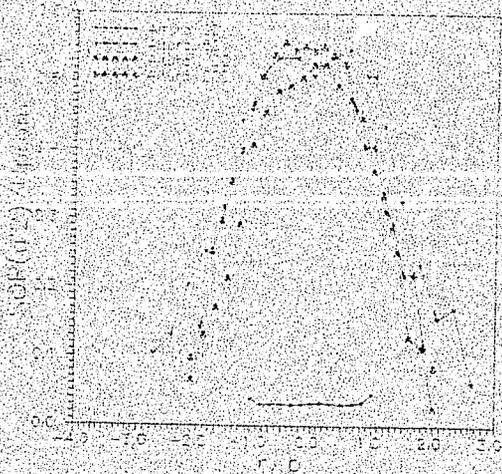


FIG. 365. FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD AXIAL ADIMENSIONALIZADAS CON LA VELOCIDAD PROMEDIO, CHORRO CON GIRO, $\Omega = 0.175$.

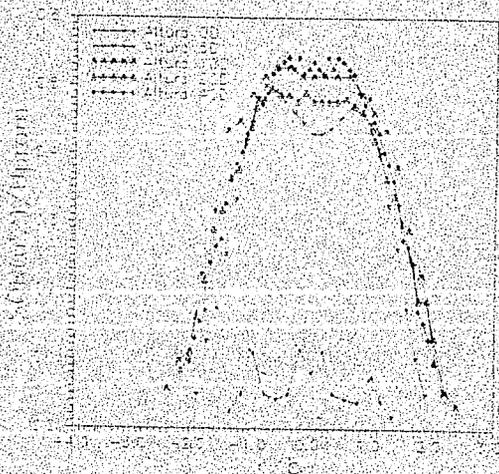


FIG. 366. FLUCTUACIONES DE LA VELOCIDAD AXIAL ADIMENSIONALIZADAS CON LA VELOCIDAD PROMEDIO, CHORRO CON GIRO, $\Omega = 0.2848$.

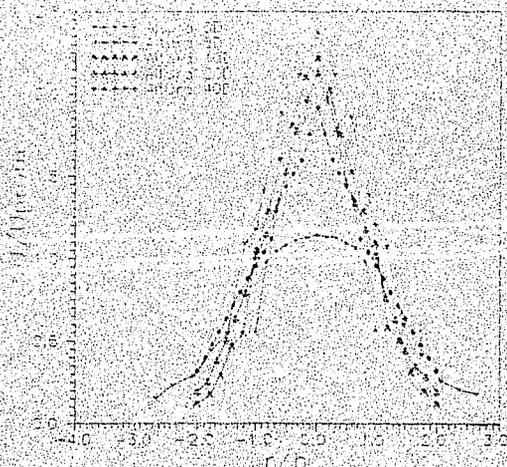


FIG. 38a. - VELOCIDADES AXIALES ADIMENSIONALIZADAS CON LA VELOCIDAD PROMEDIO CHORRO CON GIRO Y $S=6.175$

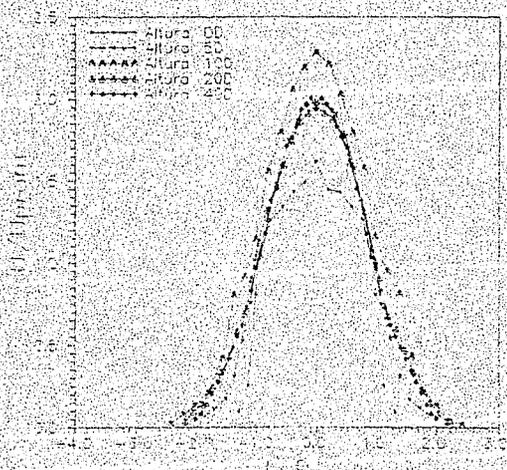


FIG. 38b. - VELOCIDADES AXIALES ADIMENSIONALIZADAS CON LA VELOCIDAD PROMEDIO CHORRO CON GIRO Y $S=0.2963$

($r/b = \pm 1$), que es cuando la velocidad media llega a su máximo y, finalmente, volver a caer hasta cero en los extremos del chorro. Este

comportamiento se observó en muy pocas curvas y no fue muy claro. Esto pudo deberse también a errores en la medición.

Conforme el flujo se desplaza aguas abajo, las intensidades de turbulencia en la dirección radial, van tomando importancia sobre las intensidades de turbulencia en las otras dos componentes (axial y tangencial). Este comportamiento se debe a que aguas abajo se produce, lo que en la literatura especializada se conoce como: *el hongo*. Este efecto se produce al ser frenado el chorro en la atmósfera y comenzar a difundirse, preferentemente en la dirección radial.

