



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA 149  
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESTUDIO DE LOS AIREADORES DE LA  
OBRA DE EXCEDENCIA DEL PROYECTO  
HIDRAULICO HUITES

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO MEGANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A:

MARTIN SALINAS VAZQUEZ



DIRECTOR DE TESIS: DR. ALEJANDRO RODRIGUEZ VALDES

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

AGOSTO 1994



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.

**A mis padres, ya que esta tesis es fruto de su arduo trabajo.**

**A Alejandro y Arturo por haber aprendido de ellos, no sólo ingeniería.**

**A Rayo, Paty, Mónica, Arturo, Edgard, Arturo Jr, Alonso y Mónica Jr y a toda mi familia por haberme soportado tantos años.**

**A todos mis amigos y a la UNAM.**

**Y sobre todo a Dios por haberme permitido llegar hasta aquí.**

## ÍNDICE.

LISTA DE SÍMBOLOS .....	1
RESUMEN .....	2
1 INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 CONSIDERACIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.1.1 CAVITACIÓN .....	3
1.1.2 AIREACIÓN .....	4
1.1.2.1 AIREACIÓN NATURAL .....	5
1.2 PROPÓSITO PRÁCTICO .....	7
1.2.1 AIREADORES .....	7
1.2.2 ESTUDIO Y FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR .....	9
1.2.3 FORMA DE LOS AIREADORES .....	12
1.2.4 LOCALIZACIÓN Y ESPACIAMIENTO DE LOS AIREADORES .....	14
1.3 OBJETIVO .....	14
1.4 TRABAJO PREVIO .....	15
2 TEORÍA .....	18
2.1 SELECCIÓN DE MODELOS MATEMÁTICOS .....	18
2.1.1 ECUACIÓN DE LA DEMANDA DE AIRE .....	18
2.1.2 TRAYECTORIA DEL CHORRO SOBRE EL AIREADOR .....	19
2.1.3 ECUACIÓN PARA OBTENER $h_v$ Y $Fr$ EN CADA PUNTO DEL VERTEDOR .....	20
2.2 SIMULACIÓN .....	21
2.2.1 CONOCIMIENTOS GENERALES DEL PHOENICS .....	21
2.3 MODELACIÓN NUMÉRICA .....	24
2.3.1 MODELACIÓN DEL AIREADOR .....	24
2.3.2 ARCHIVOS DE ENTRADA Q1 .....	25
2.3.3 (MALLA) DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO COMPUTACIONAL .....	25
2.3.4 CONDICIONES DE FRONTERA .....	27
2.3.5 GROUND .....	28
2.4 VERIFICACIÓN DEL MODELO .....	28
2.5 PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN .....	29
2.6 RESULTADOS .....	30

3 EXPERIMENTAL .....	33
3.1 VISTA GENERAL DEL MODELO .....	33
3.2 DIMENSIONES DEL MODELO .....	34
3.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS .....	41
3.3.1 PRESIÓN .....	41
3.3.2 VELOCIDAD Y GASTO DE AIRE EN EL DUCTO .....	41
3.3.3 GASTO DE AGUA .....	41
3.4 MODIFICACIONES AL MODELO .....	42
3.5 RESULTADOS .....	42
4 OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE ARRASTRE CON EL MODELO MATEMÁTICO .....	46
5 RESULTADOS .....	49
6 CONCLUSIONES .....	55
LÁMINAS .....	57
REFERENCIAS .....	87
APÉNDICES .....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS.

a	Diferencial de presión adimensional (Pn).
A	$\frac{q^2 f}{8g}$
At	Área transversal.
b	Ancho.
B	$\frac{q^2}{g}$
ds	Diferencial de ancho.
E	Factor de corrección de energía.
f	factor de fricción.
fc	factor de fricción a una determinada concentración de aire.
Fr	Número de Froude $(u/(gh)^{1/2})$
g	Aceleración debido a la gravedad.
h	Profundidad normal del agua (tirante).
ha	Carga de presión atmosférica.
hp	Carga de presión $(h + hv^2/gr)$ .
k	Constante.
K1	Constante.
K2	Constante.
K3	Constante.
L	Longitud del chorro.
lr	Longitud de la rampa
p	Presión local $(Patm + \rho_w h(g \cos \alpha \pm u^2/r))$
P	Presión sobre el chorro.
Pn	Diferencial de presión adimensional $(\frac{\Delta p}{\rho_w g h})$ .
pb	Presión bajo el chorro.
pv	Presión de vaporización del agua.
q	Gasto de agua.
Q	Gasto total.
r	Radio de curvatura del vertedor.
Re	Número de Reynolds $(lv/v)$ .
t	Tiempo.
Tg( $\theta$ )	Tangente de la pendiente del vertedor.
tr	Altura de la rampa.
ts	Altura del escalón.

- v Velocidad del agua en la sección dada.  
x Coordenada.  
y Coordenada.  
w Velocidad angular de la hélice.  
We Número de Weber .  
z Elevación sobre el punto dado.

SÍMBOLOS GRIEGOS.

- $\alpha$  Ángulo entre suelo y la normal.  
 $\rho_w$  Densidad del agua.  
 $\gamma$  Constante.  
 $\theta$  Ángulo tangente al chorro con respecto a y.  
 $\gamma$  Peso específico.  
 $\theta$  Ángulo inicial de la trayectoria.  
 $\alpha$  Ángulo de inclinación de la rampa.  
 $\epsilon_c$   $\arctan[\cos\theta_o / (\cos\theta_o + 1)]$

SUBÍNDICES.

- [o] Inicial.

## RESUMEN.

Uno de los problemas con los que se encuentran en el diseño de las presas, es el de los daños cuantiosos que pueden sufrir las obras de excedencias (vertedores), ésto como producto de la cavitación creada por las grandes velocidades que desarrollan los flujos de agua (más de 30m/s).

Los daños por cavitación, consisten básicamente en la formación de burbujas de vapor de agua como consecuencia de la creación de zonas de baja presión producidas, principalmente, por las altas velocidades ya mencionadas y por irregularidades en la superficie del vertedor (piso y paredes). Estas burbujas al ir a zonas de alta presión, implotan cerca de la superficie, pasando casi instantáneamente de forma esférica a toroidal y al reducirse el volumen a cero, generan una aceleración del agua en su entorno por el centro del toroide cuyo impacto con la superficie incrementa la presión local del orden de cientos de megapascales causando desprendimiento de material de la superficie del vertedor.

Hoy en día, para prevenir estos daños se usan sistemas de aireación, los aireadores. Los aireadores son cavidades en el piso y paredes del vertedor, que inducen la entrada de aire por debajo de la lámina de agua, para así, obtener una concentración deseada (de 6% a 8%) con lo que se puede evitar la cavitación [1].

Sin embargo, el comportamiento de los vertedores incluyendo a los aireadores es complejo, y aunque se han encontrado modelos matemáticos de carácter general, éstos han llegado a particularizarse en todos los casos.

En este documento se estudiará el comportamiento de los aireadores que se han integrado al diseño de las obras de excedencia de la presa Huites (Sinaloa México).

Primeramente a partir de la simulación por computadora, desarrollada con los modelos matemáticos que se han implantado en el código PHOENICS, tomando como base, modelos matemáticos ya desarrollados [1] y una segunda etapa que consiste en la experimentación en un modelo del diseño original con una escala 1:21, cuyo fin es la calibración del modelo matemático para determinar la función que determina el flujo del aire en función de los parámetros hidráulicos y geométricos.



# 1 INTRODUCCIÓN.

## 1.1 CONSIDERACIÓN DEL PROBLEMA.

La creación en este siglo de presas cada vez más grandes han traído consigo, que los gastos en la descarga sobre las obras de excedencias (vertedor) aumente cada día más y por ende, el fluido desarrolle grandes velocidades (más de 30 m/s) sobre éstos. Lo que trae como consecuencia que la posibilidad de daños por cavitación aumente considerablemente.

### 1.1.1 CAVITACIÓN.

La cavitación ocurre cuando la presión absoluta en el interior del fluido cae a una presión menor que la presión de vaporización del mismo; en este punto los esfuerzos de tensión en el fluido causan la formación de pequeñas bolsas de vapor, que al transportarse a regiones de alta presión implotan instantáneamente, esto es, reduce violentamente su volumen (de 100 a 1000 veces) en milésimas de segundo (Fig 1). Si ésto ocurre cerca del piso o paredes del vertedor, las implosiones crearán esfuerzos muy altos, hasta de  $10^4$  kg/cm<sup>2</sup> o 980 MPa, y si el fenómeno perdura un cierto tiempo, entonces se provocará el desprendimiento del material del vertedor. A dicho fenómeno se le denomina erosión por cavitación [21]

Los factores que favorecen la cavitaciones son las fluctuaciones en la turbulencia y disturbios debidos a la rugosidad. Entre los más comunes se tienen (Fig 2):

- 1) Agujeros.
- 2) Uniones.
- 3) Bordes.
- 4) Rugosidad.
- 5) Transición de pendientes.
- 6) Curvatura convexa.

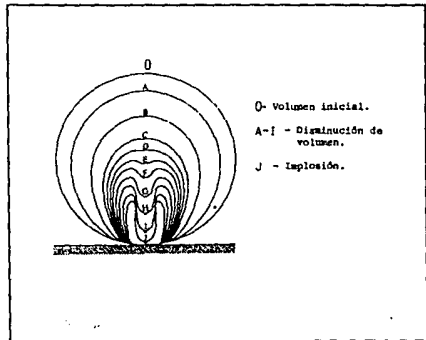


FIGURA 1

Los efectos del colapso de las cavidades de vapor son proporcionales a la velocidad y esta relación está dada por el coeficiente de cavitación:

$$k = \frac{P - P_v}{\rho_w u^2 / 2} \quad (1.1)$$

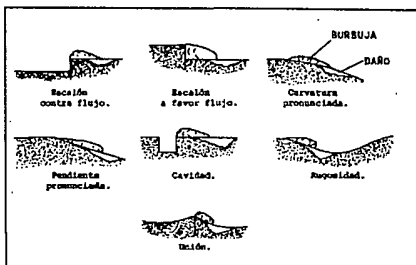


FIGURA 2

Si el valor del parámetro de cavitación disminuye, la posibilidad de cavitación aumenta, según Falvey [1] la cavitación no ocurre cuando el parámetro  $k \geq 0.25$ .

Cuando se alcanzaron velocidades de 22 a 26 m/s, este problema se evitaba usando materiales lo suficientemente resistentes para proteger al vertedor, tal es el caso de láminas de acero o polímeros, principalmente resina epóxicas. Sin embargo los altos costos y después la falta de efectividad cuando fueron aumentando las velocidades, hicieron incosteables estos métodos y se abandonaron finalmente. Hoy en día se ha venido usando la aireación como el método más efectivo.

### 1.1.2 AIREACIÓN.

La aireación es un fenómeno muy común en los flujos de agua que para las escalas de las obras hidráulicas son flujos turbulentos, y consiste en la admisión de aire, admisión que se puede realizar de las siguientes formas:

- 1) Admisión de aire sin mezcla. Se puede notar la interfase aire-agua.
- 2) Admisión de aire con mezcla. La interfase aire-agua, no se percibe. Hay disolución de aire en agua y en ella se enfoca el estudio, pues es la que se usa en estos casos.

La disolución del aire en el agua depende de la presión y temperatura del agua. Esta disolución hace que las propiedades mecánicas del agua varíen

aún con pequeñas concentraciones de aire. La mezcla se crea con la presencia de burbujas de aire en el agua.

El fenómeno de aireación es utilizado principalmente en la reoxigenación de aguas contaminadas y ésto se realiza por medio de rotores, espreadores, chorros de agua o inyectando aire directamente al agua. Sin embargo, no es la única aplicación, la aireación se presenta en otros casos, como ya se dijo en los vertedores. En éstos la aireación se produce de dos maneras: natural y forzada.

#### 1.1.2.1 AIREACIÓN NATURAL.

La aireación natural, es la mezcla de agua-aire producida, cuando en un vertedor los vórtices creados por la turbulencia atrapan aire y lo transportan en forma de burbujas al interior del flujo.

Desde el punto de vista de la aireación natural se pueden observar varias regiones en un vertedor (figura 3):

1)Región de flujo no aireado. Se encuentra después de la cresta del vertedor, se caracteriza por el crecimiento de la capa límite creándose un flujo irrotacional ( $\mu=0$ ).

2)Punto de turbulencia incipiente. Es el punto donde empieza a crearse la turbulencia. La distancia del punto incipiente y las propiedades del fluido en este punto son función de la pendiente, condiciones en la cresta (a su vez es función del gasto y de la carga de la presa) y dimensiones geométricas del vertedor. En esta región se observa la creación de vórtices que atrapan aire de la atmósfera y lo introducen al interior del agua.

3)Región de transición. Zona donde ya es generalizada la admisión de aire, por la presencia de un gran número de vórtices en la superficie del flujo. La concentración del aire va aumentando.

4)Región de flujo uniforme. Región donde la concentración de aire va disminuyendo, y por lo tanto, donde las propiedades del fluido se normalizan.

La concentración de aire se define como el volumen de aire por unidad total de volumen del flujo. Normalmente está determinada para un tiempo

estandarizado.

En la década de los '50, Petarka (1953) [1] expuso que pequeñas concentraciones de aire en el agua (1% a 2%), reduce la cavitación, pero una concentración de entre 6% a 8% hace que la cavitación se elimine (figura 4). Aunque con certeza no se sabe la razón por la que el aire reduce los daños por cavitación, se sabe que:

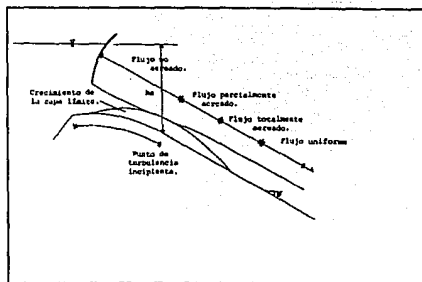


FIGURA 3.

- 1) La presencia de aire produce un amortiguamiento durante la implosión de las burbujas, reduciendo así la presión causada por la implosión, esto gracias a que el aire no se condensa.
- 2) La presencia de aire modifica el módulo elástico lo cual reduce la rapidez de las ondas de choque y por lo tanto la magnitud de éstas sobre el material de la superficie.
- 3) Forma burbujas de vapor-aire que evitan la reducción violenta de volumen, y son obstáculos para las burbujas que implotan cerca de la superficie.

Aunque existe una aireación natural por la superficie libre de la lámina de agua sobre el vertedor, las concentraciones de aire cerca de la plantilla no son suficientes, además que se presenta la deaireación por las curvaturas cóncavas y las burbujas de aire escapan por la misma superficie libre. Es por ello que se recurre a la aireación forzada para lograr aumentar la concentración de aire en el agua, la cual propicia la entrada de una gran cantidad de aire en zonas susceptibles a que se produzca la cavitación. Este proceso se lleva a cabo por medio de los aireadores.

## 1.2 PROPÓSITO PRÁCTICO.

### 1.2.1 AIREADORES.

Los aireadores son cavidades que se encuentran en el piso del vertedor y en algunas ocasiones también en las paredes, cuya función es inducir la entrada de aire en un flujo de agua. Consta, con base en las características del flujo, de las siguientes zonas (figura 5):

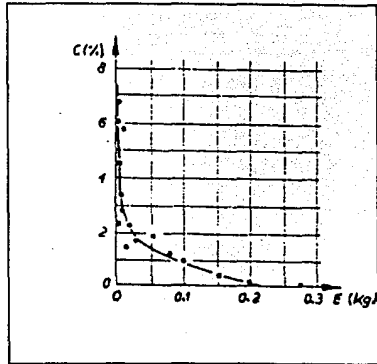


FIGURA 4.

- 1) Zona de entrada. Zona donde el agua mantiene las mismas propiedades que aguas arriba del vertedor.
- 2) Zona de transición. Zona que coincide con la longitud de la rampa, la cual tiene una pendiente menor a la del vertedor. En esta zona sucede un cambio de presiones que va desde un valor mayor a hidrostático en el inicio, hasta un valor subatmosférico al final.
- 3) Zona de aireación. Zona que comienza cuando el flujo abandona la rampa y se caracteriza por una gran admisión de aire; no se sabe con claridad como entra, aunque se cree que es debido al cambio drástico de presión y esfuerzos cortantes que sufre la parte inferior del chorro.
- 4) Zona de impacto. Zona de mezcla donde el gradiente de presión es mayor que la presión hidrostática. Este gradiente causa una rápida distribución e incremento significativo en la concentración del aire.
- 5) Zona de distribución del aire. Zona donde el gradiente de presión regresa al hidrostático. La concentración del aire en la vecindad del vertedor disminuye y las burbujas de aire que están sujetas a la fuerza de flotación ascendentes salen a la superficie.

Chanson [2] considera que la entrada del aire al flujo de agua en un aireador se produce (figura 6):

1) Por debajo y por encima del chorro sobre el aireador.

2) Cuando se intersectan el flujo de agua y los remolinos creados en el punto de impacto,

3) Por la recirculación del aire dentro del aireador.

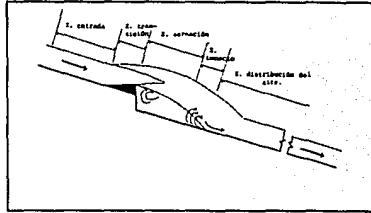


FIGURA 5.

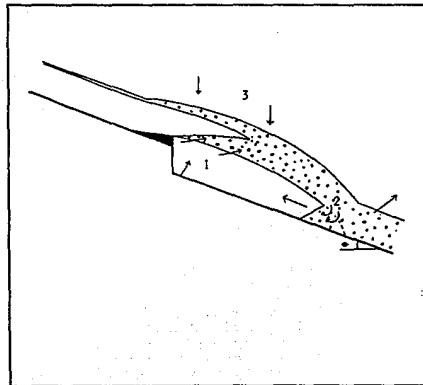


FIGURA 6.

## 1.2.2 ESTUDIO Y FUNCIONAMIENTO DEL AIREADOR.

El primer paso para el estudio de un aireador, es conocer la demanda de aire, la magnitud y distribución espacial de la subpresión bajo el chorro y su distribución, además de las características hidráulicas del flujo.

La demanda de aire es la cantidad de aire que entra en el chorro gracias al aireador. La razón del flujo de aire y del gasto de agua, se denomina beta ( $\beta$ )

La subpresión bajo el chorro es la caída de presión originada por la interacción del arrastre de aire por la lámina inferior del chorro, con la cavidad y el ducto del aireador que genera un estrangulamiento al flujo de aire. Esto es, si no hubiese la ductería del aireador entonces la cavidad estaría a la presión atmosférica y el ingreso de aire al chorro sería máximo.

Esta subpresión no es uniforme en toda la cavidad, ya que es mayor en las paredes y disminuye hacia el eje de simetría longitudinal del aireador. La subpresión está representada por el coeficiente de presión ( $P_n$ ), el cual nos relaciona la diferencia de presión o caída de presión dentro del vertedor (con respecto a la presión atmosférica) y dividida entre la presión hidrostática local.

Las características del flujo están dadas por el número de Froude, el cual nos indica la naturaleza del flujo: tranquilo, crítico, rápido. Este número es la razón de fuerza dinámica (o inercial) y la fuerza de gravedad.

En torno de estos parámetros, gira el funcionamiento del aireador y se relacionan mediante la ecuación de demanda de aire como más adelante se verá.

Los parámetros anteriores están en función de las siguientes variables:

- 1) Propiedades del fluido. Densidad, presión sobre el fluido (generalmente presión atmosférica), viscosidad dinámica, tensión superficial, presión de vaporización a la temperatura de trabajo y la aceleración debida a la gravedad.
- 2) Geometría del aireador y vertedor. Pendiente, ancho, rugosidad sobre el vertedor, tamaño del escalón, área del ducto en la superficie del vertedor, ángulo de la rampa y tamaño de la misma.
- 3) Geometría de los ductos de aire.

- 4) Propiedades del flujo. Velocidad, concentración de aire, tirante, y las velocidades turbulentas del flujo.
- 5) Propiedades de la cavidad bajo el chorro. Longitud del chorro, la diferencia de presión y el gasto de aire en los ductos.
- 6) Propiedades del flujo después del aireador. Distribución de la concentración de aire, velocidad y profundidad del flujo.

El funcionamiento de los aireadores según Volkart y Rutschmann [6] depende de dos sistemas principalmente, y éstos indican el grado de eficiencia de un aireador. Para que un aireador funcione lo mejor posible, se debe de encontrar un punto llamado punto de trabajo, donde se obtenga la máxima entrada de aire (figura 7). Estos sistemas son:

-Sistema de bombeo (línea continua). La alta velocidad del flujo de agua genera el arrastre en la interfaz agua-aire que induce el flujo de aire al agua. La entrada de aire al flujo de agua es controlada por el mismo flujo de agua.

-Sistema de suministro (línea punteada). Formado por los ductos o aberturas que introducen el aire al aireador, y que provoca la caída de presión desde la atmosférica hasta la distribución que se establece en la cavidad.

Como ya se dijo, no existe una explicación analítica para el mecanismo de cómo entra el aire en el flujo de agua, sin embargo la experimentación en modelos y un análisis dimensional han permitido determinar las variables que influyen en el fenómeno, esto es:

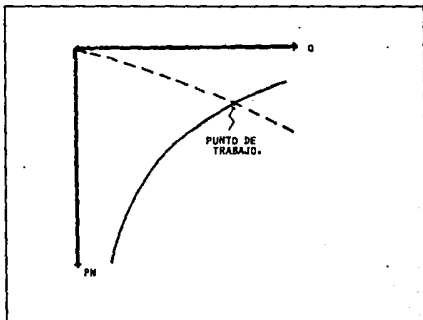


FIGURA 7.



$$\beta = f(Fr, Pn, Re, We, tg(\theta), tr/lr, (ts + tr)/h, Tu) \quad (1.2)$$

De acuerdo a los trabajos de Kobus , Pinto y Laali y Michel [3] los números de Weber y el de Reynolds no influyen significativamente cuando:

$$Re > 10e5 \quad (1.3)$$

$$We > 400 \quad (1.4)$$

que son valores por debajo de los que usualmente se presentan en las escalas de vertedores típicos. A pesar de que no hay forma de cuantificar el número adimensional que representa la intensidad de la turbulencia ( $Tu$ ), se considera que su efecto está indirectamente relacionado con el número de Froude y con la geometría. Sin considerar las variaciones de los parámetros geométricos se obtiene en forma general para un diseño específico de aireador:

$$\beta = (Fr, Pn) \quad (1.5)$$

Se han determinado una gran cantidad de ecuaciones que tratan de explicar el comportamiento de entrada del aire al flujo de agua, entre las más comunes tenemos:

$$\beta = kL \quad (1.6)$$

donde Pinto supuso que la entrada de aire es sólo función de la longitud del chorro [4].

Falvey obtuvo que [5]:

$$\beta = kFr^2 \quad (1.7)$$

Bruschin y Pan obtuvieron [5]:

$$\beta = kFr\sqrt{ES/\bar{h}} \quad (1.8)$$

y por último Rutschmann y Volkart [6] encontraron:

$$\beta = K1(K2 - Fr) - (K3Pn) \quad (1.9)$$

La ecuación 1.9 es la que mejores resultados ha tenido [6], por lo que en el presente estudio se considera para la formulación que se describe en el punto 2.1.1.

En el sistema de suministro, el parámetro más importante que interviene es  $Pn$ , ya que de éste depende la entrada de aire. Para fines de diseño generalmente, se considera que la subpresión en todo el ancho del vertedor es constante, sin embargo resultados experimentales han demostrado que la

subpresión es mayor en las paredes que en el centro [1], por lo que para conocer la demanda total de aire se debe integrar la variación de la subpresión para todo el ancho del vertedor. Para tal efecto, la distribución de presión debe ser conocida.

Hearter [6] encontró una expresión para poder calcular esta variación longitudinal de la subpresión:

$$\frac{dP}{\rho_a g} = \alpha \frac{Q_{a1}^2 - Q_{a2}^2}{A^2 2g} \frac{k_z}{k_{k0}} \quad (1.10)$$

El coeficiente alfa es igual a  $(1 + \xi)$  donde  $\xi$  es un factor que depende

de la forma que tiene el ducto en la entrada. Los coeficientes k son resultado de la corrección de considerar un flujo cuasipotencial.

Para el estudio y diseño de los aireadores, como ya se ha dicho, se necesita realizar experimentos en modelos. Se recomienda [1] que la escala de los modelos no sea menor de 1:10 a 1:15 con un ancho no muy grande (de 0.3 a 0.5 m) para el estudio de demanda de aire para diferentes formas de aireadores, donde se podrán modificar y medir las variables que intervienen en el fenómeno (*i.e.* la subpresión bajo el chorro, la longitud del chorro, además del perfil de velocidades y concentración de aire en el flujo de agua).

Sin embargo, para el estudio de la trayectoria del chorro se pueden usar escalas en modelos mucho más pequeñas de hasta 1:100.

### 1.2.3 FORMA DE LOS AIREADORES.

La forma del aireador por lo anteriormente expuesto debe de cumplir con las siguientes condiciones:

- 1) La cantidad de aire que entre en el chorro debe de ser lo más grande posible, con una concentración bien distribuida, gracias a valores grandes de beta y una pequeña Pn bajo el chorro.
- 2) El decremento del valor de beta cuando se incrementa Pn debe ser el mínimo (esto se explica con mayor detalle en la sección 2.1.1).
- 3) El área del ducto de aire debe ser lo mayor posible.

4) El aireador debe ser lo más simple y económico.

Hoy en día se ha generalizado el uso de aireadores con rampas, escalones y cavidades (figura 8). Estos elementos generalmente se encuentran en la parte inferior del vertedor (piso), aunque se pueden ubicar también en las paredes.

Las rampas tienen como ventaja que incrementan la longitud del chorro, propiciando una mayor aireación, sin embargo las grandes velocidades propician el incremento de ondas de choque. Los escalones al igual que las rampas incrementan la longitud del chorro, además de amortiguar las ondas de choque. Las cavidades ocasionan un fácil suministro de aire, siempre y cuando estén trabajando con

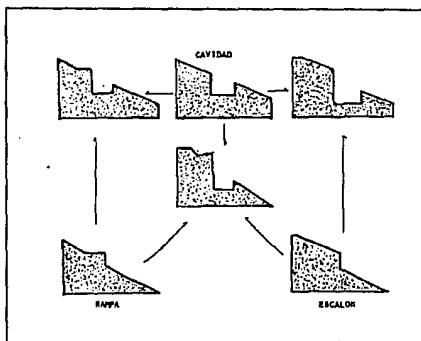


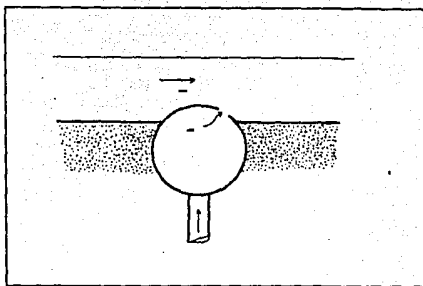
FIGURA 8.

uno o ambos elementos anteriormente mencionados.

Cabe hacer mención que aunque el modelo anterior es el utilizado en la mayoría de los vertedores, Echavez [8] creó y utilizó una diferente geometría en aireadores.

Consistía en un tubo comercial al que se le hizo una ranura longitudinal. El tubo se debe enterrar en el piso del vertedor sobresaliendo ligeramente, para con ello crear una zona de baja presión tras de él que succione el aire (figura 9). La longitud que protege el aireador no es grande, aproximadamente 15 m, por lo que su uso se debe hacer en lugares más localizados. Sin embargo al no alterar el flujo evita ondas estacionarias, además de que son muy recomendables para incorporarse en obras ya hechas donde es conveniente que la obra se altere lo menos posible.

**FIGURA 9.**



### 1.2.4 LOCALIZACIÓN Y ESPACIAMIENTO DE LOS AIREADORES.

La localización del primer aireador depende del valor local del coeficiente de cavitación, éste es, cuando las condiciones se tornen críticas para el comienzo de la cavitación.

No hay nada establecido sobre el espaciamiento entre los aireadores, pero trabajos previos [1] han utilizado distancias entre 30 a 90 m que son longitudes estándar de protección de los aireadores, sin embargo esto es muy relativo y depende mucho del diseño del vertedor y del mismo aireador.

### 1.3 OBJETIVO.

Conocer el comportamiento general de la obra de excedencias (incluyendo sus aireadores) de la presa Huites, a partir de un estudio teórico apoyado en simulaciones por computadora y uno experimental a través de la medición en un modelo a escala.

Además se buscará establecer un método que permita caracterizar el comportamiento de los aireadores, con base en el modelo matemático calibrado que se desarrolle.

## 1.4 TRABAJO PREVIO.

El trabajo del diseño del vertedor, estuvo a cargo de Sánchez Bribiesca [7]. Consiste en una estructura de dos vertederos gemelos, separados por un muro, con un ancho cada uno de 35 m. Están servidos por dos compuertas de 15.5 m de ancho cada una. Los gastos para los cuales se realizaron los cálculos por ser los más probables son 2200 m<sup>3</sup>/s, 6000 m<sup>3</sup>/s, y 9500 m<sup>3</sup>/s.

Los vertedores tienen una plantilla formada por un tramo parabólico y una cubeta circular (figura 10).

Para el cálculo hidráulico se consideraron 7 secciones. La primera en la cresta y las siguientes, están dadas por los datos que se muestran en la siguiente tabla y que también se pueden observar en la figura 10.

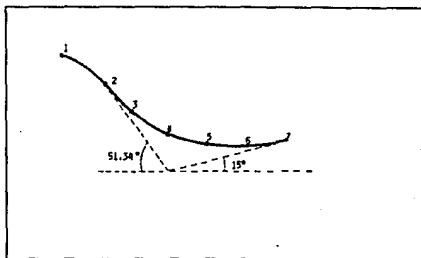


FIGURA 10

SECCIÓN	z (m)	l (m)	$\Delta\theta$
2	27.905	38.835	51.34
3	28.6343	40.7827	38.072
4	21.2238	40.7827	24.804
5	12.6892	40.7827	11.536
6	3.4772	40.7827	-1.732
7	-5.9205	4.7827	-15.0

TABLA 1

En cada sección se calculó el tirante (h), velocidad (v) y el no. de Froude

(Fr) para cada uno de los gastos obteniendo [7]:

2200 m <sup>3</sup> /s			
SECCIÓN	h(m)	v(m/s)	Fr
2	2.351	26.984	5.919
3	1.793	35.366	8.431
4	1.608	39.455	9.935
5	1.564	40.545	10.350
6	1.616	39.241	9.855
7	1.772	35.803	8.58

TABLA 2

6000 m <sup>3</sup> /s			
SECCIÓN	h(m)	v(m/s)	Fr
2	5.896	29.075	3.823
3	4.563	37.566	5.615
4	4.050	42.329	6.716
5	3.855	44.473	7.232
6	3.862	44.387	7.211
7	4.062	42.201	6.685

TABLA 3

9500m <sup>3</sup> /s			
SECCIÓN	h(m)	v(m/s)	Fr
2	8.598	31.568	3.437
3	6.840	39.683	4.844
4	6.113	44.399	5.733
5	5.816	46.668	6.178
6	5.798	46.817	6.208
7	6.040	44.939	5.838

**TABLA 4**

Con los datos obtenidos anteriormente, se calcularon los coeficientes de cavitación local para cada sección a través de la siguiente ecuación:

$$\kappa = \frac{(h_a + h_p - h_v) 2g}{v^2} \quad (1.11)$$

Además, considerando el criterio de Falvey [1], se obtuvieron las siguientes secciones críticas:

SECCIÓN	(m <sub>3</sub> /s)		
	GASTOS 2200	6000	9500
3	0.203	0.252	0.285
5	0.154	0.180	0.207

**TABLA 5.**

Con base en estos resultados se decidió construir dos aireadores, en las secciones 3 y 5. Las características geométricas de los aireadores fueron diseñados por Sánchez Bribiesca con el procedimiento descrito en la referencia [7].

## 2 TEORIA.

### 2.1 SELECCION DE MODELOS MATEMATICOS.

El comportamiento de los vertederos incluyendo los aireadores es complejo y su modelado ha consistido en expresiones matemáticas que han sido concebidas de una manera empírica a través de la experimentación en modelos y prototipos. Aunque los modelos tienen un carácter general, éstos se van particularizando según las condiciones y características de cada aireador cuando se quiere que ganen precisión

Existen varias ecuaciones que explican un solo fenómeno, las cuales pueden servir en etapas intermedias del modelo numérico, por lo que es importante considerar aquellos modelos que ya se han utilizado ampliamente con anterioridad y cuya efectividad ha sido comprobada.

#### 2.1.1 ECUACION DE LA DEMANDA DE AIRE ( $\beta$ ).

Un análisis dimensional de las variables que influyen en el fenómeno de aireación implica la función:  $\beta = f(P_n, Fr)$ . Sin embargo Koschitsky (1987) y Rutschmann (1986) [1] vieron que para  $P_n=0$  y valores altos de  $Fr$  (mayores de 6.2, que son valores usuales para los gastos y tirantes en vertederos) la relación  $\beta$ - $Fr$  es lineal. Para valores de  $Fr$  menores a 6.2, se cree que existen otros mecanismos de entrada de aire [2]. Ambos investigadores comprobaron con base en sus investigaciones experimentales que también para  $P_n \neq 0$ ,  $P_n$  y  $\beta$  son inversamente proporcionales.

Rutschmann y Volkart [6] llegaron a una expresión con base en sus experimentaciones realizadas:

$$\beta = K_1 (K_2 - Fr) - K_3 P_n \quad (2.1)$$

Se considera en [6] que  $P_n$  tiene una importancia secundaria, por lo que  $\beta$  es sólo función del Froude. El Froude es función del gasto de agua, ésto es, cuando el gasto aumenta el Froude disminuye, lo que a su vez provoca un decremento de  $\beta$ , sin embargo el gasto total de entrada de aire se determina multiplicando:



$$Q_a = Q_v \beta \quad (2.2)$$

Se tiene entonces un comportamiento opuesto del Froude y del gasto de aire con respecto al gasto de agua, por lo que se tiene que optimizar estos parámetros para maximizar beta.

### 2.1.2 TRAYECTORIA DEL CHORRO SOBRE EL AIREADOR.

Schwartz y Nutt (1963) obtuvieron una expresión que determina la trayectoria de un chorro plano (i.e. una lámina de agua) cuando está sujeto a una presión negativa en su parte inferior, se tiene lo siguiente [6]:

A partir de la figura 11 y sabiendo que:

$$q = v_0 h_0 = Vh \quad (2.3)$$

La ecuación de movimiento en la dirección vertical está dada por:

$$(P - pb) ds \cos \theta + \gamma h ds = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

(2.4)

y en la dirección horizontal:

$$-(P - pb) ds \sin \theta = \frac{d^2 x}{dt^2} \rho h ds$$

(2.5)

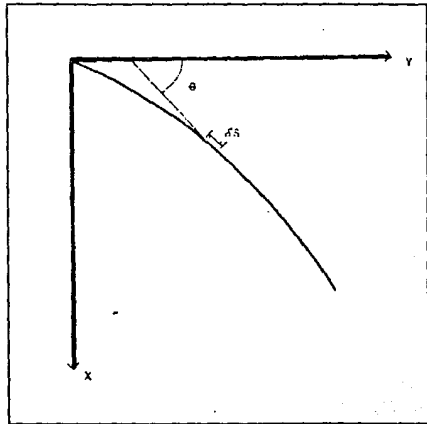


FIGURA 11

Resolviendo simultáneamente estas ecuaciones se obtienen las siguientes ecuaciones paramétricas:

$$\frac{y}{h_0} = \frac{Fr^2 \text{sen} \theta_0}{a \text{sen} \epsilon_0} \cos \epsilon_0 - \cos \left[ \frac{v_0 a t}{Ch_0} + \epsilon_0 \right] \quad (2.6)$$

$$\frac{x}{h_0} = \frac{v_0 t}{ah_0} + \frac{Fr^2 \text{sen} \theta_0}{a \text{sen} \epsilon_0} \text{sen} \left[ \frac{v_0 a t}{Fr^2 h_0} + \epsilon_0 \right] - \text{sen} \epsilon_0 \quad (2.7)$$

Rutschmann y Hager [7] obtuvieron una ecuación simplificada de las anteriores:

$$y = \tan(\alpha - \theta) x + \frac{1+a}{2Fr^2} x^2 \quad (2.8)$$

### 2.1.3 ECUACIÓN PARA OBTENER h, v y Fr EN CADA PUNTO DEL VERTEDOR.

A partir de la ecuación de la energía para un flujo con superficie libre, Wood [1] obtuvo que la elevación de la línea total de energía sobre una sección dada de un vertedor se expresa de la siguiente manera:

$$H = z + d \cos \theta + \frac{E}{2g} \left( \frac{Q}{hb} \right)^2 \quad (2.9)$$

Diferenciando y reagrupando se llega a:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{h^2 \text{sen} \theta \left( 1 + d \frac{d\theta}{dx} \right) + EBh \frac{db}{dx} / b - A \frac{f_c}{f}}{h^3 \cos \theta - EB} \quad (2.10)$$

Para la presa de Huites  $b = \text{cte}$  por lo que  $db/dx = 0$ .

Discretizando la ecuación y considerando las derivadas como diferencias finitas, se reagrupan los términos y se obtiene una ecuación de cuarto

grado:

$$-Ah^4 + Bh^3 + Ch - D = 0 \quad (2.11)$$

Resolviendo para  $h$  por medio del método Gauss-Jordan, se obtienen los puntos de interés sobre la coordenada longitudinal del vertedor. Considerando que:

$$v = Q/bh \quad (2.12)$$

$$Fr = v/(hg)^{0.5} \quad (2.13)$$

se obtienen el tirante, la velocidad y el Froude. En el apéndice D se describe el programa de cómputo que determina estos parámetros.

## 2.2 SIMULACIÓN.

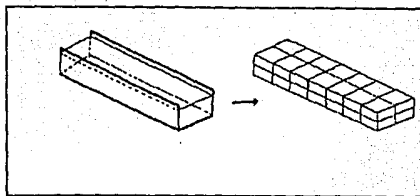
### 2.2.1 CONOCIMIENTOS GENERALES DEL PHOENICS.

La simulación se realizó implantando las ecuaciones que se han descrito en el código PHOENICS, cuyo principio de operación consiste básicamente en la utilización del método del volumen finito para discretizar el dominio computacional y resolver las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía con procedimientos iterativos.

La forma de proceder inicia con la discretización del modelo que se va a estudiar (figura 12), esto es, el medio continuo ( *e.g.* el aire) se divide en elementos discretos  $\Delta x$  ,  $\Delta y$  y  $\Delta z$  para las tres direcciones de los ejes de referencia que podrán ser ortonormales, o bien considerando coordenadas curvilíneas. De hecho, en el caso del estudio que considera la cavidad que se forma entre la plantilla del vertedor y la lámina de agua, es necesario emplear coordenadas curvilíneas.

En el código numérico se han implantado las rutinas que permite la solución de la ecuación generalizada de transporte:

FIGURA 12



$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho v\phi) - \nabla(\Gamma\phi\nabla\phi) = S_\phi + C(v-\phi) \quad (2.15)$$

	$\phi$	$\Gamma_\phi$
CONTINUIDAD.	1	0
CANTIDAD DE MOVIMIENTO.	u,v,w	$\mu$
ENERGIA CINETICA TURBULENTA	k	$(\mu_1 + \mu_2) / \sigma_k$
RAPIDEZ DE DISIPACION	$\epsilon$	$(\mu_1 + \mu_2) / \sigma_\epsilon$
ENERGIA.	T	$(\mu / \sigma_1 + \mu / \sigma_2)$

TABLA 6.

para cada una de las variables (  $\phi$  ) con sus respectivos términos difusivos (ver tabla 6). Esta ecuación se discretiza para cada uno de los elementos del dominio computacional, para tener una relación algebraica en vez de una ecuación diferencial parcial. Las variables (  $\phi$  ) son básicamente u1,v1 y w1, i.e. las componentes de la velocidad con las cuales la ec. 2.14 representa

la ecuación de Navier-Stokes, y  $p_1$  que es la variable de la presión a través de la cual se representa la ecuación de continuidad. Con las variables anteriores se puede simular un flujo laminar, sin embargo si se requiere simular un flujo turbulento se deben añadir las variables  $k$  y  $\epsilon$  que representan a la energía cinética turbulenta y su rapidez de disipación, respectivamente. El modelo de turbulencia se detalla más adelante.

Cabe mencionar que si existe transferencia de calor, o bien un flujo que no es isotérmico, entonces se añade otra variable  $h_1$ , que representa la entalpía. Esto es, se resuelve también la ecuación de energía con base en la entalpía en vez de la energía interna. Si adicionalmente se presenta la coexistencia de 2 fases (e.g. agua-vapor, agua-aire, fluido-sólido) se añade el mismo número de variables para la segunda fase (identificadas con el sufijo 2, i.e.  $p_2$ ). Llegándose a obtener las tres ecuaciones básicas que se resuelven con el código PHOENICS:

Ecuación de Navier Stokes.

$$\frac{Du}{Dt} = -1/\rho \nabla p + \nu \nabla^2 u + g \quad (2.14)$$

Ecuación de Continuidad.

$$1/\rho \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot u = 0 \quad (27)$$

(2.15)

Ecuación de energía.

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (2.16)$$

Para poder representar con realismo los flujos turbulentos, se debe implantar un modelo de turbulencia que simule estos efectos, ya que la descripción directa de todas las escalas de los remolinos que existen en flujos turbulentos es prácticamente imposible [22]. Uno de los modelos que ha

tenido éxito en diversos estudios de flujos turbulentos es el llamado  $k-\epsilon$ . Este modelo consiste en la obtención de la viscosidad turbulenta, ya que cuando existe un flujo turbulento la viscosidad efectiva se representa por:

$$\mu_{efec} = \mu_{laminar} + \mu_{turbulenta} \quad (2.17)$$

mientras que para flujos laminares la viscosidad efectiva será:

$$\mu_{efec} = \mu_{laminar} \quad (2.18)$$

La viscosidad turbulenta se determina a partir de los valores locales de las propiedades escalares llamadas energía cinética turbulenta ( $k$ ) y la rapidez de disipación ( $\epsilon$ ).

$$\mu_{turbulenta} = C\mu\rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.19)$$

Los valores de  $k$  y  $\epsilon$  se obtienen resolviendo una ecuación de transporte para estas variables [22].

## 2.3 MODELACIÓN NUMÉRICA.

### 2.3.1 MODELACION NUMERICA

El primer paso para desarrollar un modelo numérico de los aireadores, es reconocer que es lo que específicamente se desea simular para crear un modelo lo más sencillo posible, sin perder de vista por supuesto, la fidelidad del mismo. El modelo numérico para los aireadores de la obra de excedencias de la presa Huites, fue construido bajo las siguientes premisas las cuales se expondrán más ampliamente en el resto de este capítulo:

- 1) El modelo se considera como un fenómeno de una fase, por lo que sólo se estudiará el comportamiento del aire.
- 2) El chorro de agua, como consecuencia del punto anterior, se

calculada.

3) La aireación bajo el chorro en el aireador se comportará como lo indica la ecuación 2.1.

4) Por simetría, se considerará sólo la mitad del vertedor.

5) La simulación se realizó para el modelo físico con una escala 1:21 que se construyó en el Laboratorio de Hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

6) Se simularon 4 gastos (0.5, 1, 1.5 y 2 m<sup>3</sup>/s) y en algunos casos otro de 3 m<sup>3</sup>/s

### 2.3.2 ARCHIVOS DE ENTRADA Q1.

La información sobre la malla que comprende la discretización del dominio, condiciones de frontera, parámetros de relajación, y demás información para la resolución del problema, se especifica en un archivo de entrada denominado Q1. Este archivo está dividido en 24 grupos que no tienen un significado especial más que el de ayudar al ingeniero a construir más fácilmente los datos de entrada al programa. Se hizo un archivo Q1 para cada gasto diferente. Un archivo Q1 se muestra en el apéndice A.

### 2.3.3 (MALLA) DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO COMPUTACIONAL.

La malla es la discretización del dominio en pequeños volúmenes finitos, con el fin ya descrito anteriormente.

Se hicieron 5 diferentes mallas, una para cada gasto (.5, 1, 1.5, 2 y 3 m<sup>3</sup>/s), sin embargo todas constaban del mismo número de celdas: 28 en y y 20 en z. Estos valores hacen un total de 14 560 celdas.

En el apéndice B, sólo se muestra un plano en cada dirección de la malla, pero es suficiente para ver como están distribuidas las celdas. La malla sólo representa la mitad del vertedor, margen izquierda, puesto que se considera la mitad del vertedor como eje de simetría.

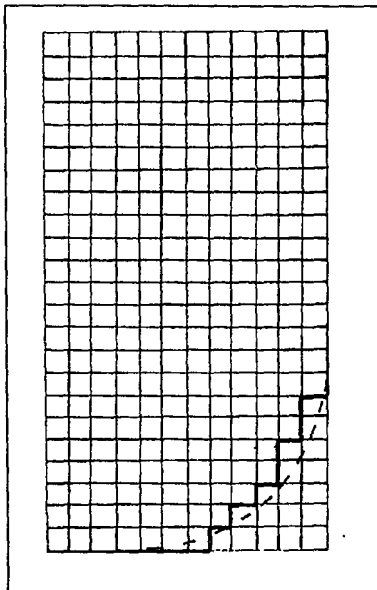
La malla se hizo a partir de las medidas del aireador y vertedor expuestas en el capítulo siguiente. La trayectoria del chorro se obtuvo primeramente con

la ayuda de la ecuación 2.1, a partir de la cual se obtuvieron los parámetros hidráulicos: tirante, no. de Froude y velocidad.

Una vez obtenidos los parámetros hidráulicos, se obtiene la trayectoria del chorro (la parte inferior de la lámina de agua). Una curvilínea paralela a la anterior se coloca con una separación entre ambas del valor del tirante para obtener el chorro completo.

Usando porosidades (ver CONPOR en el apéndice A) se bloquean las celdas para delimitar las diferentes regiones donde pasará el fluido. Los muros, chorro y escalón se considerarán cuerpos sólidos (flujo nulo) con una porosidad de 0. Como se aprecia en la figura 13, con la porosidad se generó la forma de la parte inferior del ducto del aireador, aproximándola con pequeños escalones.

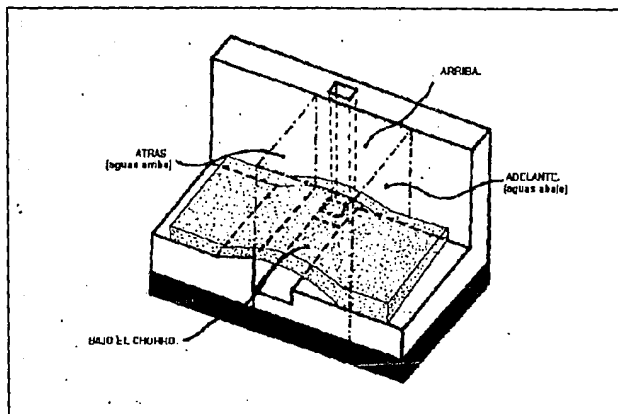
Los datos de las coordenadas de los puntos, líneas y curvas que crean la malla, se introduce en una base de datos. Esta base de datos es un archivo con la extensión LOG. En el apéndice B se muestra una base de datos para el aireador # 5 a la escala del modelo.