Finalmente, cabe hacer la aclaración que las fluctuaciones de la velocidad, en las tres direcciones, siempre llegaron a su máximo valor en la zona de mezcla.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

1.- Los resultados aquí presentados no deberán tomarse como una base sólida para la evaluación del proyecto propuesto por el Ing. Heberto Castillo, ya que en la ciudad de México se tiene una atmósfera estratificada y esta investigación se llevó a cabo en una atmósfera uniforme y homogénea, sin embargo, sirven como punto de referencia para analizar aquellas situaciones para las cuales es necesario incluir atmósferas estratificadas.

2.- La confiabilidad de los resultados se basa en la comparación con las investigaciones de otros autores (Rose [2], Chigier y Chervinsky [5] y Elsner y Kurzak [19]), confirmándose el éxito del trabajo.

3.- A pesar de la concordancia en los perfiles de la velocidad media, no se puede hablar de la autopreservación del chorro, ya que los perfiles de las fluctuaciones no presentan en forma clara el fenómeno de autopreservación. Para dar un veredicto más claro acerca de la autopreservación del chorro, es necesario continuar la investigación a alturas mayores que las aquí presentadas.

4.- Siempre que se requiera aumentar las características turbulentas en un chorro, en un espacio muy corto, deberá ser preponderante el impartirle un cierto grado de giro, para aumentar la eficiencia del proceso. Sin embargo se deberá tener cuidado, si como una necesidad extra del proyecto se desea alcanzar una cierta altura o distancia, como es el caso de las descargas de agua de enfriamiento, que se

generan en las centrales termoelectricas de la C.F.E., donde, no solo se desea que el agua caliente se enfríe por cuestiones del medio ambiente, sino que también esa descarga no influya directamente en la loma de succión.

5.- En algunos casos, las mediciones hechas no fueron suficientes para mejorar el panorama que se tiene de los chorros; tal es el caso de la gráfica 37 donde se muestra la variación de la energía cinética turbulenta y donde se sabe que debería observarse "el corazón del chorro libre". Aunque, este no fue un objetivo primordial.

6.- Finalmente, el uso del anemómetro de hilo caliente sigue teniendo gran aplicación en la investigación básica. Los resultados presentados en este trabajo muestran una gran concordancia con lo reportado en la literatura afín y, en general, se pueden comparar con los obtenidos con tubo de Prandtl y con anemómetro laser de efecto Doppler.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

REFERENCIAS

- 1.- Heberto Castillo, "Informe Final de la Evaluación Técnica de los Ventiladores Ecológicos", Instituto de Ingeniería, UNAM., diciembre, 1992.
- 2.- W.G. Rose, "A Swirling Round Turbulent Jet", ASME J. Applied Mechanics, pp. 615-625, December, 1962.
- 3.- F.P. Ricou and D.B. Spalding, "Measurements of Entrainment by Axisymmetrical Turbulent Jets", J. of Fluid Mechanics, vol. 11, pp. 21-31, 1961.
- 4.- L.J.S. Bradbury, "The Structure of Self-Preserving Turbulent Plane Jet", J. of Fluid Mechanics, vol. 23, part 1, pp. 31-64, 1965.
- 5.- N.A. Chigier and A. Chervinsky, "Experimental Investigation of Swirling Vortex Motion in Jets", ASME J. of Applied Mechanics, vol. 34, pp. 443-451, June, 1967.
- 6.- I. Wygnansky and H. Fiedler, "Some Measurements in the Self-preserving Jet", J. of Fluid Mechanics, vol. 38, part 3, pp. 577-612, 1969.
- 7.- B.D. Pratte and J.F. Keffer, "The Swirling Turbulent Jet", ASME J. of Basic Engineering, vol. 94, pp. 739-748, December, 1972.