**FIGURA 13.**



FIGURA  
14.



### 2.3.4 CONDICIONES DE FRONTERA.

Las condiciones de frontera son un punto muy importante, ya que de ellas depende el resultado final del problema. Las condiciones de frontera de este modelo, consistieron básicamente de entrada y salida de masa de aire del dominio. Ver figura 14.

1) AGUAS ARRIBA. Consistió en entrada de masa a velocidades fijas a lo ancho del aireador. Se consideró un perfil de velocidad tipo escalón cuyo propósito es simular el cortante que se pudiera formar entre el agua y el aire. Y estas dos velocidades, tenían el fin de evitar extender el dominio aguas arriba, ya que si no se ponían, toda la entrada de aire se concentraba en el punto más cercano a la entrada del ducto aguas arriba, por la proximidad de la frontera.

2) PARTE DE ARRIBA. Se indicó que sólo podía entrar masa al dominio. El modelo, modificaba las velocidades de este flujo según el comportamiento de las otras restantes condiciones de frontera.

3) AGUAS ABAJO. Sólo se permitía la salida de masa del dominio, sin fijar velocidades de salida.

4) BAJO EL CHORRO. La más importante de las condiciones de frontera, ya que esta representa la aireación forzada, o bien succión, que genera el aireador. Se permite sólo la salida de masa, sin fijar velocidades de salida pero sí el gasto de aire por unidad de área. Para poder caracterizar este fenómeno de aireación forzada se hizo necesario utilizar un modelo matemático (ecuación 2.1). La ecuación se codifica en el archivo "ground" que a continuación se describe.

### 2.3.5 GROUND.

El archivo GROUND es una subrutina, que destina el código PHOENICS para que el usuario pueda introducir algún modelo matemático, el cual no esté integrado en el mismo PHOENICS.

En este caso fue necesario introducir el modelo de demanda de aire (la ec. 2.1), con ésto el código PHOENICS es capaz de calcular el parámetro beta y por ende el gasto de aire que entra en el aireador.

En la subrutina GROUND se incorporaron 3 ecuaciones, sin embargo la ecuación que mejores resultados tuvo, es la que se explica en el punto 2.1.1.

En el apéndice C se muestra la codificación que se realizó en el archivo "ground".

## 2.4 VERIFICACIÓN DEL MODELO.

Para comprobar la eficacia de este modelo, era necesario compararlo con datos experimentales que ya previamente se habían obtenido. Para esto se simuló primeramente, los aireadores de la presa Foz do Areia (Brasil), la cual es una de las más estudiadas, y para la cual se cuenta con algunas mediciones de campo.

Utilizando números de Froude, tirantes y velocidades que se tenían como datos experimentales, se realizó el modelo como se indicó previamente.

La ecuación de beta que mejor representa el comportamiento de los aireadores de esta presa es [6]:

$$\beta = 0.1713(Fr - 4.94) - 1(Pn)$$

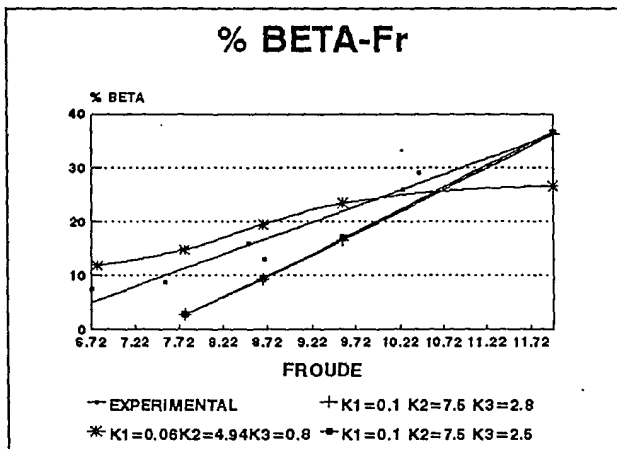
(2.20)

Se vió que los valores arrojados por el modelo numérico solo variaban en no más de un 5% de los valores medidos experimentalmente.

## 2.5 PROCEDIMIENTO DE SIMULACIÓN.

En nuestro caso, no se contaba con tanta información experimental, por lo que se tuvieron que encontrar las constantes K1, K2, K3 por aproximaciones sucesivas, esto es, se proponían unos valores de dichas constantes y se corría el programa de simulación. Una vez que se obtenían los parámetros como: presiones bajo el chorro, la beta, gasto de aire y velocidades del aire en el aireador, se graficaban los diferentes parámetros. Ver gráfica 1

GRÁFICA  
1.



Ya graficados los parámetros, se van cambiando las constantes hasta llegar a una ecuación que modele lo mejor posible el comportamiento del aireador. Cabe mencionar que el punto de partida de estas constantes, fueron las constantes para Foz.

## 2.6 RESULTADOS.

Aunque los resultados finales se mostrarán en capítulos posteriores, aquí se verán algunos resultados parciales de gran importancia, ya que dieron la pauta para llegar a un final satisfactorio.

Si se graficara beta con respecto al número de Froude, se observaría que el comportamiento de un aireador tiene la tendencia que se muestra en la figura 15. Esto nos indica que en la zona 1 existe una aireación muy pequeña y más o menos constante, la cual no tiene utilidad práctica.

Pasando un cierto valor del número de Froude que llamaremos crítico (La constante K2 en nuestra ecuación), la aireación tiene un comportamiento lineal, incrementándose la aireación considerablemente, en esta zona de la fig 15 se desea que trabaje el aireador. Una tercera zona es cuando el chorro llega a un estado de saturación, y no puede absorber más aire, por lo que llega a un estado de aireación máxima.

En los resultados obtenidos, se pueden visualizar las dos últimas regiones perfectamente y se puede deducir la primera, ya que si se alarga la recta en la figura 15 desde el punto hasta el cual corta con la horizontal, se determina un valor muy cercano al Froude crítico o K2.

Se comentó anteriormente que en la frontera aguas arriba, una de las condiciones es que sólo entra un gasto másico con una velocidad fija, con un perfil de escalón.

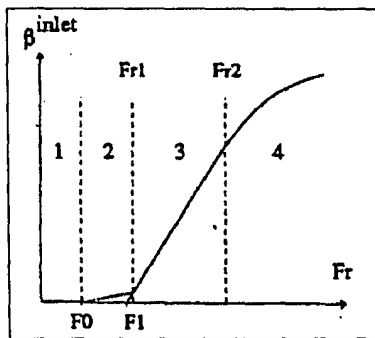
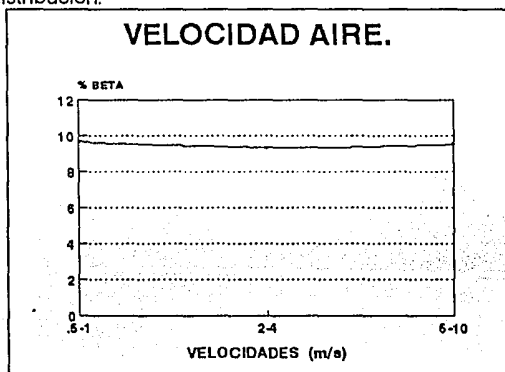


FIGURA 15.

Las velocidades son de 4 y 2 m/s, siendo la más grande la más cercana al flujo de agua. Sin embargo se contempló qué pasaría si se cambiaran estos valores. En la gráfica 2 se muestra, que el comportamiento de la beta no cambia, esto es, que si se disminuyen o se aumentan estas velocidades, y por lo tanto el gasto másico de esta frontera aumenta o bien disminuye, el gasto de aire que entra al chorro permanece constante, ya que el cambio de gasto por una frontera, se compensa por la frontera superior.

A pesar de que no cambia beta, que es el parámetro más importante por determinar, sí existen pequeñas variaciones en otros parámetros (la más notoria es para las velocidades en el ducto ya que es de un 15%, entre valores extremos). Para los contornos de presión el valor promedio no cambia, lo que cambia un poco es su distribución.

GRÁFICA 2.

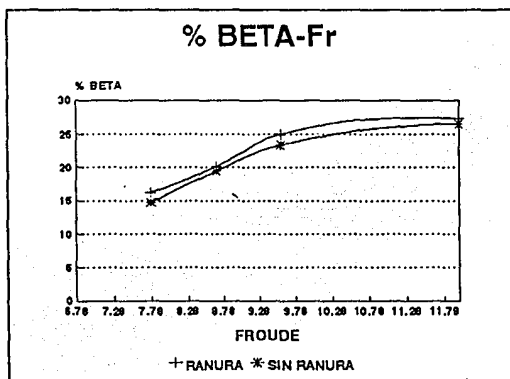


En el capítulo siguiente se explicará con mayor claridad que durante la experimentación se hicieron modificaciones al modelo, las cuales cambiaron el área del ducto de entrada de aire y se formó una pequeña ranura junto a la pared. Este cambio se debió a que el ducto se inundaba de agua, por lo que se puso una pequeña rampa en la pared del vertedor, inmediatamente aguas arriba del aireador.

En la simulación no se tomó en cuenta estos cambios, pero si se estudió qué efectos podrían tener en ésta. Al igual que el punto anterior, se vió que el parámetro principal beta no cambiaba sustancialmente con el cambio de área de entrada de aire, si no lo que cambiaban eran las velocidades del aire en el ducto. En la gráfica 3 se compara el comportamiento del aireador, con y sin la mencionada ranura.

Con base a lo anterior, se considera que las constantes de la ecuación de beta son las que dan el comportamiento particular del aireador en estudio, mientras que las dos condiciones anteriores, esto es el cambio de velocidad en la condición de frontera, y el cambio en el área de entrada de aire, proporcionan una herramienta para poder hacer una calibración fina del modelo.

GRAFICA 3.



## 3 ESTUDIO EXPERIMENTAL.

### 3.1 VISTA GENERAL DEL MODELO.

El modelo a escala del cual se obtuvieron todos los datos experimentales, es un modelo 1:21 del prototipo original descrito en el primer capítulo. La cubeta esta hecha de cemento y en ésta se incorporaron los aireadores en los puntos antes mencionados.

Las paredes del vertedor son igualmente de cemento, a excepción de las regiones aguas abajo inmediatamente después del aireador las cuales están hechas de lucita, ésto con el fin de poder observar la cavidad del aireador y el comportamiento del chorro. Los ductos de aire están hechos de lucita, se acoplaron a las paredes del vertedor con tornillos y se aplicó silicón para evitar fugas de agua.

El funcionamiento del modelo es básicamente el siguiente:

- 1) Dos bombas de 120 HP con capacidad de hasta 2 m<sup>3</sup>/s suben el agua desde el cárcamo de bombeo hasta un tanque de descarga provisto de un aquietador de flujo construido con ladrillos (ver fotos).
- 2) El tanque de descarga alimenta al modelo aguas arriba. Para regular el gasto se encuentra un 'by-pass' que descarga los excedentes al cárcamo de bombeo.
- 3) El agua fluye por el vertedor.
- 4) Aguas abajo del labio de la cubeta, se encuentra un tanque, donde el vertedor descarga el gasto de agua.
- 5) Este tanque está conectado a un canal de retorno, divididos sólo por aquietadores de flujo.
- 6) En el canal de retorno se mide, por medio de un aforador, el gasto de agua del vertedor.
- 7) El ciclo se cierra cuando el agua pasa del canal de retorno al cárcamo de bombeo. Ver fotos.

### 3.2 DIMENSIONES DEL MODELO.

Medidas generales del modelo.

En la figura 16 se puede observar un plano donde se encuentran las medidas del modelo.

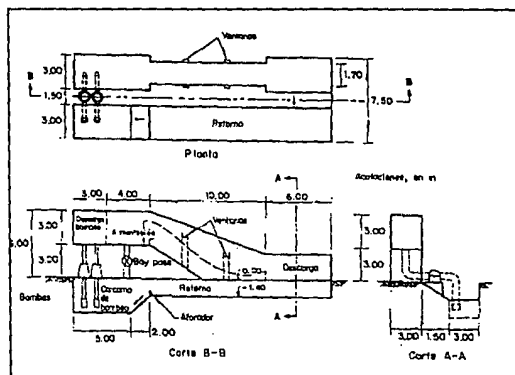
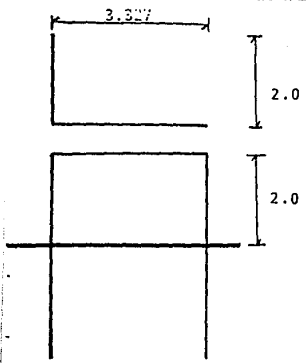


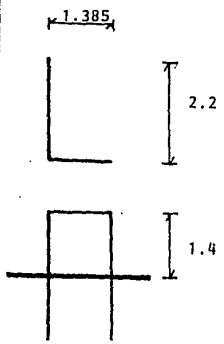
FIGURA 16.

Aireadores.-En la figura 17, se muestran las dimensiones de los aireadores 1a, 1b, 4, y 5.

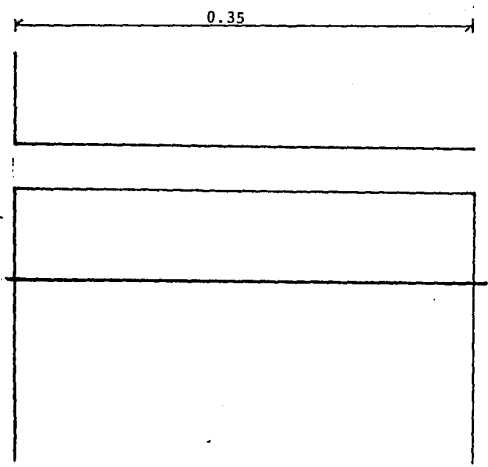




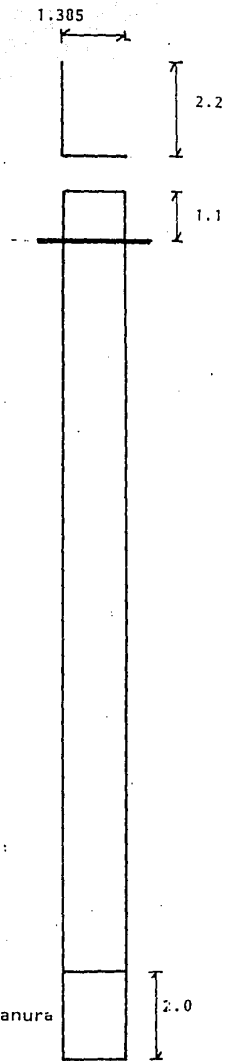
Aireador 4  
Prototipo.



Aireador 1b.  
Prototipo.



Aireador 5.  
Modelo.



Aireador 1a.  
Prototipo.

Ranura

FIGURA 17.

Acotaciones en metros.

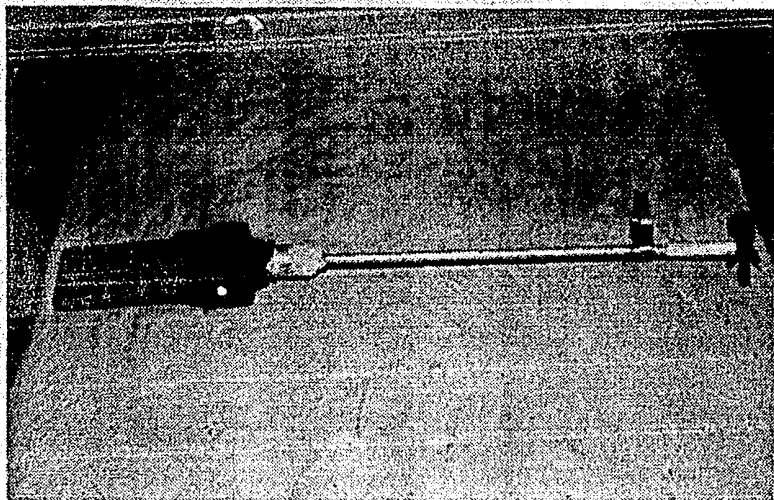


Foto 1. Instrumento para medir gasto de aire.

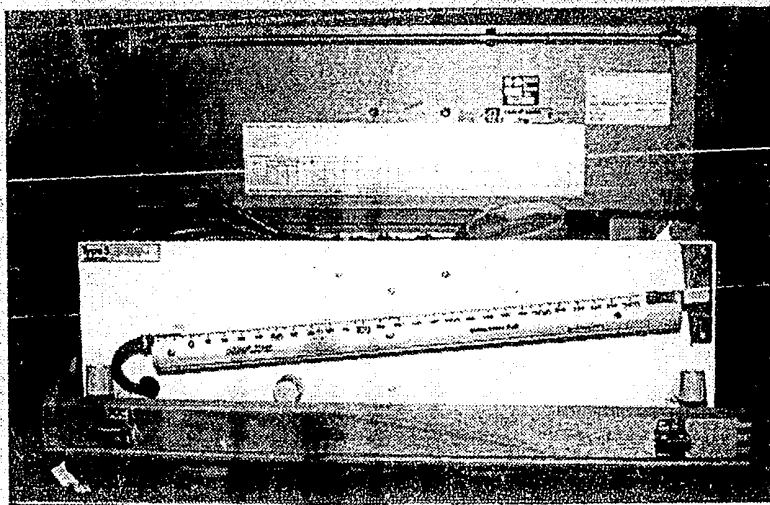


Foto 2. Instrumento para medir presiones.

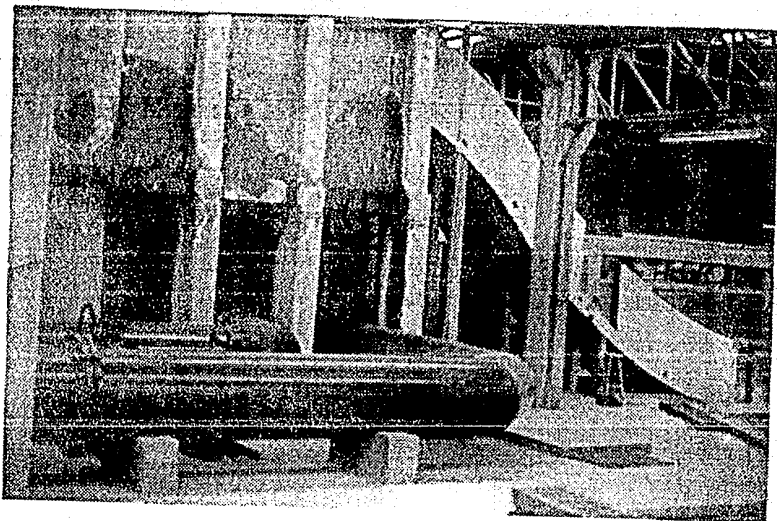


Foto 3. Tanque de alimentación y vista lateral del modelo.

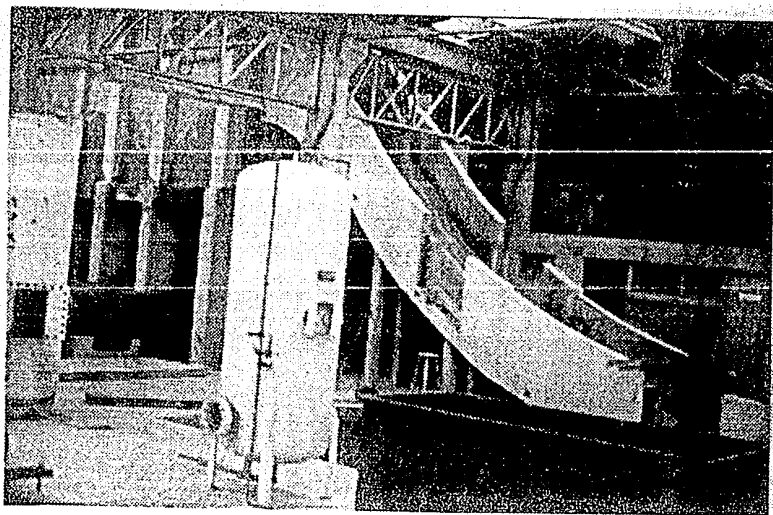


Foto 4. Vista parcial del modelo.

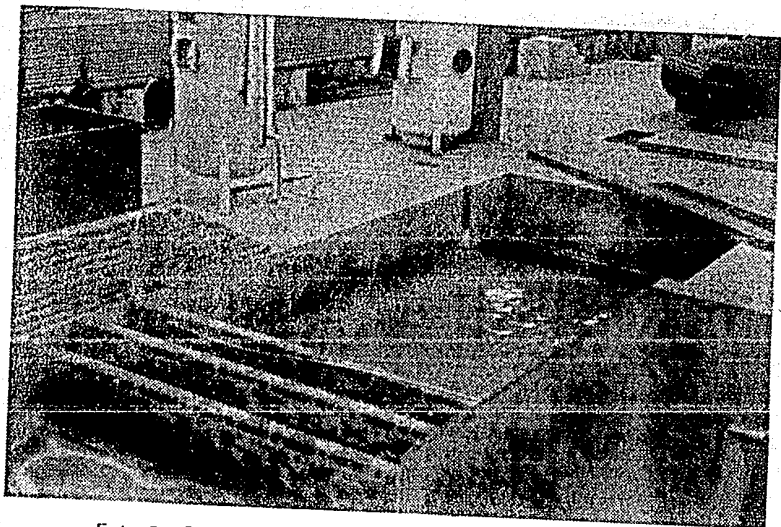


Foto 5. Canal de retorno.

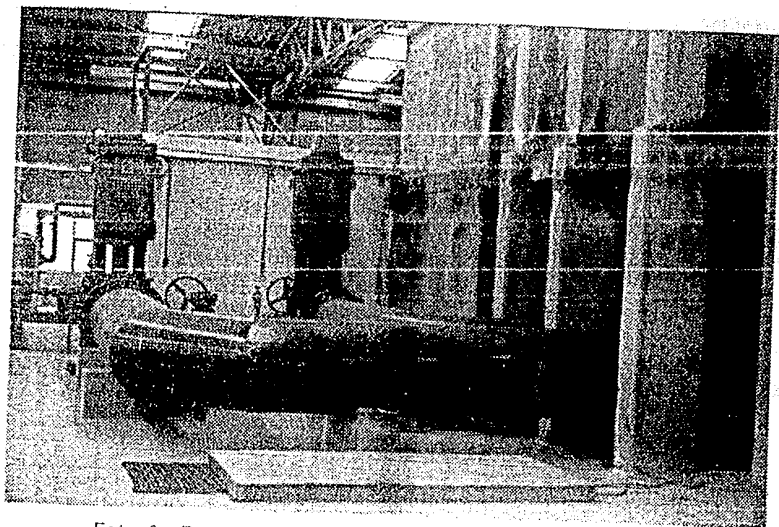


Foto 6. Bombas y tubos alimentadores.