- 8.- E. J. List and Jörg Imberger, "Turbulent Entrainment in Buoyant Jets and Plumes", ASCE J. of Hydraulics Division, vol. 99, No. HY9, pp. 1461-1474, September, 1973.
- 9.- Jai P. Narain, "Swirling Shallow-Submerged Turbulent Plumes", ASCE Journal of the Hydraulics Division, vol. 100, No. HY9, pp. 1229-1243 September, 1974.
- 10.- C.J. Hendricks and J.A. Brighton, "The Prediction Of Swirl and Inlet Turbulence Kinetic Energy Effects on Confined Jet Mixing", ASME J. of Fluids Engineering, vol. 2, pp. 51-59, March, 1975.
- 11.- Chigier, "Combustion", capitulo 5, pp. 100-146
- 12.- Nikolas E. Kotsovinos, "A Study of the Interactions of Turbulence and Buoyancy in a Plane Vertical Buoyant Jet", Heat Transfer and Turbulent Buoyant Convection, vol.1, pp. 15-26, 1976.
- 13.- K. Hayashi and M.C. Branch, "Concentration, Velocity, and Particle Size Measurements in Gas-Solid Two-Phase Jets", AIAA J. of Energy, Vol. 4, No. 5, pp. 193-198, Sept.-Oct., 1980.
- 14.- L. Paulsen, "The Aerodynamic Properties of the DISA Nozzle Unit for Calibrating and Testing Hot-Wire Probes, in Particular Multiple Sensor Probes at Moderate Velocities", DISA Information, No. 28, pp. 27-30, February, 1983.
- 15.- Satoru Komori and Hiromasa Ueda, "Turbulent Effects on the Chemical reaction for a Jet in a Nonturbulent Stream and for a Plume in a Grid-Generated Turbulence", The Physics of Fluids, vol. 27, pp. 77-86, January, 1984.
- 16.- Chwen-Yuan Guo and W. Hall C. Maxwell, "Turbulent Plane Jet Structure", ASCE J. of Engineering Mechanics, vol. 110, No. 10, pp. 1485-1497, October, 1984.
- 17.- Satoru Komori and Hiromasa Ueda, "The Large-Scale

- Coherent Structure in the intermittent region of the Self-Preserving Round Free Jet", J. of Fluid Mechanics, vol. 152, pp. 337-359, 1985.
- 18.- Satoru Komori and Hiromasa Ueda, "Turbulent Flow Structure in the Near Field of a Swirling Round Free Jet", The Physics of Fluids, vol. 28, pp. 2075-2082, July, 1985.
- 19.- J.W. Elsner and L. Kurzak, "Characteristics of turbulent flow in Slightly Heated Free Swirling Jets", J. Fluid Mechanics, vol. 180, pp. 147-169, 1987.
- 20.- T. Mahmud, J.S. Truelove and T.F. Wall, "Flow Characteristics of Swirling Coaxial Jets From Divergent Nozzles", ASME J. of Fluids Engineering, vol. 109, No. 3, pp. 275-282, September, 1987.
- 21.- M. Samet and S. Einav, "Mean Value Measurements of a Turbulent Swirling Jet", AIAA Journal, vol. 26, No. 5, pp. 619-621, May, 1988.
- 22.- Y.C. Chao, "Recirculation Structure of the Coannular Swirling Jets in a Combustor", AIAA Journal, vol. 26, No. 5, pp. 623-625, May, 1988.
- 23.- F. Mendez, E. Medina and J. Cervantes, "Forced Rotating Plume in a Stratified Fluid", International Symposium on Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmental Effects, pp. 312-317, August 1993.
- 24.- John M. Kuhlman and Robert W. Gross, "Three-Component Velocity Measurements in an Axisymmetric Jet Using LDV", Dantec Information No. 12, pp. 10-16, February 1993.
- 25.- F.E. Jorgensen, "Directional Sensitivity of Wire and Fiber-Film Probes", Dantec Information No. 11, pp. 31-37, May 1971.
- 26.- Jesús V. Benajes, "Estudio del Movimiento del Aire en el Interior del Cilindro de un Motor Térmico Alternativo", Universidad Politécnica de Valencia, apendice A.2, 1987.
- 27.- TSI, "Hot Film and Hot Wire Anemometry: Theory and Application",

28.- Esteban Barrios, "Patrones y Características del Flujo en un Modelo a Escala del Hogar de una Caldera con Quemadores Tangenciales", Tesis de Maestría, DEPEFI, UNAM, 1988.

29.- DISA, "Calibration Equipment. Instruction Manual", DISA Information Department.

30.- DISA, "55M System with 55M10 Standard Bridge. Instruction Manual", DISA Information Department.

31.- DISA, "Type 55D10 Linearizer. Instruction Manual", DISA Information Department.

32.- DISA, "Type 55D35 RMS Voltmeter. Instruction Manual", DISA Information Department.

33.- George K. Batchelor, "The Theory of Homogeneous Turbulence", Cambridge University Press, 1953.

34.- V.A. Sandborn, "Resistance Temperature Transducers", Meteorology Press, Fort Collins, Colorado, 1972.

35.- Frank M. White, "Mecánica de Fluidos", McGraw Hill, 1979.