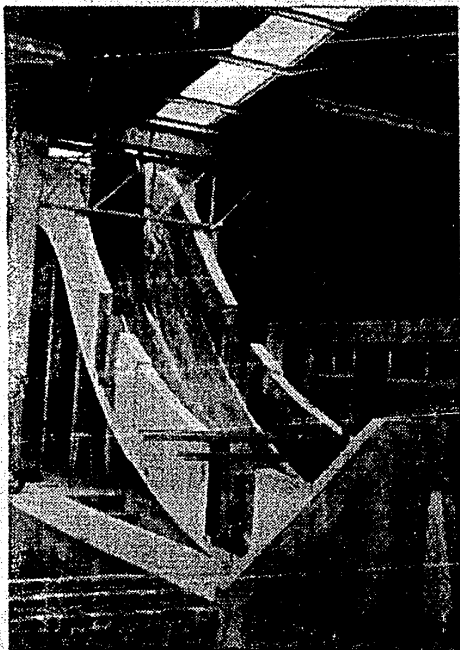
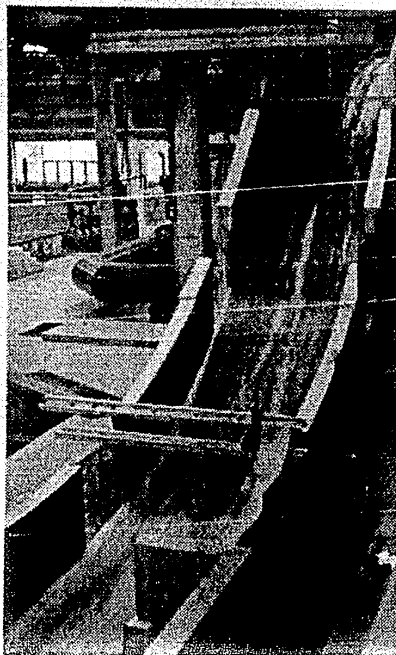


Foto 8. Vista del modelo.

Foto 7. Vista del modelo.



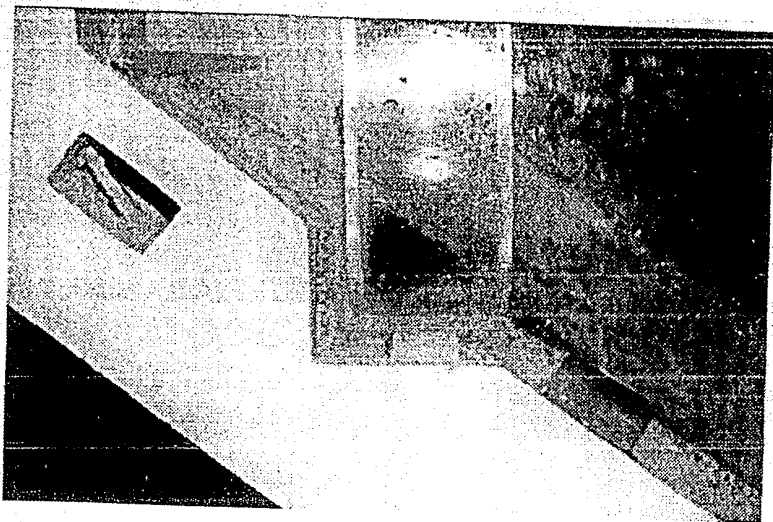


Foto 9. Aireador 3.

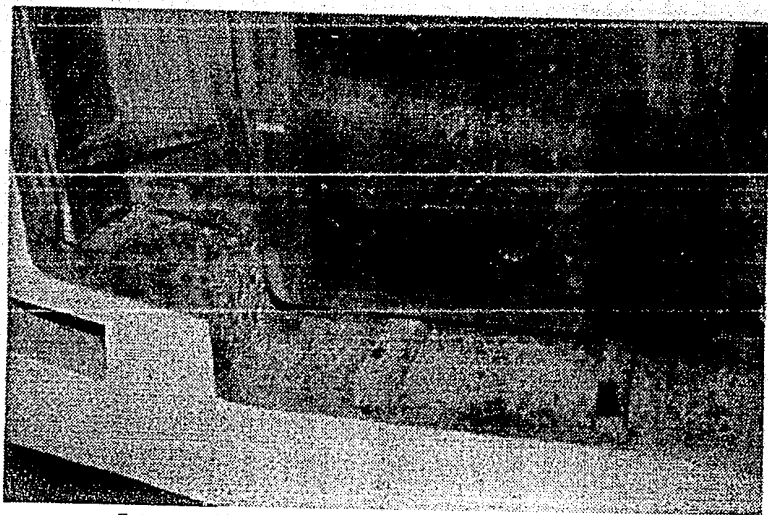


Foto 10. Aireador 5.

### 3.3 MEDICIÓN DE PARÁMETROS.

#### 3.3.1 PRESIÓN.

La subpresión en el aireador se midió por medio de un manómetro diferencial, el cual por la inclinación que tiene puede medir presiones manométricas muy pequeñas, del orden de Pascales. (ver foto 2)

#### 3.3.2 VELOCIDAD Y GASTO DE AIRE EN EL DUCTO.

Su principio de funcionamiento es el siguiente:

Consta de una hélice, que gira a una velocidad angular dada según sea la velocidad tangencial con la que fluya el aire (ver foto 1). Un transductor previamente calibrado mide la velocidad angular en rev/min de la hélice. A partir de un factor obtenido de la calibración del instrumento se obtiene la velocidad del aire:

$$V = kw \quad (3.3)$$

El gasto de aire, se obtiene a partir de la suposición de que el gasto es constante en toda el área transversal del ducto. Se obtiene de la siguiente forma.

$$Q = VA \quad (3.4)$$

#### 3.3.3 GASTO DE AGUA.

En el canal de retorno se encuentra un aforador, éste es el encargado de medir el gasto de agua de la siguiente forma:

El canal de retorno tiene una área de planta plenamente establecida y el tirante del agua se mide directamente por medio de una limnómetro que se encuentra en la pared del canal.

Por medio de los aquietadores, se trata de que el flujo de agua que pasa por el canal de retorno tenga una profundidad constante al mantener el gasto constante en el vertedor.

Con el tirante medido en el canal, el gasto de agua se obtiene de la siguiente forma, donde  $k$  es una constante previamente calibrada:

$$Q = kh \quad (3.5)$$

### 3.4 MODIFICACIONES AL MODELO.

En el transcurso del desarrollo del proyecto se solicitaron ciertas modificaciones con respecto al diseño original por el Consorcio del P.H. Huites; dichas modificaciones del modelo consistieron en:

- 1) Cambio de la posición del aireador 5 en el vertedor del ángulo  $11.536^\circ$  de la cubeta circular del vertedor al ángulo  $12.5339^\circ$ .
- 2) Cambio del ángulo de la rampa del aireador 5 de  $3.25^\circ$  a  $5.5^\circ$ .
- 3) Cambio de la posición del aireador 3 de  $38.072^\circ$  a  $39.3226^\circ$ .

Durante el funcionamiento se vió que se inundaba el ducto de aire del aireador 5, por lo que se colocó una pequeña rampa en la pared del vertedor inmediatamente antes del aireador y se obstruyó parte del ducto cambiando el tamaño del ducto de 35 cm a 28 cm aprox.

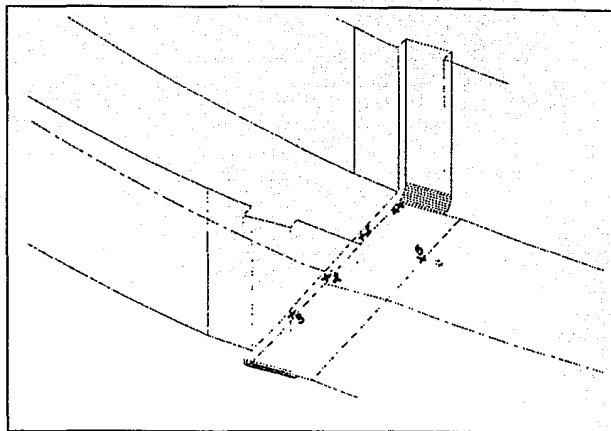
Con ésto el área del ducto de aire disminuyó, pero la pequeña rampa ocasionó que se formara una pequeña ranura junto a la pared, compensando la disminución de área en el ducto.

### 3.5 RESULTADOS

Las presiones se midieron en los puntos que indica la figura 18. La siguiente tabla muestra los datos experimentales.



**FIGURA  
18.**



GASTO (m <sup>3</sup> /s)	h (cm)	BET A (%)	PRESIÓN (Pa)				GASTO AIRE (m <sup>3</sup> /s)
			1	2	(VAC.)		
					3	4	
0.625	0.23	29	15.7	11.8	16.7	11.8	0.18
1.2	8.6	13	13.7	10.3	13.7	8.3	0.155
1.6	11.25	8.7	11.8	8.8	11.8	4.9	0.141
1.866	13.25	7.5	4.9	0.0	2.5	1.96	0.14

**TABLA 7.**

Las velocidades aproximadas del aire en el ducto son:

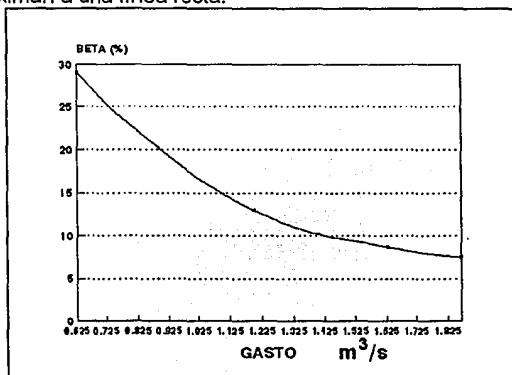
GASTO (m <sup>3</sup> /s)	VELOCIDAD (m/s)
0.5	7.31
1.2	4.83
1.63	4.82
1.866	5.56

TABLA 8.

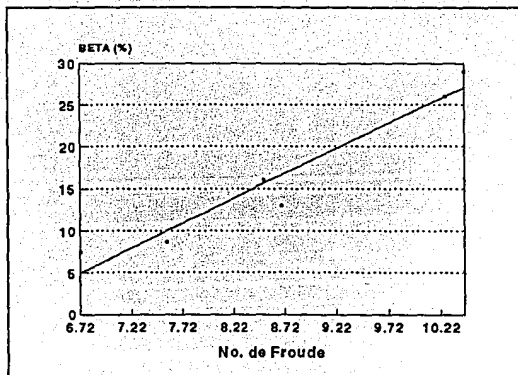
A continuación se presentan gráficas del comportamiento experimental del aireador de acuerdo con los datos medidos. En esta gráfica los puntos experimentales se aproximan a una línea recta.

Gasto-Froude en la gráfica 4 y beta-Froude en la gráfica 5.

GRAFICA 4.



GRAFICA 5.



## 4 OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE ARRASTRE CON EL MODELO MATEMÁTICO.

### 4.1 CALIBRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

En el estudio para caracterizar el comportamiento de los aireadores la parte experimental es primordial, sin embargo el trabajo experimental se puede optimizar a través de la modelación numérica del problema y sobre todo se puede realizar un estudio con mayor detalle que permite mayor conocimiento de los fenómenos involucrados. Un ejemplo de esto fue la obtención de la función de arrastre (beta) de aire en los aireadores.

Como no se contaba con datos experimentales de las presiones bajo el chorro en toda la superficie del piso del aireador, por su dificultad para medir, no se pudo obtener una correlación matemática directa entre las presiones, números de Froude y gastos de agua para obtener las constantes de la ecuación de beta. Por lo que una vez obtenidas las mediciones experimentales de las presiones en varios puntos como se describe en la sección 3.3, se procedió de la siguiente manera para obtenerla:

De lo reportado por Rutschmann y Volkart [1], la ecuación 2.1 sólo puede modelar el comportamiento beta/Froude, cuando el Froude es grande (parte lineal). Ver figura 15. Con los datos experimentales obtenidos, se procura que éstos describan una línea recta.

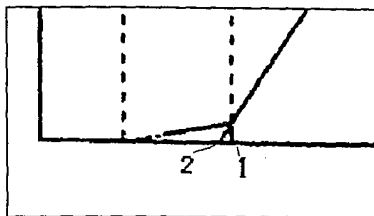
Se prolonga esta recta hasta que intersecte el eje de las abscisas, obteniéndose el punto 2 en la figura 19. Esta figura es un acercamiento de la figura 15.

Se traza una recta perpendicular al eje de las abscisas desde el punto aproximado donde comienza el comportamiento lineal, obteniéndose el punto 1.

La constante  $K_2$  de la ecuación, se encontrará entre los puntos 1 y 2. Se recomienda que se comience muy cerca del punto 1, ya que  $K_2$  está muy cerca de este punto.

Con base en los datos experimentales, se toma un valor de beta a un Froude dado, recomendándose que esté dentro del comportamiento

lineal. Ver Fig 15 del comportamiento de beta contra Froude.



Con la constante  $K_2$  ya obtenida y considerando una subpresión igual a cero (*i.e.* el segundo término de

FIGURA 19.

la ecuación se anula), se calcula  $K_1$ .

Se deben probar varios  $K_1$ , hasta llegar a un valor satisfactorio.

Como se consideró la subpresión igual a cero, se debe aumentar el valor de  $K_1$  un poco (20 o 30%) y asignar un determinado valor a la constante  $K_3$  que generalmente no excede de 2.

Se simula con esta ecuación para 4 o 5 gastos diferentes, y se comparan resultados con los experimentales.

Si no se tiene una buena aproximación del modelo numérico con los datos experimentales se cambian constantes, ya sea partiendo nuevamente desde el inicio, o considerando los siguientes dos puntos si la simulación arroja resultados cercanos a los datos experimentales.

Las constantes  $K_1$  y  $K_3$  son dependientes, y el cambio de alguna de ellas se refleja, cambiando la pendiente de la recta.

Si se cambia  $K_2$ , la recta sufrirá sólo una traslación.

Se debe comprobar, que no sólo las betas concuerden con las betas experimentales, si no que también las velocidades en el ducto y las presiones en el aireador estén dentro del rango de incertidumbre de los datos experimentales.

No se recomienda cambiar los valores de las constantes de una forma brusca cuando el comportamiento de la simulación numérica esté cerca del experimental.

Esta forma de obtener la ecuación de beta, se obtiene al considerar que los datos experimentales, siguen el comportamiento que describe la gráfica 15

Este procedimiento se realizó para las pruebas del aireador 5 del modelo, obteniéndose los valores correspondientes de las constantes de la expresión de beta. En la tabla siguiente se comparan estos resultados con valores de las mismas constantes para aireadores de otras presas:

PRESA.	K1	K2	K3
Huites (#5 del modelo)	0.068	5.5	1.8
Foz do Areia (Brasil)	0.1713	4.94	1.0
Ameluza (Ecuador)	0.2151	5.91	0.5744
Guri (Venezuela)	0.0298	3.1	0.0035

**TABLA 9.**

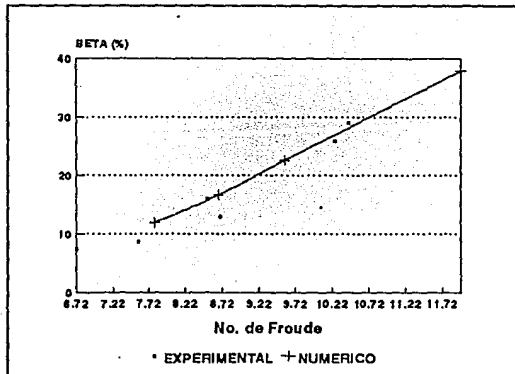
## 5 RESULTADOS.

Con el procedimiento descrito en la sección previa, se obtuvo la expresión final de la función de arrastre para el aireador 5 del modelo:

$$\beta = 0.068 (Fr - 5.5) - 1.8 Pn \quad (5.1)$$

cuyo comportamiento  $\beta / Fr$  se compara con los datos experimentales en la gráfica 6:

GRAFICA 6.



Entre los resultados más favorables que se pudieron obtener a partir de la simulación numérica, se pueden mencionar:

- 1) El comportamiento  $f/Fr$  es muy parecido al comportamiento obtenido a partir de los datos experimentales, teniendo diferencias de no más de 10%. Sin embargo, estas diferencias están dentro del rango de error de las mediciones experimentales.
- 2) Las velocidades medidas en el ducto y las velocidades obtenidas a través de la simulación, son muy similares en magnitud, pero sobre todo en su comportamiento, llegándose a observar la formación de vórtices en la entrada del ducto e incluso dentro de él. Estos vórtices tendrían mayor definición si se creara una malla más fina en el ducto.
- 3) Lira [24], comprobó que los patrones de flujo en el ducto obtenidos experimentalmente y los obtenidos por medio de la simulación numérica son semejantes, concordando las zonas de estancamiento y las zonas de máxima velocidad en el ducto.

En las láminas siguientes se muestra el comportamiento numérico del aireador 5 del modelo. Se muestran los resultados para el gasto mínimo simulado ( $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ) y para el máximo ( $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

En las láminas 1 y 8, se muestra el comportamiento de flujo, justo sobre el chorro de agua para ambos gastos. Para estos casos, se fijó la velocidad del aire que entra al dominio (ver condiciones de frontera en la sección 2.3.4). Se puede observar la generación de un vórtice en la entrada del ducto, formado por el cambio repentino de dirección del flujo a consecuencia de la succión que producen las bajas presiones bajo el chorro. Aunque el patrón de flujo es el mismo, se puede observar que el vórtice formado con el gasto de  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , es más grande que el formado con el gasto de  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Previo a la descripción de las láminas 2 y 9, es conveniente observar primero las láminas 3 y 10 que muestran el flujo de aire en el piso del aireador. En estas láminas se observa la formación de un vórtice cerca de la pared, creándose con ello una zona de baja presión. La presión bajo el chorro, como se ve en los contornos de presión, va aumentando del ducto al eje de simetría. Este cambio de presión hace que el flujo de aire de entrada vaya perdiendo cantidad de movimiento y finalmente cambie de dirección formándose el vórtice. El vórtice creado por el gasto mayor es igualmente de mayor tamaño, debiéndose ésto a que las velocidades del aire para este gasto también son mayores.

Este flujo un poco desordenado en el piso del aireador, se va orientando en



planos superiores hasta llegar al plano justo bajo el chorro como se aprecia en las láminas 2 y 9. El vórtice prácticamente se ha destruido, y el flujo de aire se empieza a orientar con el flujo de agua. Esta orientación se debe al cortante que actúa entre el flujo de aire y el de agua, y gracias al cual, se produce la mayor aireación del chorro de agua. En la zona donde continúa el vórtice, la aireación del chorro es mínima, ya que aquí se encuentran las subpresiones de mayor valor absoluto.

Las láminas 4 y 11 muestran el flujo de aire en la pared del ducto. Se ve que el flujo es desordenado, sin embargo este flujo se va ordenando en planos posteriores con dirección al aireador, gracias a la succión causada por las bajas presiones en el aireador.

Los contornos de presión<sup>1</sup> y de beta para cada gasto, son prácticamente iguales, y esto se debe a que si mantenemos el Froude constante, la beta va a ser función única y exclusivamente de la presión. Lo importante de estas láminas, es que el comportamiento de las presiones es el correcto para un aireador simétrico: las presiones aumentan del ducto al centro de aireador (eje de simetría). Esto se puede observar más claramente en las láminas 7 y 14 que grafican los valores de presión en un plano YZ (con las coordenadas dispuestas de acuerdo a la figura del apéndice B) con respecto al ancho del aireador.

No obstante la bondad de los resultados, el comportamiento de las presiones con respecto al Froude no concuerda con los resultados de las mediciones experimentales. Los datos experimentales indican que al aumentar el Froude (*i.e.* el gasto disminuye) el valor absoluto de la subpresión bajo el chorro aumentará, mientras que si disminuye el Froude el valor absoluto de las subpresiones tienden a cero (presión atmosférica). El comportamiento obtenido por el modelo fue el inverso. En la figura 20 se muestra cual sería el comportamiento de las presiones en un aireador simétrico y el obtenido numericamente (línea continua), además el comportamiento obtenido con los datos experimentales del modelo (línea punteada) tomando un promedio de la subpresión bajo el chorro (esta figura es aproximada). Sin embargo, el rango de presiones para el rango de números de Froude ensayados por el modelo numérico es el mismo que el obtenido por las mediciones experimentales.

En el diseño original, se hicieron algunos cambios con respecto a la posición

---

<sup>1</sup> Las presiones que se encuentran en los contornos son con respecto a la presión atmosférica.

de los aireadores. Se eliminó el aireador 3, y se diseñaron otros dos, uno en la sección 1 y otro en la 4. Se simuló el comportamiento de estos dos nuevos aireadores en tamaño prototipo además del 5 en tamaño prototipo, con el único fin de observar cual podría ser su posible comportamiento, ya que las constantes en la ecuación de beta son las mismas que se obtuvieron con el procedimiento descrito en la sección 4.1 con excepción de la constante K3. Esta última siendo factor del número adimensional de la presión no puede considerarse como directamente escalable, ya que las subpresiones en prototipo serán considerablemente mayores *i.e.* del orden de decenas de kPa comparado con unidades de Pa en el modelo. De hecho, si se mantenía el mismo valor de K3 para el prototipo que para el modelo, entonces los resultados obtenidos eran irreales (presiones mayores a la de la atmósfera en el aireador). Los resultados obtenidos se muestran en las láminas siguientes:

El comportamiento del aireador 4 y 5 es básicamente el mismo que el mostrado en el aireador 5 (modelo), sólo variando la magnitud de las velocidades.

Se hicieron dos diseños del aireador 1: uno con una ranura dejada por la pila que se encontraba inmediatamente aguas arriba (1a), y el otro que no la tiene, ya que la pila se alargó aguas abajo (1.b). Ambos tienen las mismas dimensiones.

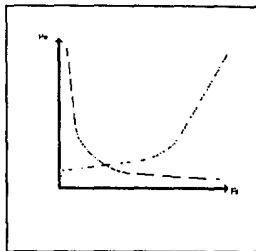


FIGURA 20.

El que tiene un comportamiento distinto es el aireador 1a, ya que está abierto de ambos lados y por ende admite aire por los dos lados. La abertura pequeña es el ducto (derecha), y la abertura mayor es una rendija dejada a consecuencia de encontrarse la pila inmediatamente aguas arriba. Ambas entradas tienen un comportamiento similar con la formación de un vórtice como se aprecia en la lámina 21.

En el piso del aireador se forma un vórtice en el mismo lugar que los casos anteriores, sin embargo no se forma cerca de la otra entrada. Es posible que dicho comportamiento se deba principalmente a que la sección para el ingreso de aire es de gran tamaño, y en consecuencia las presiones en las inmediaciones de ésta son muy cercanas a la atmosférica lo que inhibe la formación del vórtice.

Otra diferencia notable, es que en el plano justo bajo el chorro, el vórtice ha desaparecido, pues el formado en el piso del aireador es de poca intensidad.

Las presiones en el aireador son muy parecidas a la presión atmosférica a todo lo largo del aireador con una subpresión cuasiuniforme, lo cual proporciona una aireación cercana a la máxima posible.

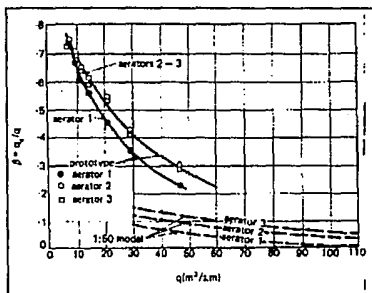
El aireador 1b, tiene un comportamiento similar a los aireadores 4 y 5. Se debe observar las grandes velocidades que toma el aire en el ducto del orden de 120 m/s en la parte más estrecha del ducto, debido a las dimensiones del mismo. Para esta velocidades los efectos de compresibilidad no son despreciables y consecuentemente los resultados mostrados podrán tener errores del orden de 15 a 20 %.

Para poder extrapolar los resultados obtenidos en el modelo al prototipo, se necesitan escalar los parámetros a través de las constantes ya descritas.

Pinto [12] a partir de los datos obtenidos en un modelo escala 1:50, y en el prototipo (presa Foz do Areia), observó que el comportamiento beta/Froude difiere. Ver figura 20.

Para poder obtener el comportamiento del prototipo a partir del comportamiento del modelo, es necesario introducir dos factores de escalamiento, uno para el gasto de aire y otro para  $P_n$ . Según Pinto [12] estos serán:

FIGURA 21.



$$Qa_m = Qa_p (E)^{5/2} k \times 10^3$$

$$Pn_m = Pn_p (E) \times 10^3$$

$E$ -Escala (e. g. 1:8-1/8)  
 $k$ -Constante

(5.2)

El flujo del modelo debe cumplir con la condición  $We > 400$ , para que el proceso de aireación por el mecanismo de la formación de aerosol bajo el chorro, sea el mismo que en el prototipo.

Bruschin [5], encontró otra correlación de escalamiento:

$$\frac{\beta_p}{\beta_m} = \frac{v_{wminp}/v_{wp}}{1 - v_{wminm}/v_{wm}} \quad (5.3)$$

$$v_{wp} = \sqrt{\lambda} v_{wm}$$

donde  $v_w$  es la velocidad del flujo de agua, los subíndices  $p$  y  $m$  significan prototipo y modelo respectivamente y  $min$  mínimo. (Lambda)  $\lambda$  es el factor de escalamiento.

Para los dos procedimientos es necesario tener los datos del prototipo y modelo, sin embargo trae consigo más dificultades el obtener  $v_{wmin}$  que es la velocidad mínima del chorro de agua sobre el aireador; y se podrá considerar que dicho valor estará entre 1 y 3 m/s.

La estimación de unos supuestos valores de las constantes de correlación, para ambos casos, sería una forma aventurada de escalar los resultados, ya que no se tendrían datos con que compararlos, y podría caerse en errores.

Haciendo una estimación, se obtiene que a partir de la ecuación 2.1, unas constantes de escalamiento posibles serían:  $\beta_p/\beta_m = 1.0$ ,  $Q_m/Q_p = 4.54 \times 10^{-4}$  y  $Pn_p/Pn_m = 2.7$ . Ahora tomando las correlaciones dadas por Bruschin (ec. 5.3) para betas y las de Pinto (ec. 5.2) para gastos de aires y para presiones, se obtienen las siguientes constantes de escalamiento:  $\beta_p/\beta_m = 1.97-2.1$ ,  $Q_{am}/Q_{ap} = 8.41 \times 10^{-3}$ ,  $Pn_m/Pn_p = 47.6$ .

A partir de estos valores se puede observar la gran discrepancia que hay entre ellos, pues la diferencia va de 2 veces en betas, hasta llegar a diferencias de 15 a 20 veces en gastos de aire y presiones.

## 6 CONCLUSIONES.

La simulación numérica permitió visualizar el comportamiento del aire desde que entra por el ducto hasta que ingresa al chorro de agua lo que permite una mayor comprensión del fenómeno de aireación en la cavidad bajo el chorro. Según las observaciones de las mediciones experimentales, el comportamiento encontrado en la simulación numérica en general fue satisfactorio por lo que podemos afirmar que el modelo planteado representa adecuadamente la aerodinámica que ocurre en los aireadores.

Sin embargo, no fue factible independizar la parte numérica de la experimental, ya que se debe calibrar el modelo con los datos experimentales. Ésta es una de las limitaciones del modelo que aquí se presenta, ya que la ecuación de beta es particular para cada aireador. Aunque la expresión de la función de Beta determinada por Rutschmann [6] parece correlacionar varios tipos de aireadores, los resultados de las simulaciones muestran que el patrón de flujo así como los gradientes de presión bajo la cavidad son sensibles a los valores de las constantes. Podrá inferirse que la expresión de Rutschmann es adecuada para un análisis con parámetros concentrados, pero para la simulación directa del fenómeno de aireación se requerirán datos experimentales o de prototipo para acotar los valores de las constantes en la expresión de la función de Beta.

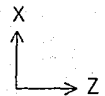
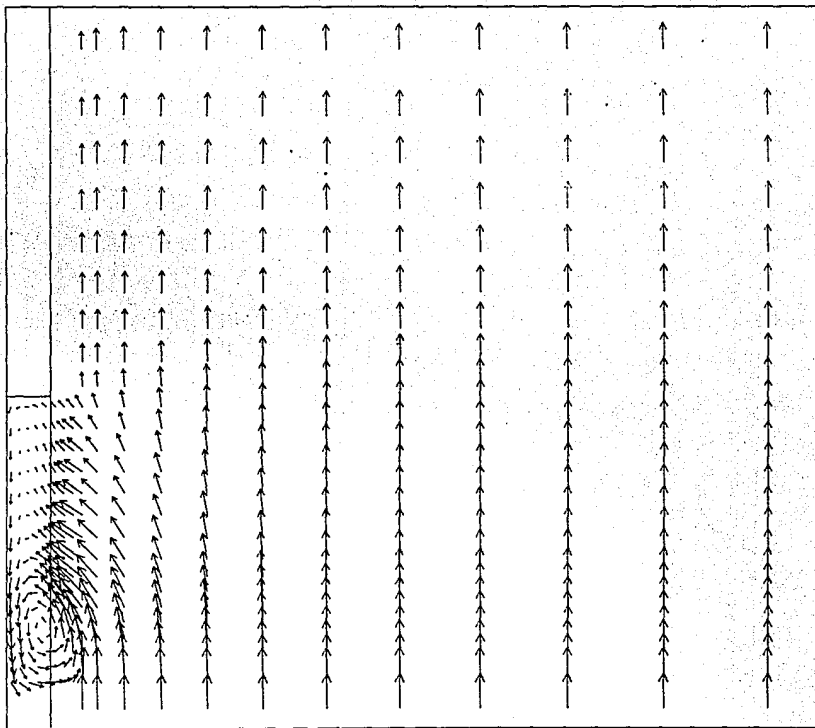
Lo que si se pudo hacer, y quizá haya sido el mayor logro obtenido en el presente trabajo, es llegar a una ecuación de beta a partir de una serie de mediciones puntuales, con las cuales no hubiera sido posible obtener dicha ecuación, pues se necesita la integral de la presión [1] a todo lo largo del aireador, para poder obtener una correlación matemática entre presiones y

beta. Una vez obtenida dicha ecuación, ya se puede obtener el comportamiento para diferentes condiciones de operación del aireador en estudio.

Otra meta que se fijó, era la posibilidad de poder escalar los resultados del modelo al prototipo, sin embargo, todos los estudios realizados al respecto, requieren tanto de los datos del modelo como los del prototipo para poder hacer una correlación de escalamiento. Nuestro propósito, era poder escalar los resultados obtenidos por PHOENICS al prototipo directamente, sin la necesidad de utilizar los datos experimentales del prototipo. Esto no parece factible y se tiene que esperar la obtención de dichos datos del prototipo, para poder caracterizarlo con precisión.

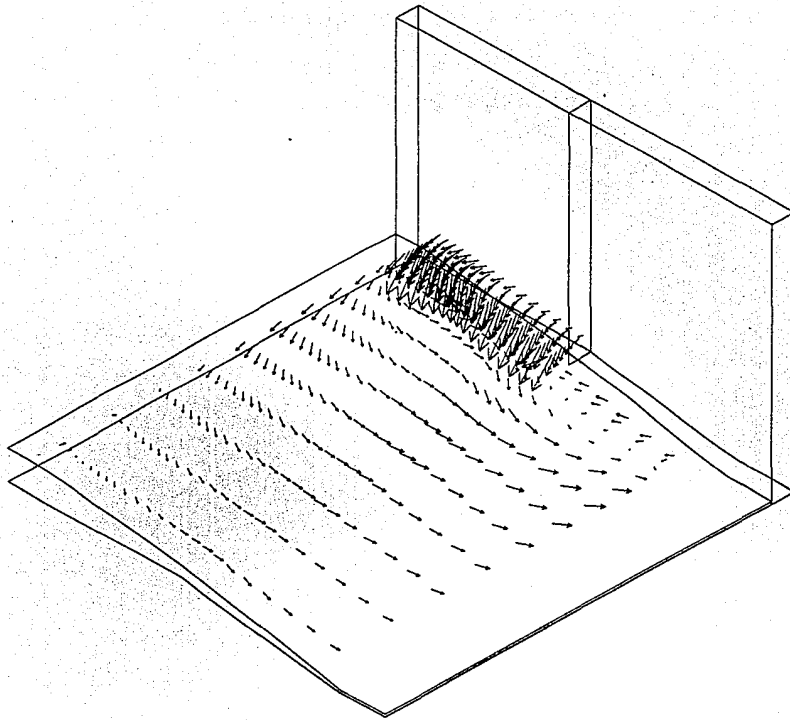
A partir de los puntos planteados, podemos concluir que la modelación numérica no puede por si sola obtener resultados directamente aplicables para caracterizar el comportamiento de un aireador. Sin embargo, sirve como instrumento de apoyo para poder comprender mejor lo que ocurre en lugares, donde sería imposible obtener mediciones; además de poder complementar los datos experimentales para establecer un modelo semi-empirico del comportamiento del aireador.

La posible próxima etapa del presente trabajo, es la obtención de la ecuación de beta de los aireadores tamaño prototipo, y con ello encontrar una correlación de escalamiento entre el comportamiento del modelo y del prototipo. Esto con el fin de poder encontrar una correlación general entre dichos comportamientos. Puesto que actualmente se realiza la instrumentación de dos tipos de aireadores a la escala prototipo, *i.e.* el del P.H. Huites y del P.H. Aguamilmpa, se podrá contar con datos que permitir realizar dicha correlación.

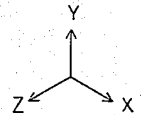


→ : 8.98 m/s.

LAMINA 1. Flujo de aire justo sobre el chorro de agua del aireador 5 (modelo). Gasto 0.5 m<sup>3</sup>/s.

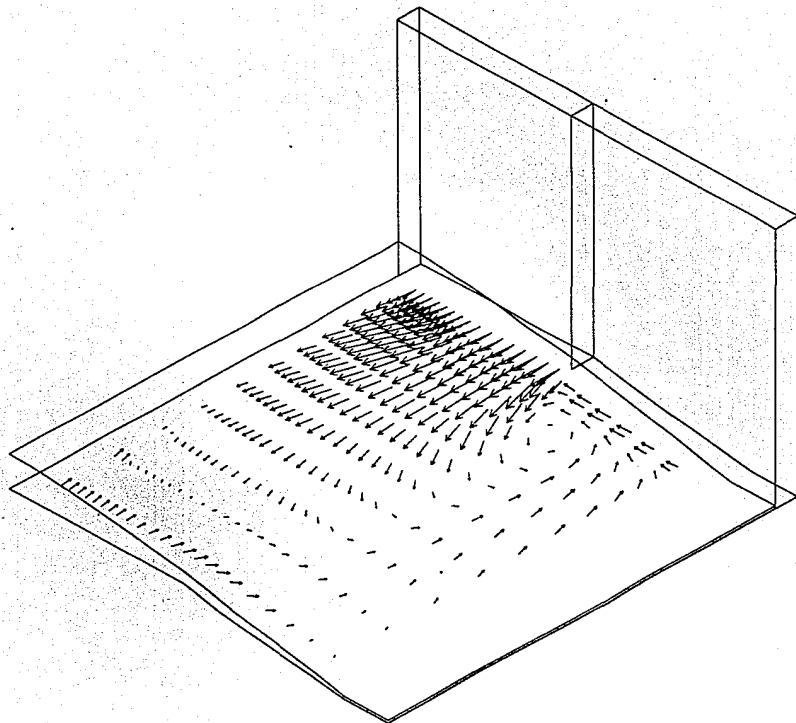


→ : 12.58 m/s.

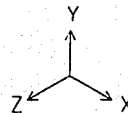


LAMINA 2. Flujo de aire justo bajo el chorro de agua del aireador 5 (modelo). Gasto  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

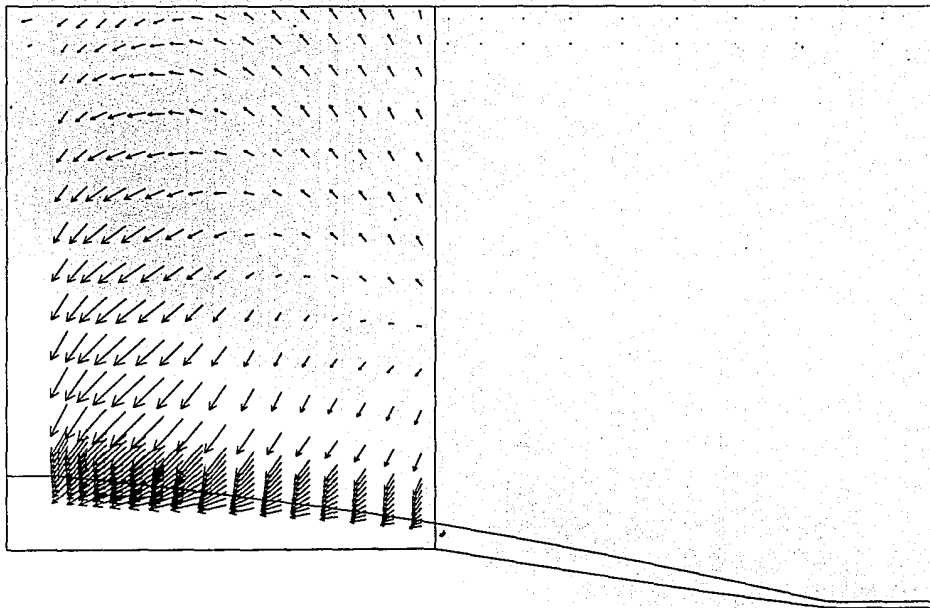




→: 12.58 m/s.



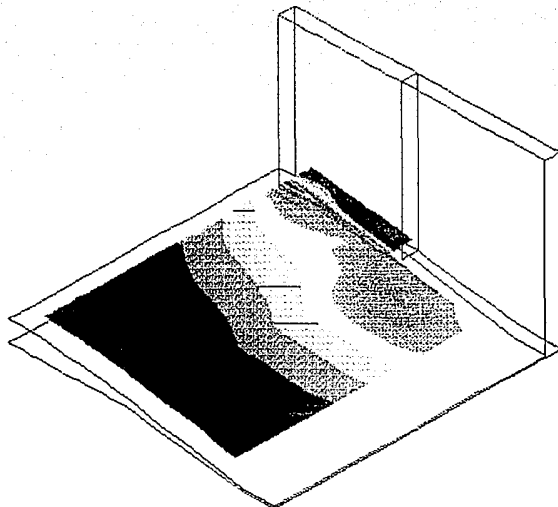
LAMINA 3. Flujo de aire en el piso del aireador 5 (modelo). Gasto  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .



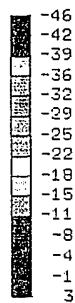
→ : 7.20 m/s.



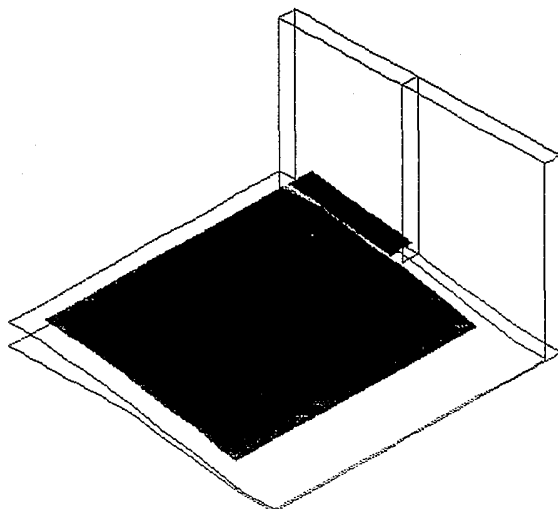
LAMINA 4. Flujo de aire en la pared del ducto en el aireador 5 (modelo).  
Gasto  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .



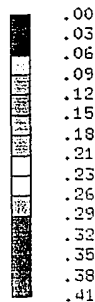
PRESIONES [Pa]



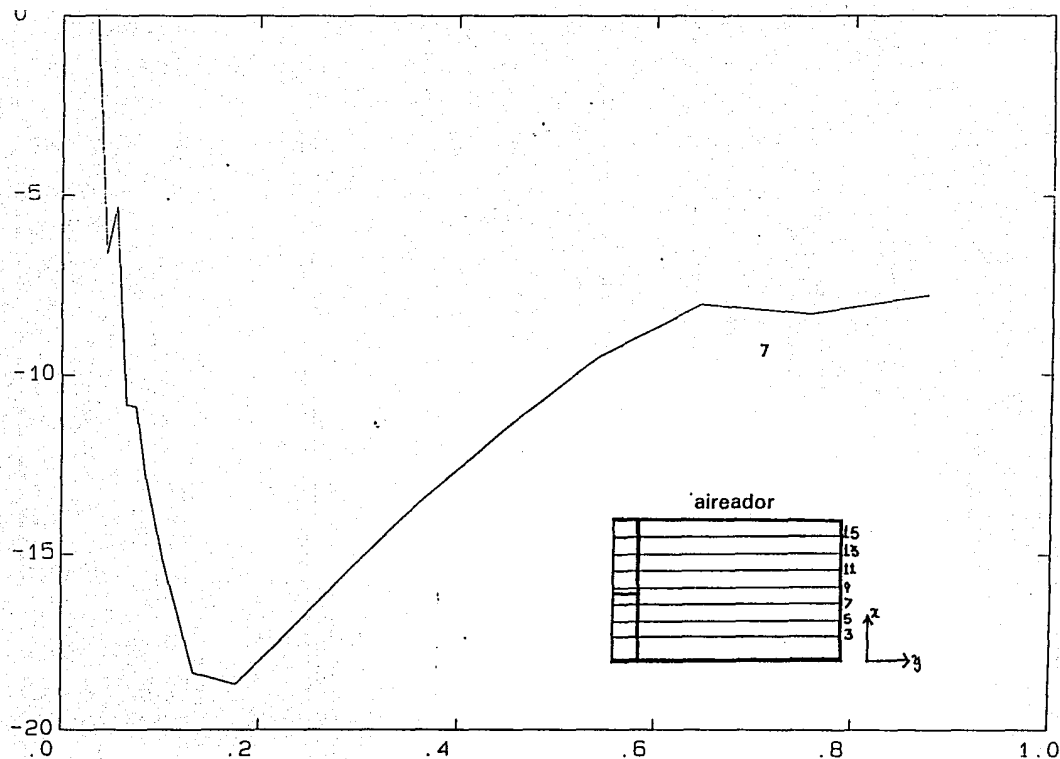
LAMINA 5. Distribución de presiones justo bajo el chorro para el aireador 5 (Modelo). Gasto  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .



BETA.

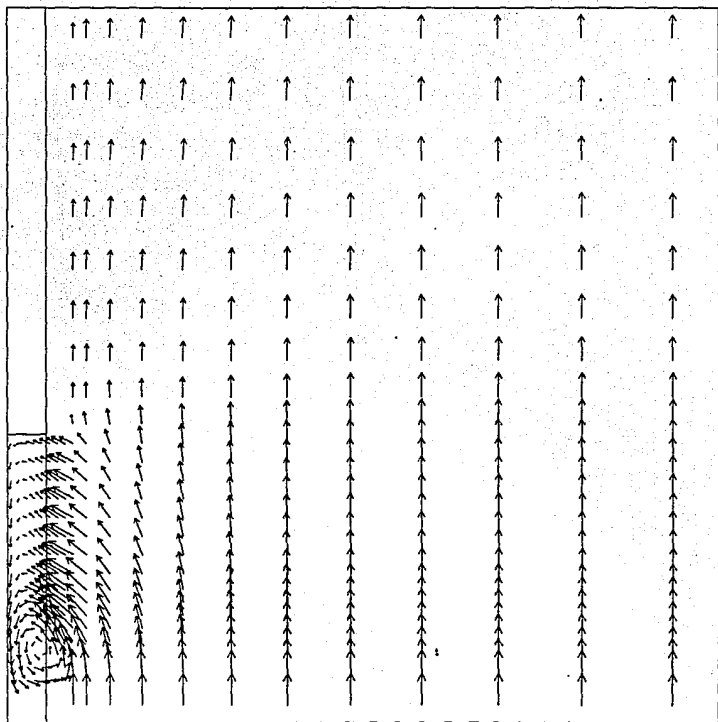


LAMINA 6. Distribución de beta justo bajo el chorro para el aireador 5 (Modelo). Gasto  $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .



LAMINA 7 Distribución de presiones justa abajo del chorro, en un plano intermedio en la dirección longitudinal para el aireador 5 (modelo). Gasto 0.5  $m^3/s$ .

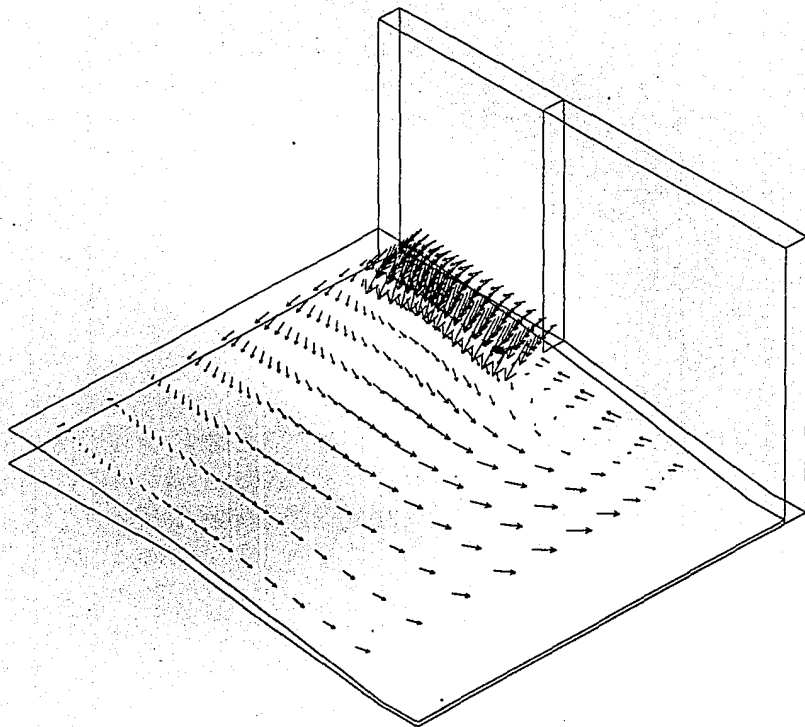




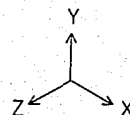
→ : 10.02 m/s.



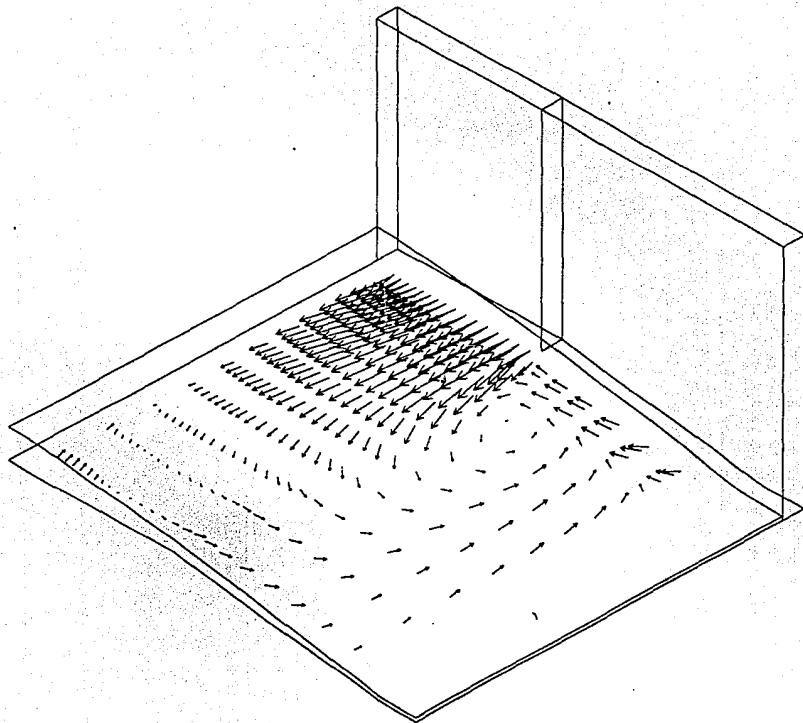
LAMINA 8. Flujo de aire justo sobre el chorro de agua del aireador 5 (modelo). Gasto 2.0 m<sup>3</sup>/s.



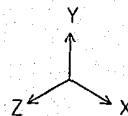
→ : 13.01 m/s.



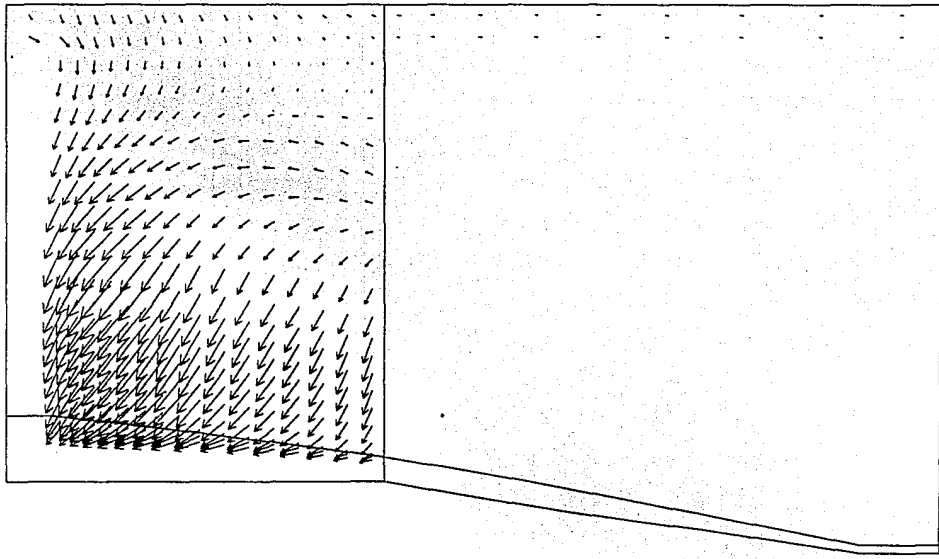
LAMINA 9. Flujo de aire justo bajo el chorro de agua del aireador 5 (modelo). Gasto 2.0 m<sup>3</sup>/s.



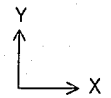
→ : 13.01 m/s.



LAMINA 10. Flujo de aire en el piso del aireador 5 (modelo). Gasto 2.0 m<sup>3</sup>/s.

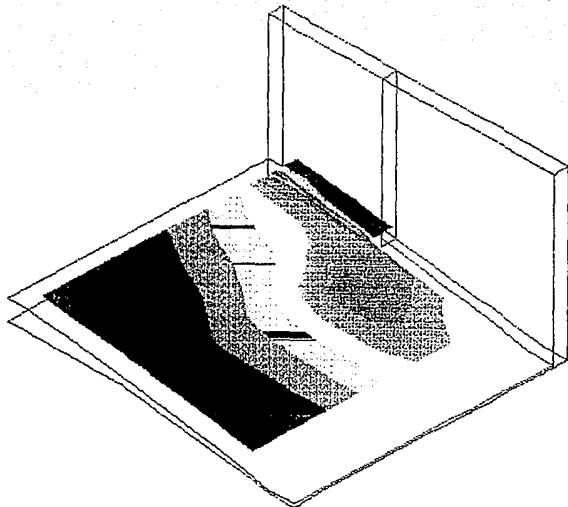


→ : 8.04 m/s.

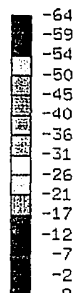


LAMINA 11. Flujo de aire en la pared del ducto en el aireador 5 (modelo).  
Gasto 2.0 m<sup>3</sup>/s.

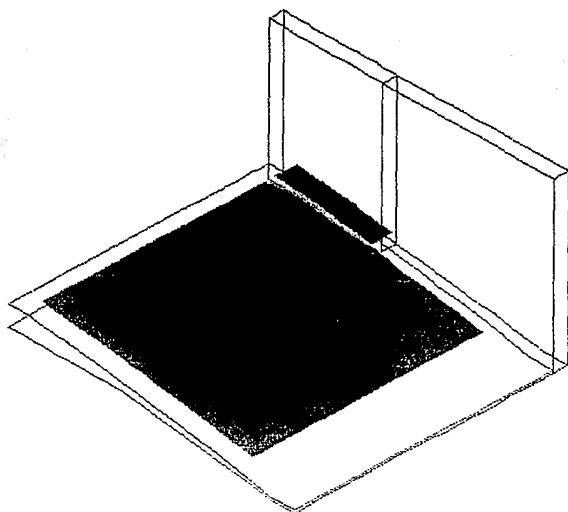




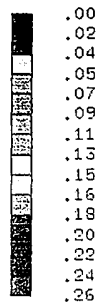
PRESIONES [Pa]



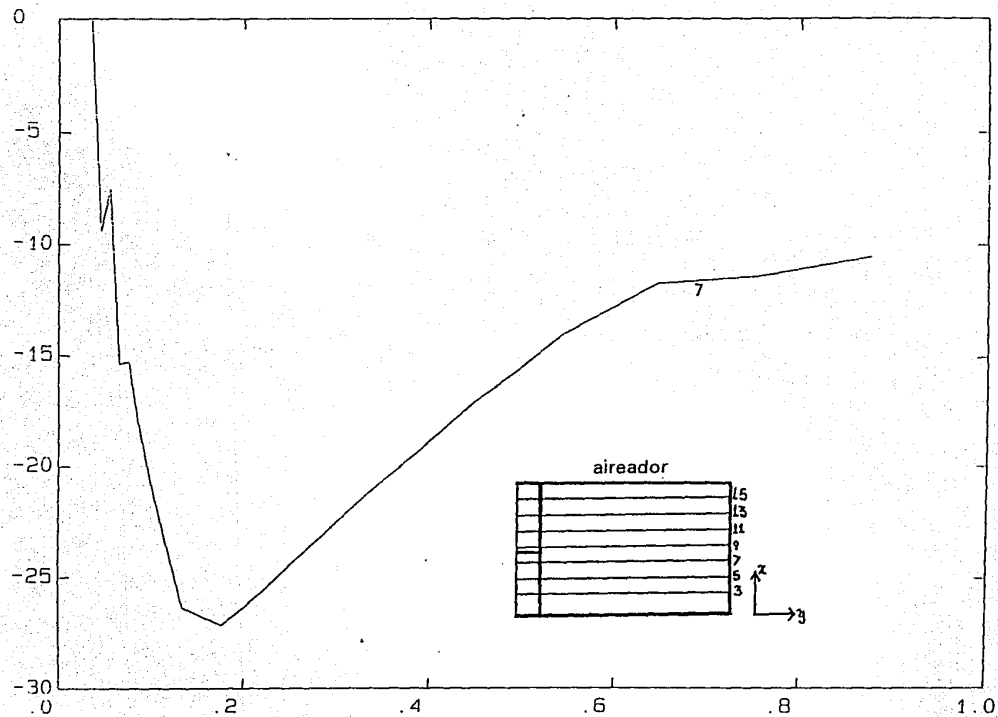
LAMINA 12. Distribución de presiones justo bajo el chorro para el aireador 5 (Modelo). Gasto  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ .



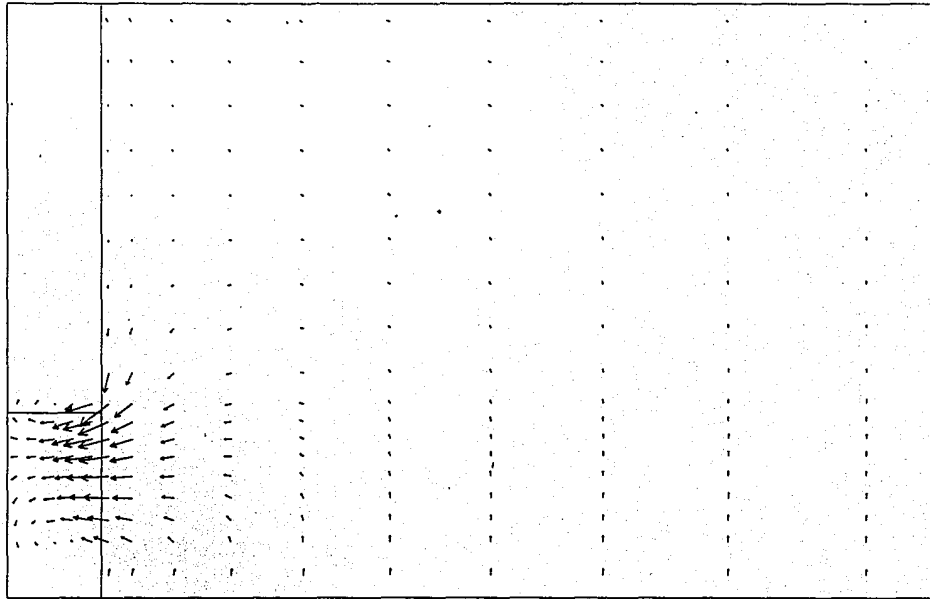
BETA.



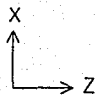
LAMINA 13. Distribución de beta justo bajo el chorro para el aireador 5 (Modelo). Gasto  $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$



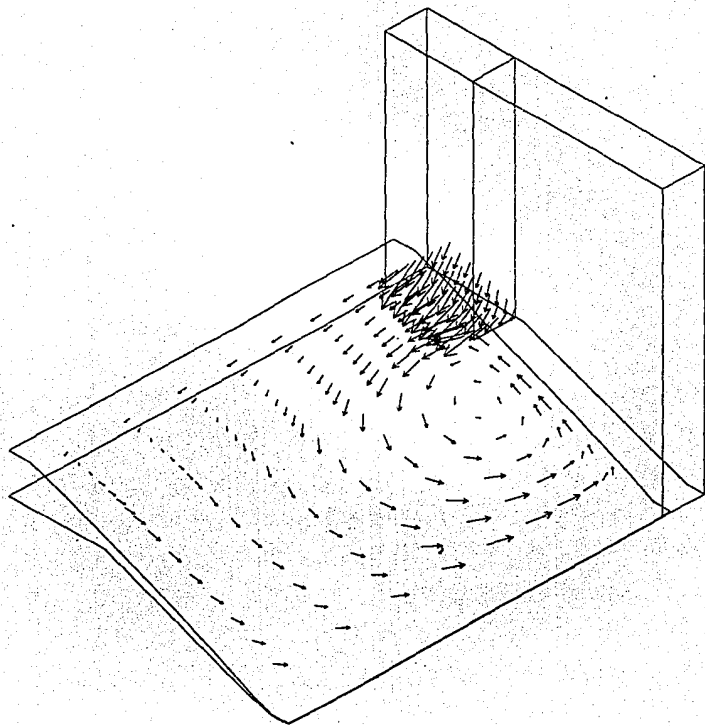
LAMINA 14 Distribución de presiones justa abajo del chorro, en un plano intermedio en la dirección longitudinal para el aireador 5 (modelo). Gasto 2.0 m<sup>3</sup>/s.



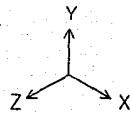
→ : 48.4 m/s.



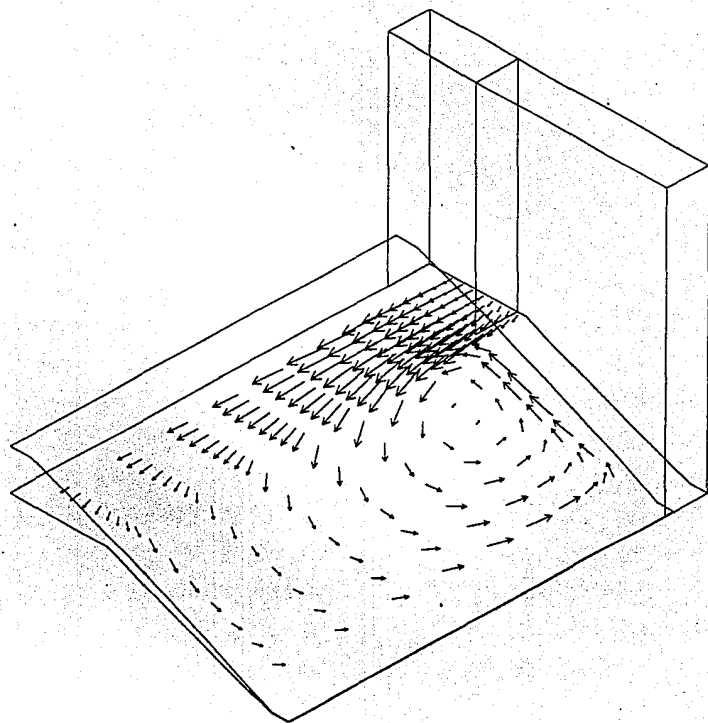
LAMINA 15. Flujo de aire justo sobre el chorro de agua del aireador 4 (prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



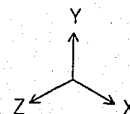
→ : 76.2 m/s.



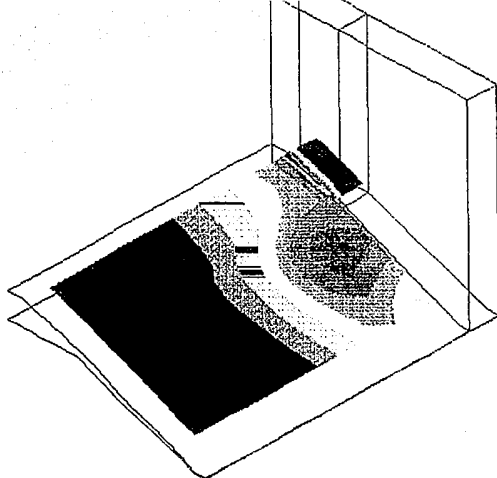
LAMINA 16. Flujo de aire justo bajo el chorro de agua del aireador 4 (prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



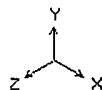
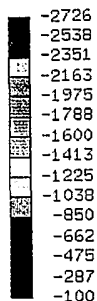
→ : 76.2 m/s.



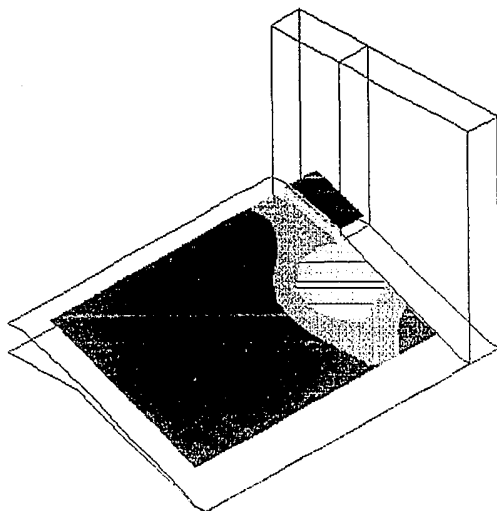
LAMINA 17. Flujo de aire en el piso del aireador 4 (prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



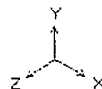
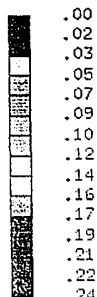
PRESIONES [Pa]



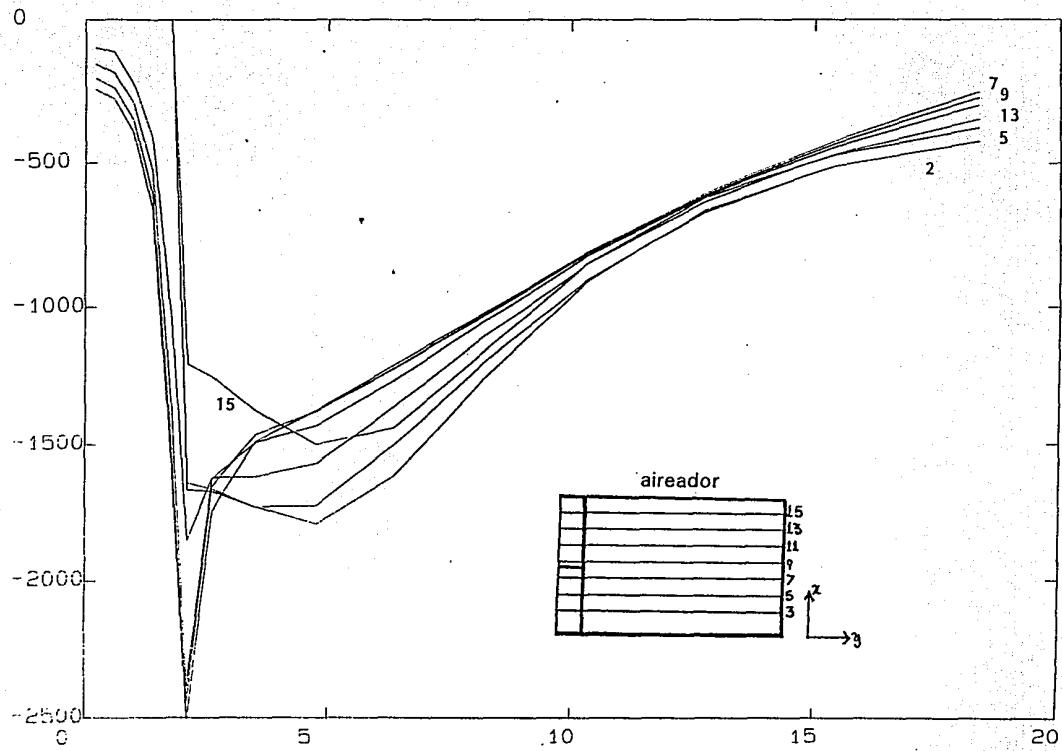
LAMINA 18. Distribución de presiones justo bajo el chorro para el aireador 4 (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



BETA.

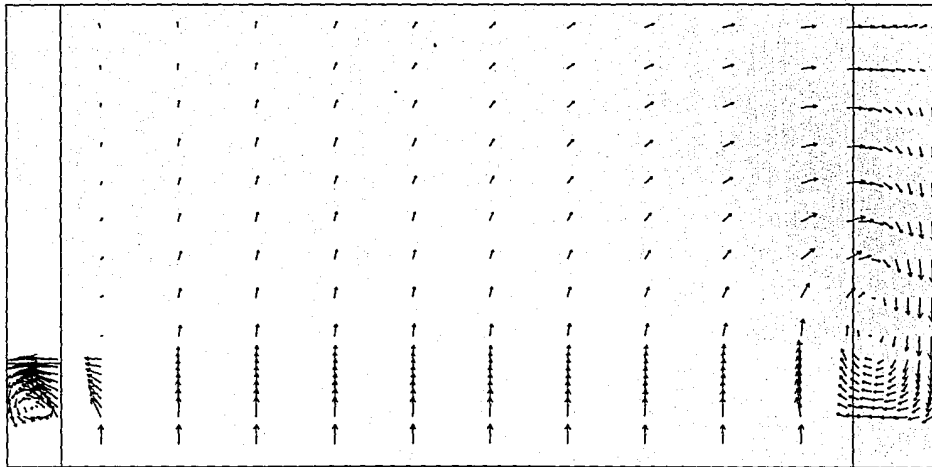


LAMINA 19. Distribución de beta justo bajo el chorro para el aireador 4 (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



LAMINA 20 Distribución de presiones justa abajo del chorro, en varios planos intermedios en la dirección longitudinal para el aireador 4 (prototipo).



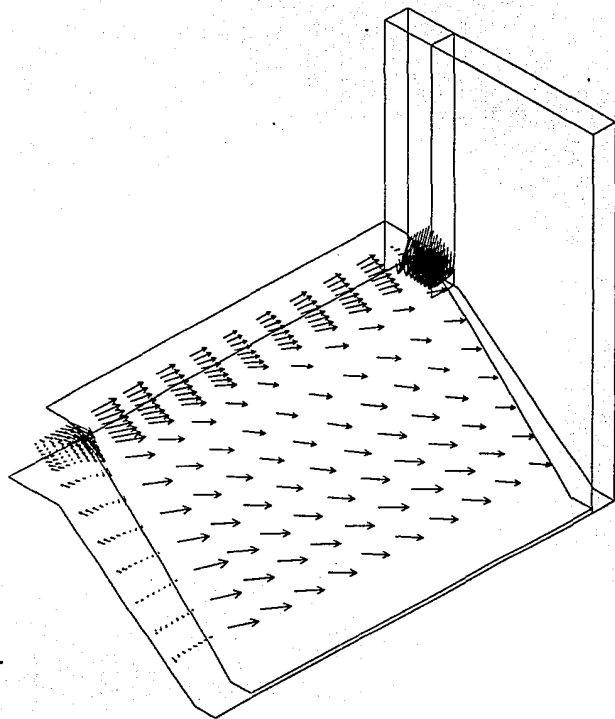


→ : 15.66 m/s.

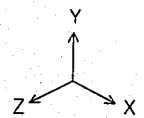


LAMINA 21. Flujo de aire justo sobre el chorro de agua del aireador 1 (prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.

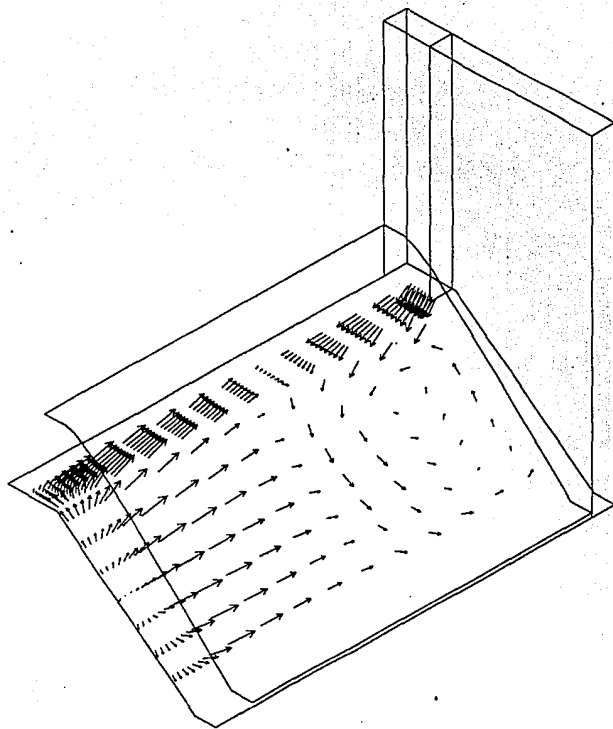




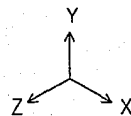
→ : 25.9 m/s.



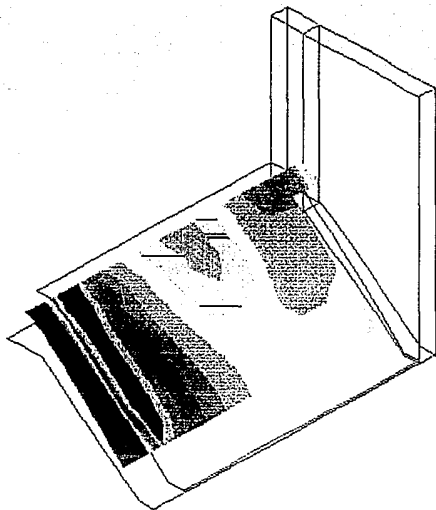
LAMINA 22. Flujo de aire justo bajo el chorro de agua del aireador 1 (prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



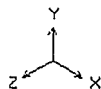
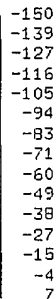
→ : 25.9 m/s.



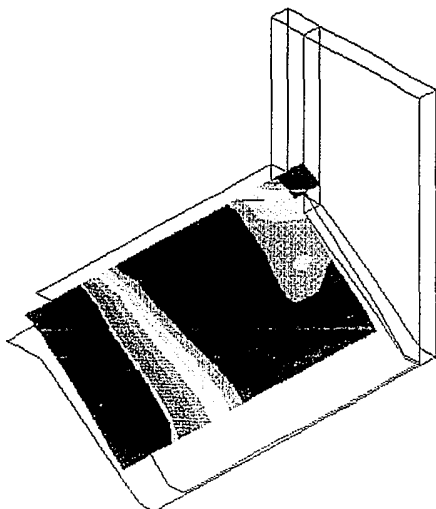
LAMINA 23. Flujo de aire en el piso del aireador 1 (prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



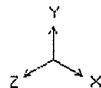
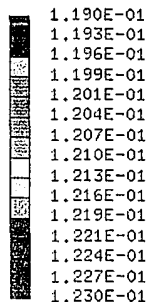
PRESIONES [Pa]



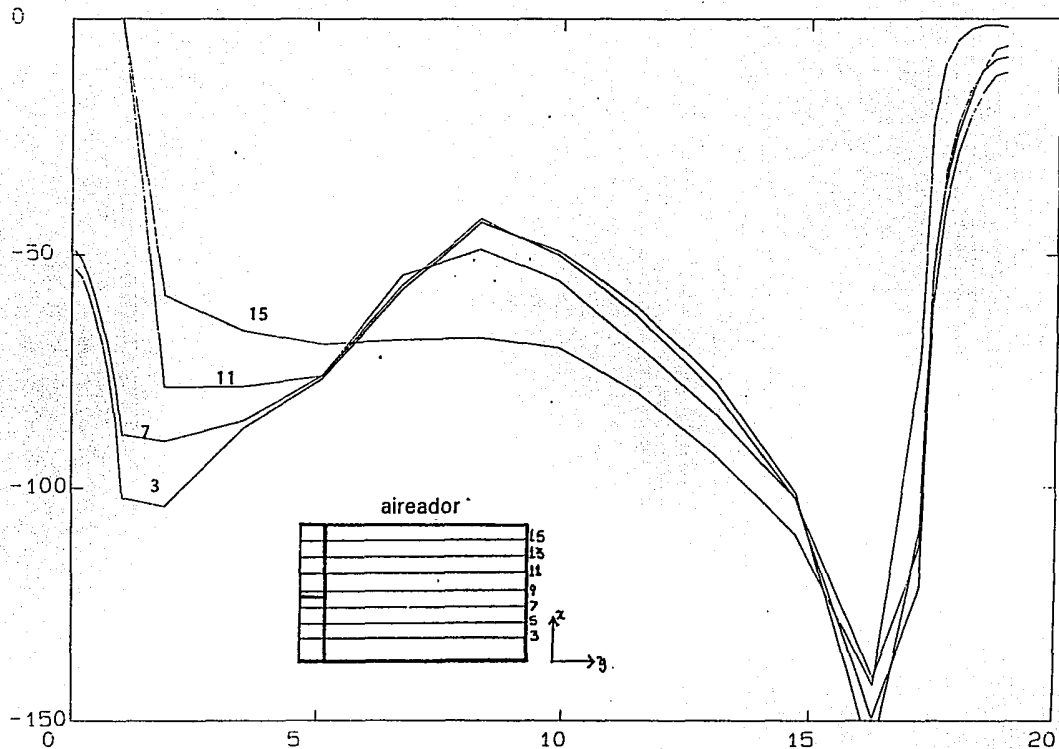
LAMINA 24. Distribución de presiones justo bajo el chorro para el aireador 1a [Prototipo]. Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



BETA.

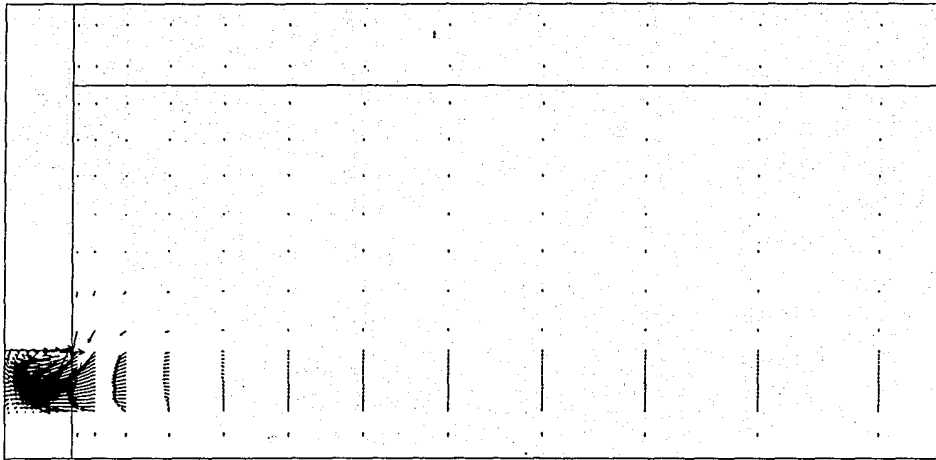


LAMINA 25. Distribución de beta justo bajo el chorro para el aireador 1a [Prototipo]. Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.

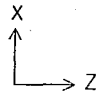


LAMINA 26 Distribución de presiones justo abajo del chorro, en varios planos intermedios en la dirección longitudinal para el aireador 1 (prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



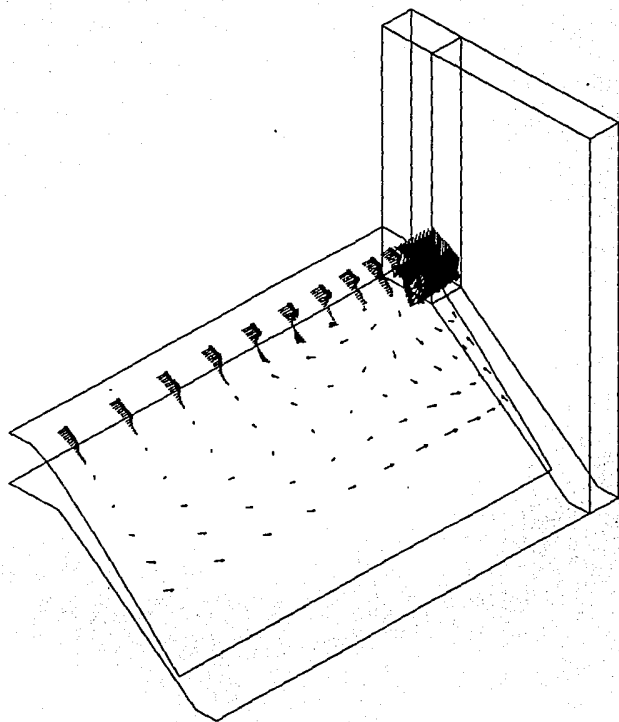


→ : 85.6 m/s.

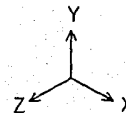


LAMINA 27. Flujo de aire justo sobre el chorro de agua del aireador 1b (Prototipo). Gasto  $2200\text{m}^3/\text{s}$ .

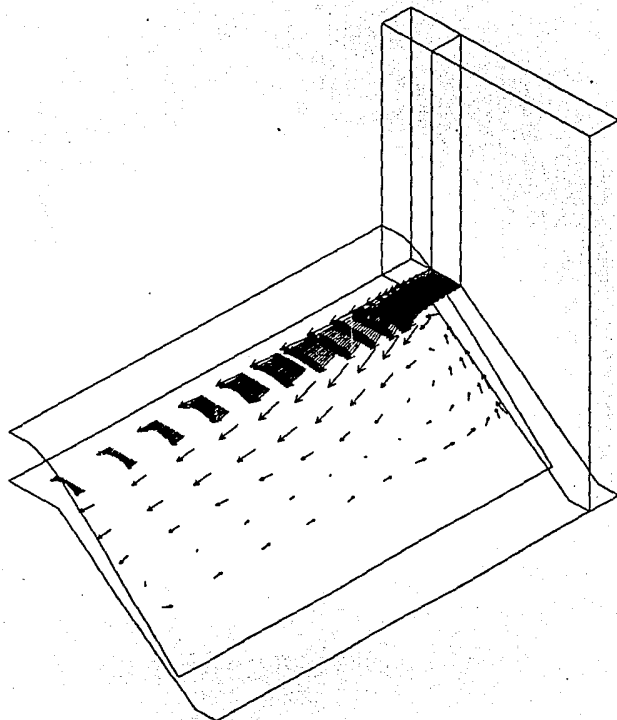
ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA



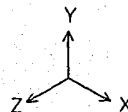
→ : 140.3 m/s.



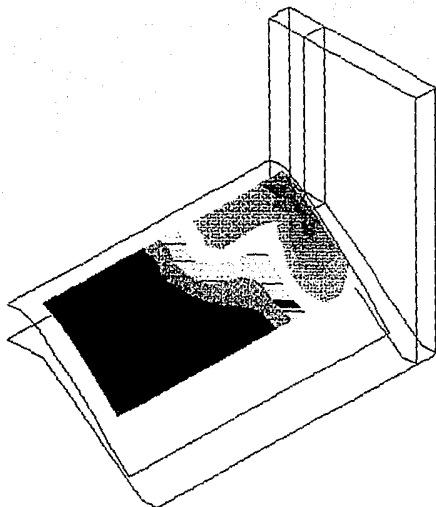
LAMINA 28 Flujo de aire justo bajo el chorro de agua del aireador 1b (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



→ : 140.3 m/s.



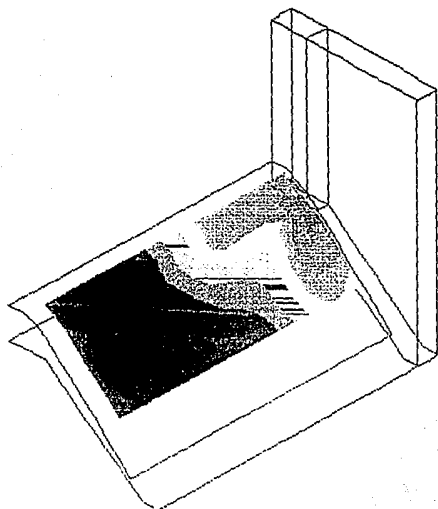
LAMINA 29 Flujo de aire en el piso del aireador 1b (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



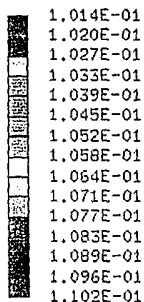
PRESIONES [Pa]



LAMINA 30 .Distribución de presiones justo bajo el chorro para el aireador 1b (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



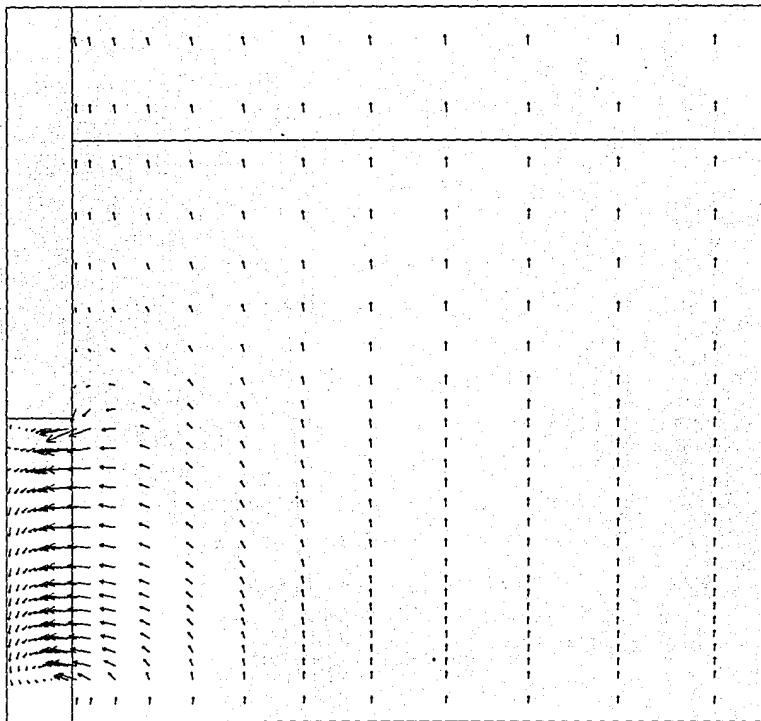
BETA.



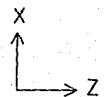
LAMINA 31. Distribución de beta justo bajo el chorro para el aireador 1b (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



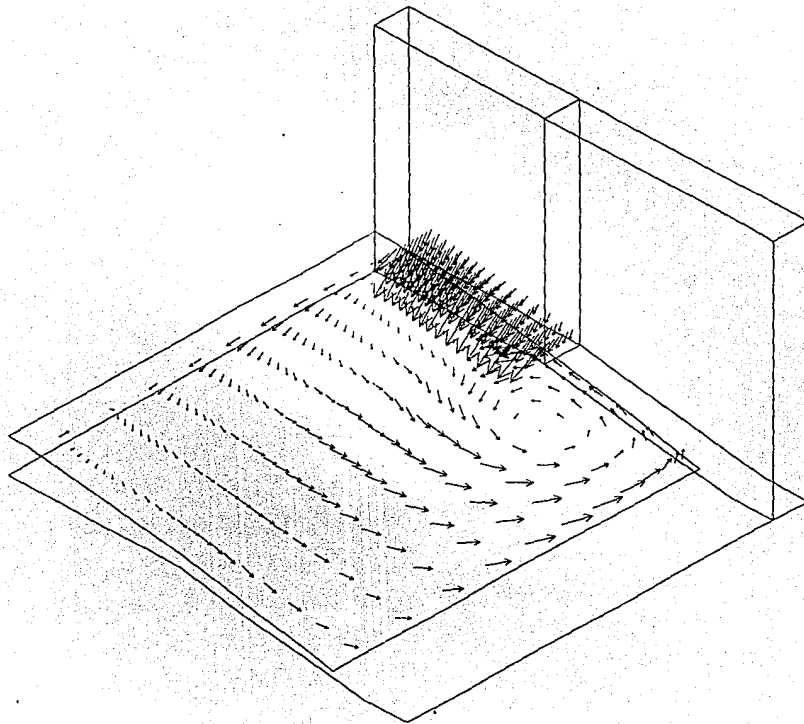




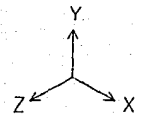
→ : 43.2 m/s.



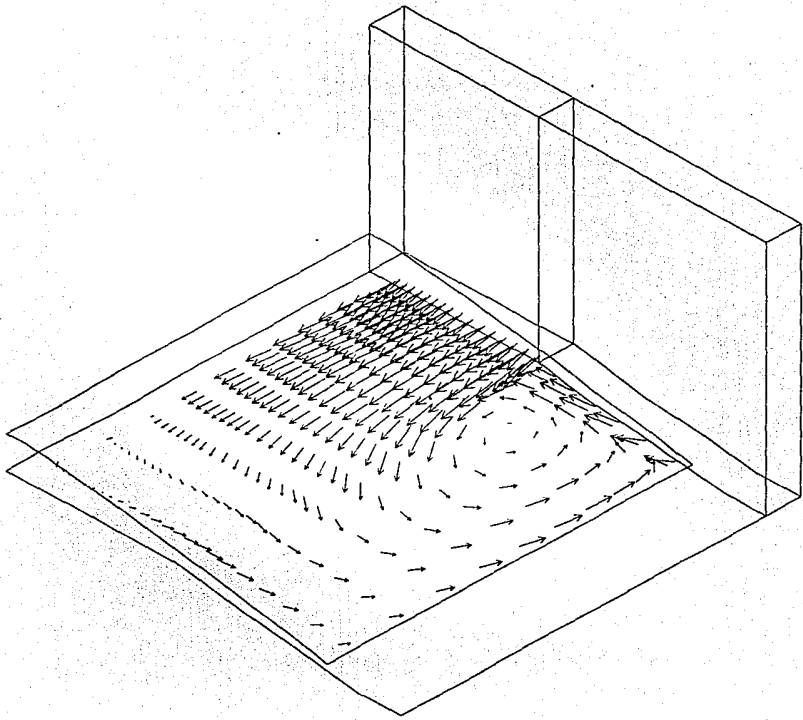
LAMINA 32. Flujo de aire justo sobre el chorro de agua del aireador 5 (Prototipo). Gasto 2200m<sup>3</sup>/s.



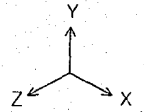
→ : 57.8 m/s.



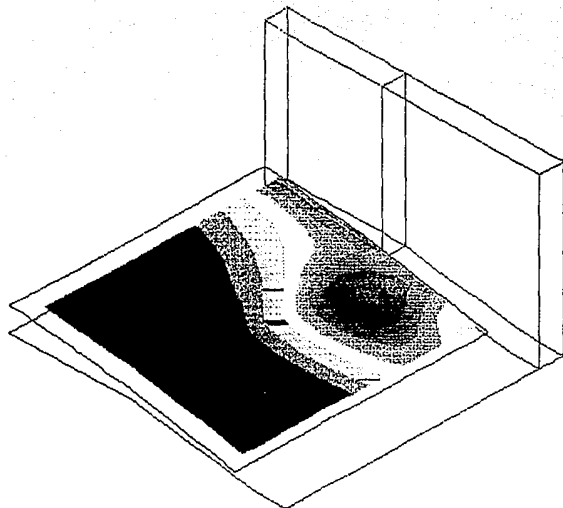
LAMINA 33 Flujo de aire justo bajo el chorro de agua del aireador 5 (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



→ : 57.8 m/s .

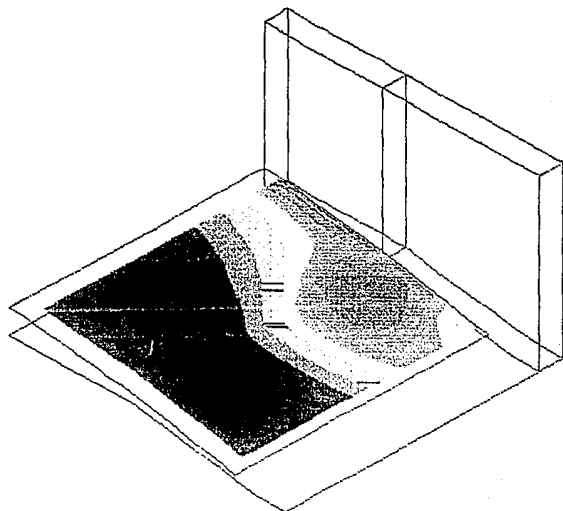
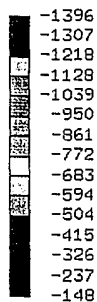


LAMINA 34 Flujo de aire en el piso del aireador 5 (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.



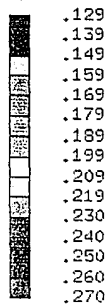
LAMINA 35. Distribución de presiones justo bajo el chorro para el aireador 5 (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.

PRESIONES [Pa]



LAMINA 36. Distribución de beta justo bajo el chorro para el aireador 5 (Prototipo). Gasto 2200 m<sup>3</sup>/s.

BETA.



## REFERENCIAS.

- [1]** Wood, I (IAHR). (1991) *Air entrainment in free-surface flows*. A.A.BAL-KEMA, Rotterdam 1991.
- [2]** Chanson, H.(1990) Study of air demand on spillway aerator. *ASME Journal of Fluids Engineering*. September, Vol.112, No.3, pp343-350.
- [3]** Chanson, H. (1989) Study of air entrainment and aeration devices. *Journal de Recherches Hydrauliques*. Vol. 27, No.3, pp 301-319.
- [4]** Rutschmann, P; Hager, W. (1990) Air entrainment by spillway aerators. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 116, No.6, pp 766-782.
- [5]** Bruschin, J. (1987) Forced aeration of high velocity flows. *Journal of Hydraulic Research*. Vol 25, No. 1, pp 5-14.
- [6]** Rutschmann, P; Volkart, P. (1988) Spillway chute aeration. *Water Power & Dam Construction*. January , pp 10-15.
- [7]** Sanchez, J. (1992) *Obra de excedencias de la presa Huites (Diseño preliminar)*. I.I. Segundo informe preliminar. UNAM. Noviembre.
- [8]** Echavez, G. (1975) *Cavitación en vertedores*. Publicaciones I. I., UNAM, No. 415.
- [9]** Chanson, H. (1989) Flow downstream of aerator - aereator spacing. *Journal of Hydraulic Research*. Vol 27, No. 4, pp 519-536.
- [10]** Schwartz, I; Nutt, L (1963) Projected nappes subject to transverse pressure. *ASCE Journal of Hydraulics Division*. Vol. 89, No. HY4, pp 97-104.
- [11]** Pinto, S.; Neidert, S. (1983) Evaluating entrained air flow trough aerators. *Water Power & Dam Construction*. August, pp 40-42.
- [12]** Pinto, S.; Neidert, S. (1982) Aeration at high velocity flows. *Water Power & Dam Construction*. Feb/March.
- [13]** Chanson, H. (1989) Etude des phénomènes d'entraînement d'air.

Aplicacion aux évacuateurs de crue. *La Houille Blanche*. No. 6, pp 443-462.

**[14]** Pinto, S. (1989) Design aerators for high velocity flow. *Water Power & Dam Construction*. July , pp 44-48.

**[15]** Laali, A.;Michel, J. (1984) Air entrainment in ventilated cavities: Case of the fully developed half cavity. *Transactions of the ASME Journal of Fluids Engineering*. Vol 106, pp 327-374.

**[16]** Brennen, C. (1969) The dynamic balances of dissolved air and heat in natural cavity flows. *Journal of Fluid Mechanics*. vol 37, pp 115-127.

**[17]** Straub, L. (1953) Studies of air entrainment in open channel flows. *Transactions ASCE*. Sep. , paper 2785, pp 30-44.

**[18]** Straub, L.;Anderson, A. (1958) Experiments on self aerated flow in open channel. *Proceedings ASCE, Hydraulics Division*. Vol 84, No. HY7, pp 1890-1 1890-35.

**[19]** Straub, A. (1958) Self aerated flow in open channels. *Transactions ASCE* , paper 1890.

**[20]** Chanson, H. (1991) Aeration of a free jet above a spillway. *Journal of Hydraulic Research*. Vol. 29 No. 5, pp 655-667.

**[21]** Knapp, R.; Dayly, J. (1970) **Cavitation**. McGraw Hill-Boock Co. N.Y.

**[22]** Rodi, W. (1980) **Turbulence Models and their Aplication in Hydraulics**. A state of the Art Review. Delft . Netherlands.

**[23]** Ludwing, J.C., Qin, H.Q. and Spalding, D.B. (1990). **The PHOENICS Reference Manual**, CHAM TR/200, CHAM Ltd, London.

**[24]** Lira, E. Tesis de licenciatura. (por terminar.)

## ÍNDICE DE APÉNDICES.

<b>APÉNDICE</b>	<b>CONTENIDO.</b>
A	Solución numérica y listado del archivo Q1.
B	Listado del archivo .LOG, para la creación de lamalla y mallas para los aireadores 1, 4 y 5.
C	Listado del archivo 'ground'.
D	Programa para encontrar el tirante, velocidad y Froude en cada punto del vertedor.

## APÉNDICE A



## SOLUCIÓN NUMÉRICA

Con la discretización del campo también se discretiza la ecuación 2.15 de la siguiente forma:

$$a_P \phi_P = \sum_{F=W, E, S, N, H, L} a_F \phi_F + a_T \phi_T + vC(V - \phi_P) \quad (\text{A.1})$$

a = coeficiente

$\phi$  = variable (p1, w1, etc)

W, E, S, N, H, L = caras de la celda.

La forma de resolver las ecuaciones, consiste en la iteración, esto es necesario, ya que se trata de ecuaciones pseudolineales, seudo se refiere a que el coeficiente "a" es función de  $\phi$  (para 2D y 3D), por lo que se deben de relacionar las ecuaciones de las diferentes variables, además de relacionarlas con las ecuaciones de los "slabs" vecinos. En la figura 1.H se observa el campo completo, un "slab" y una celda.

La iteración esta conformada por tres pasos o niveles de iteración, siendo el paso uno parte del dos y el dos del tres.

Estos pasos son los que se muestran en la figura 2.H

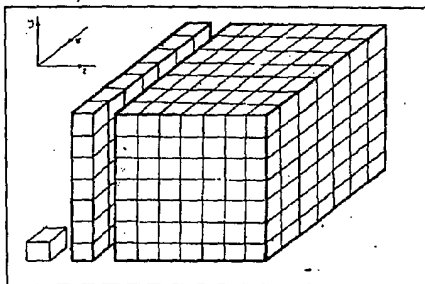


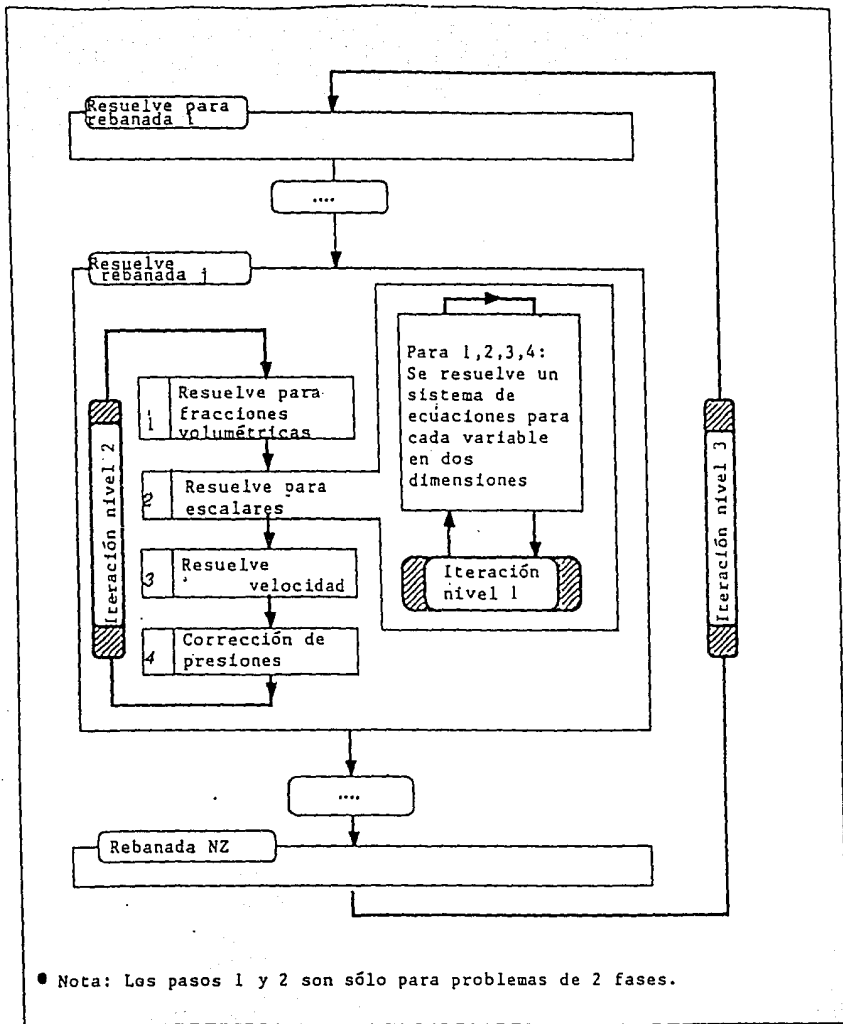
FIGURA 1.H.

Los residuales son referencias para monitoriar la convergencia de la solución y esta dados por :

$$\epsilon_P = a_P \phi_P - \sum_{F=W, E, S, N, H, L} a_F \phi_F + a_T \phi_T + b \quad (\text{A.2})$$

Cuando:

$$\sum |\epsilon_P| / \text{RESREF}(\phi) < 1 \quad (\text{A.3})$$



se dice que la solución ha convergido. Siendo la suma para cada slab en casos parabólicos y para todo el campo en casos elípticos.

Como se trata de un método iterativo, se corre el riesgo de que las fluctuaciones de los valores entre cada iteración pueda variar mucho y con esto, sea difícil la convergencia. Para promover la convergencia y evitar que haya dichos brincos en los valores se utiliza la relajación, la cual trata de que la diferencia entre el valor presente y el futuro no sea muy grande.

Existen dos tipos de relajación:

1) Lineal. La cual se basa en la siguiente ecuación:

$$\phi_n = \phi_v + \alpha (\phi^* - \phi_v) \quad (A.4)$$

Si alfa es igual a cero el valor estará muy relajado por lo que el valor actual será igual al valor ya conocido. Si alfa es igual a uno, la relajación será nula por lo que el valor actual será el que se calculó.

2) Falso intervalo de tiempo. Basándose en la siguiente ecuación:

$$\frac{\rho V_P}{\Delta t_\epsilon} (\phi_P - \phi_{P,v}) \quad (A.5)$$

Si delta de tiempo es grande el valor actual será el mismo que el calculado (no hay relajación), por el contrario el valor de delta de tiempo, debe de ir disminuyendo para poder incrementar la relajación.

Las condiciones de frontera, las fuentes y los sumideros son tratados similarmente y se representan de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\rho v\phi) \quad (A.6)$$

y se discretizan:

$$C(V - \phi) \quad (A.7)$$

C = coeficiente.

V = valor.

quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$a_p \phi_p = \sum_{F=W, E, N, S, H, L} a_F \phi_F + a_T \phi_T + VC(V - \phi_p) \quad (\text{A.8})$$

V = volumen de la celda.

Para expresar las condiciones de frontera (incluyendo sumideros y fuentes) se deben de especificar tres tipos de información:

- 1) En donde se encuentra.
- 2) Los valores de C y V.
- 3) Tipo.

Para indicar una condición de frontera se utiliza el comando PATCH, el cual tiene el siguiente argumento:

PATCH(nombre,tipo,ix,fx,iy,fy,iz,fz,it,ft)

nombre = nombre con el que se identificará.

tipo = puede ser principalmente del tipo volumen, area

(N,S,E,etc), inlet u outlet. Estos dos ultimos nos indican que por ese parche solo hay entrada o salida de masa respectivamente.

ubicación = i = inicio. f = final.

Los valores de C y V se dan en el comando COVAL (uno para cada variable.)

COVAL(nombre,variable,C,V)

nombre = nombre del PATCH al que pertenece.

variable = variable para los que es válida la C y V

(w,p1,etc).

Existen algunos otros comandos que pueden tener similar función a PATCH-COVAL como WALL-VALUE, INLET-VALUE y OUTLET-VALUE, sin embargo no se ahondará en ellos.

Existen algunos valores ya preestablecidos de C:

FIXFLU =  $1.0 \times 10^{-10}$

ONLYMS = 0

FIXP = 1

FIXVAL =  $1.0 \times 10^{10}$

El FIXFLU nos indica una entrada o flujo (de masa para p1). El FIXP y FIXVAL nos indica una salida de flujo (masa para p1). OLYMS nos indica una entrada, y si está unida a SAME con esto decimos que no va a ver una fuente de la variable, esto es, el valor de la variable será el misma siempre.

Para la creación de obstáculos se utiliza la instrucción CONPOR. Con esta

instrucción podemos obstruir el flujo de masa o calor en alguna parte del campo, dependiendo del valor de la porosidad (ejemplo: si porosidad = 0, en el lugar donde se encuentra la obstrucción se hacen automáticamente  $w1 = 0$ ,  $v1 = 0$ ,  $p1 = 0$ , etc).

CONPOR(nombre,porosidad,tipo,ix,fx,ix,fy,iz,fz,it,ft)

nombre = nombre con el que se le identificará.

porosidad = valor por el que multiplicará cualquier variable en ese lugar.

tipo = tipo que puede ser de volumen o area

(si va a afectar a toda la celda o solo una de las caras).

ubicación = i = inicio. f = final.

## Q1

\* Aereador para el caso de HUITES, Seccion 5. se corrio con

\* dos diferentes rugosidades para un gasto de 500l/s.

TALK = F; RUN(1,1); VDU = 0

\*\*\*\*\*\_

\*\*\*\*\*

\*

\* GROUP 1. Run title and other preliminaries.

\*

TEXT(AEREADOR SECCION 5 5.5 GRADOS )

\*

\*\*\*\*\*\_

\*\*\*\*\*

\*

\* GROUP 2. Transience; time-step specification.

\*

\*

\*\*\*\*\*\_

\*\*\*\*\*

\*

\* GROUP 3. X-direction grid specification.

\*

NX = 26

INTEGER(NXF01,NXL01); NXF01 = 1; NXL01 = 1

INTEGER(NXF02,NXL02); NXF02 = 2; NXL02 = 24

INTEGER(NXF03,NXL03); NXF03 = 25; NXL03 = 26

\*

\*\*\*\*\*\_

```

*****
*
* GROUP 4. Y-direction grid specification.
*
* Extent of the Domain in the Y-Direction: 1.300E +00
* Number of Cells in the Y-Direction
NY = 28
INTEGER(NYF01,NYLO1); NYF01 = 1; NYLO1 = 9
INTEGER(NYF02,NYLO2); NYF02 = 10; NYLO2 = 16
INTEGER(NYF03,NYLO3); NYF03 = 17; NYLO3 = 28
*
*****_
*****
*
* GROUP 5. Z-direction grid specification.
NZ = 20
INTEGER(NZF01,NZLO1); NZF01 = 1; NZLO1 = 8
INTEGER(NZF02,NZLO2); NZF02 = 9; NZLO2 = 20
*
*****_
*****
*
* GROUP 6. Body-fitted coordinates or grid distortion.
*
bfc = t; nonort = t; readco(GRID)
*
*****_
*****
*
* GROUP 7. Variables stored, solved & named.
*
* Solve for the PRESSURE
SOLVE(P1); SOLUTN(P1,Y,Y,y,n,N,N)
SOLVE(U1); SOLUTN(u1,Y,Y,n,y,N,N)
SOLVE(V1); SOLUTN(v1,Y,Y,n,y,N,N)
SOLVE(W1); SOLUTN(w1,Y,Y,n,y,N,N)
*
* C1 es para beta; C2 es para Dp/rho*g*h
store(c2,c1)
*****_
*****
*

```

```

* GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices.
*
*
*****
*
* GROUP 9. Properties of the medium (or media).
*
* Set First-Phase Density Value
RHO1 = 1.000E+00
* Set Laminar Kinematic Viscosity
ENUL = 1.589E-05
* Select K-E Turbulence Model
* ENUT = CMU * (Mixing-StrLen) * K**0.5
* EL1 = (CD * K**1.5)/E
TURMOD(KEMODL)
*
store(enut)
store(ke,ep)
*****
*
* GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties.
*
*
*****
*
* GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields.
* PARTE DERECHA DEL DUCTO.
CONPOR(ductlat,0.0,CELL,-18,-NXLO2,-1,-26,-1,-8)
* CHORRO DE AGUA.
C O N P O R ( F L U I
DO,0.0,CELL,-NXF01,-NXLO3,-NYF02,-NYLO2,-NZF02,-NZLO2)
* Fully-Blocked (Non-Porous) Region, Named PRD01
* PARTE IZQUIERDA ESCALON.
CONPOR(PRD01,0.0,CELL,-NXF01,-NXLO1,-NYF01,-26,-NZF01,-NZLO1)
* Fully-Blocked (Non-Porous) Region, Named PRD02
* PARTE DERECHA ZONA DE IMPACTO.
CONPOR(PRD02,0.0,CELL,-NXF03,-NXLO3,-NYF01,-26,-NZF01,-NZLO1)
* Fully-Blocked (Non-Porous) Region, Named OBS04
* ESCALON.

```

```

C      O      N      P      O      R
(OBS04,0.0,CELL,-NXF01,-NXL01,-NYF01,-NYL01,-NZF01,-NZL02)
  * Fully-Blocked (Non-Porous) Region, Named OBS05
  * ZONA DE IMPACTO.

C      O      N      P      O      R
(OBS05,0.0,CELL,-NXF03,-NXL03,-NYF01,-NYL01,-NZF01,-NZL02)
  * CURVA DEL DUCTO.
CONPOR(DUC1,0.0,CELL,-2,-18,-1,-6,-1,-1)
CONPOR(DUC2,0.0,CELL,-2,-18,-1,-4,-2,-2)
CONPOR(DUC3,0.0,CELL,-2,-18,-1,-3,-3,-3)
CONPOR(DUC4,0.0,CELL,-2,-18,-1,-2,-4,-4)
CONPOR(DUC5,0.0,CELL,-2,-18,-1,-1,-5,-5)
CONPOR(DUC6,0.0,CELL,-2,-18,-1,-1,-6,-6)
  *
patch(guey,linvlz,1,nx,1,9,9,nz,1,1)
init(guey,p1,240.0,-200.0)
  inifld = t
  guey = skip
  *****
*****
  *
  * GROUP 13. Boundary conditions and special sources.
  * PARTE BAJA DEL CHORRO DE AGUA ****
PATCH(BFCSAL1,NORTH, NXF02, NXL02, NYL01, NYL01, NZF02,
NZf02,1,1)
COVAL(BFCSAL1, P1, FIXFLU, grnd)
COVAL(BFCSAL1, U1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL1, V1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL1, W1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL1, KE, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL1, EP, ONLYMS, same)
  * Inlet Boundary Condition, Named BFCSAL
PATCH(BFCSAL2,NORTH, NXF02, NXL02, NYL01, NYL01,10,10,1,1)
COVAL(BFCSAL2, P1, FIXFLU, grnd)
COVAL(BFCSAL2, U1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL2, V1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL2, W1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL2, KE, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL2, EP, ONLYMS, same)
  * Inlet Boundary Condition, Named BFCSAL
PATCH(BFCSAL3,NORTH, NXF02, NXL02, NYL01, NYL01,11,11,1,1)
COVAL(BFCSAL3, P1, FIXFLU, grnd)

```



COVAL(BFCSAL3, U1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL3, V1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL3, W1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL3, KE, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL3, EP, ONLYMS, same)

PATCH(BFCSAL4,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,12,12,1,1)  
COVAL(BFCSAL4, P1, FIXFLU, grnd)  
COVAL(BFCSAL4, U1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL4, V1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL4, W1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL4, KE, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL4, EP, ONLYMS, same)

\* Inlet Boundary Condition, Named BFCSAL

PATCH(BFCSAL5,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,13,13,1,1)  
COVAL(BFCSAL5, P1, FIXFLU, grnd)  
COVAL(BFCSAL5, U1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL5, V1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL5, W1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL5, KE, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL5, EP, ONLYMS, same)

\* Inlet Boundary Condition, Named BFCSAL

PATCH(BFCSAL6,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1, 14,14,1,1)  
COVAL(BFCSAL6, P1, FIXFLU, grnd)  
COVAL(BFCSAL6, U1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL6, V1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL6, W1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL6, KE, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL6, EP, ONLYMS, same)

\* Inlet Boundary Condition, Named BFCSAL

PATCH(BFCSAL7,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,15,15,1,1)  
COVAL(BFCSAL7, P1, FIXFLU, grnd)  
COVAL(BFCSAL7, U1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL7, V1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL7, W1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL7, KE, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL7, EP, ONLYMS, same)

\* Inlet Boundary Condition, Named BFCSAL

PATCH(BFCSAL8,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,16,16,1,1)  
COVAL(BFCSAL8, P1, FIXFLU, grnd)  
COVAL(BFCSAL8, U1, ONLYMS, same)  
COVAL(BFCSAL8, V1, ONLYMS, same)

```

COVAL(BFCSAL8, W1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL8, KE, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL8, EP, ONLYMS, same)
  * Inlet Boundary Condition, Named BFCSAL
PATCH(BFCSAL9,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,17,17,1,1)
COVAL(BFCSAL9, P1, FIXFLU, grnd)
COVAL(BFCSAL9, U1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL9, V1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL9, W1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL9, KE, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL9, EP, ONLYMS, same)
  *
PATCH(BFCSAL10,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,18,18,1,1)
COVAL(BFCSAL10, P1, FIXFLU, grnd)
COVAL(BFCSAL10, U1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL10, V1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL10, W1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL10, KE, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL10, EP, ONLYMS, same)
  *
PATCH(BFCSAL11,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,19,19,1,1)
COVAL(BFCSAL11, P1, FIXFLU, grnd)
COVAL(BFCSAL11, U1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL11, V1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL11, W1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL11, KE, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL11, EP, ONLYMS, same)
  *
PATCH(BFCSAL12,NORTH, NXF02, NXLO2, NYLO1, NYLO1,20,20,1,1)
COVAL(BFCSAL12, P1, FIXFLU, grnd)
COVAL(BFCSAL12, U1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL12, V1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL12, W1, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL12, KE, ONLYMS, same)
COVAL(BFCSAL12, EP, ONLYMS, same)
  *
  * OUTLET Boundary Condition, Named ATRAS
  * PARTE DE AIRE SOBRE EL CHORRO.
PATCH(ATRAS, inflo, NXF01, NXF01, NYF03, ny, NZF02, NZL02,1,1)
COVAL(ATRAS, P1, FIXP, .000E+00)
COVAL(ATRAS, U1, ONLYMS, same)
COVAL(ATRAS, KE, ONLYMS,SAME)

```

COVAL(ATRAS, EP, ONLYMS,SAME)

\*\*\*\*\*

PATCH(ATRAS1, cell, NXF01, NXF01, NYF03,nyf03 + 5, NZF02, NZL02,1-  
,1)

coval(atras1, u1, fixval,4.0)

PATCH(ATRAS2, cell, NXF01, NXF01, NYF03 + 6,nyf03, NZF02, NZL02,1-  
,1)

coval(atras2, u1, fixval,2.0)

\* OUTLET Boundary Condition, Named TECHO1

\* TECHO DEL AIREADOR.

PATCH(TECHO1,inflo, NXF01, NXL03, NYL03, NYL03, NZF01, NZL02,1,1)

COVAL(TECHO1, P1, FIXP, 0.000E + 00)

COVAL(TECHO1, u1, ONLYMS,same)

COVAL(TECHO1, v1, ONLYMS,0.00)

COVAL(TECHO1, w1, ONLYMS,0.00)

COVAL(TECHO1, KE, ONLYMS,SAME)

COVAL(TECHO1, EP, ONLYMS,SAME)

TECHO1 = skip

\* OUTLET Boundary Condition, Named DELANTE

PATCH(DELANTE, outflo, NXL03, NXL03, NYF03, ny, NZF02, NZL02,1,1)

COVAL(DELANTE, P1, FIXp, .0)

COVAL(DELANTE, KE, ONLYMS,SAME)

COVAL(DELANTE, EP, ONLYMS,SAME)

\*\*\*\*\*

\* OUTLET Boundary Condition, Named TECHO1

PATCH(SIDE, low, NXF01, NXL03, 27, NYL03, NZF01, NZf01,1,1)

COVAL(SIDE, P1, FIXP, 0.000E + 00)

COVAL(SIDE, KE, ONLYMS,SAME)

COVAL(SIDE, EP, ONLYMS,SAME)

side = skip

\*

\* rg(21) es la rugosidad normal

\*rg(20) es la rugosidad aparente del agua

rg(21) = 0.00050

\* en la segunda corrida se uso rg(20) = 0.02

rg(20) = 0.005

\* PARTE SUPERIOR DEL CHORRO \*

patch(watup,swall,NXF01,NXL03,NYL02 + 1,NYL02 + 1,NZF02,NZL02,1,1)

coval(watup, u1, grnd2, 8.75)

watup = skip

\*

```

* PARTE INFERIOR DEL CHORRO *
patch(watdw,nwall,NXF01,NXL03,NYLO1,NYLO1,NZF02,NZLO2,1,1)
coval(watdw, u1, grnd2, 8.75)
  watdw = skip
*
** Parte interna del chorro
patch(watla,hwall,nxf02,17,nyf02,nyl02,8,8,1,lstep)
coval(watla,u1,grnd2, 8.75)
* PARED DEL DUCTO *
* !!! OJO con segundo indice en x !!!!!!!
patch(ducto,lwall,nxf02,18,nyf01,nyl02,nzf01,nzl02,1,1)
coval(ducto, u1, grnd2, 0.0)
coval(ducto, v1, grnd2, 0.0)
coval(ducto, ke, grnd2, grnd2)
coval(ducto, ep, grnd2, grnd2)
  ducto = skip
*
* SUELO DEL AIREADOR *
patch(suelo,swall,nxf02,nxl02,nyf01,nyf01,nzf01,nzl02,1,1)
coval(suelo, u1, grnd2, 0.0)
coval(suelo, w1, grnd2, 0.0)
coval(suelo, ke, grnd2, grnd2)
coval(suelo, ep, grnd2, grnd2)
  suelo = skip
*
*****
*****
*
* GROUP 14. Downstream pressure for PARAB = .TRUE..
*
*
*****
*****
*
* GROUP 15. Termination of sweeps.
*
* Number of Iterative Sweeps (Outer Iterations)
LSWEEP = 100
  estrt(p1,u1,v1,w1,ke,ep)
  restrt(all)
*
csg1 = a;isg2 = 1

```

```

*****
*****
*
* GROUP 16. Termination of iterations.
*
*
*****
*****
*
* GROUP 17. Under-relaxation devices.
*
* LG(10) = T para formulacion con gama
* LG(20) = T para imprimir los VALores de gasto
* LG(19) = T para imprimir y calcular areas
lg(10) = t
lg(19) = t
lg(20) = f
boolean(bafle)
bafle = t
if(bafle) then
relax(p1,linrlx,0.50)
REAL(SCALEL,SCALEU);SCALEL = 1.000E-02;SCALEU = 1.500E + 00* 1.0
RELAX(U1,FALSDT, 1.000E + 01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(V1,FALSDT, 0.500E + 01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(W1,FALSDT, 0.500E + 01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(KE,FALSDT, 0.300E-01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(EP,FALSDT, 1.000E-02*SCALEL/SCALEU)
else
relax(p1,linrlx,0.25)
REAL(SCALEL,SCALEU);SCALEL = 1.000E-02;SCALEU = 9.000E + 00
RELAX(U1,FALSDT, 1.000E-01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(V1,FALSDT, 1.000E-01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(W1,FALSDT, 1.000E-0*SCALEL/SCALEU)
RELAX(KE,FALSDT, 1.000E-01*SCALEL/SCALEU)
RELAX(EP,FALSDT, 1.000E-04*SCALEL/SCALEU)
endif
*
*****
*****
*
* GROUP 18. Limits on variables or increments to them.
*

```

```

*
*****
*
* GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND.
*
*
*****
real(qw,k1,k2,k3,frud,ggrav,tiran,gama,rhow,areaw)
areaw = 0.615915
qw = 0.750/areaw; rg(1) = qw
k1 = 0.1713; rg(2) = k1
k1 = 0.068; rg(2) = k1
frud = 8.67; rg(3) = frud
k2 = 5.50; rg(4) = k2
k3 = 1.70; rg(5) = k3
ggrav = 9.8; rg(6) = ggrav
tiran = 0.1031; rg(7) = tiran
gama = 1.00; rg(8) = gama
rhow = 1000.0; rg(9) = rhow
*
* ig(6) es la primera z libre; ig(1) e ig(2) primera y ultima x
* ig(4) e ig(3) es la y
ig(1) = 2; ig(2) = 24; ig(3) = 9; ig(4) = 9; ig(6) = 9
ig(1) = 1; ig(2) = 26; ig(3) = 9; ig(4) = 9; ig(6) = 20
*****
*
* GROUP 20. Preliminary print-out.
*
* Activate Printout of Satellite Data.
ECHO = T
*
*****
*
* GROUP 21. Print-out of variables.
*
* Printout for the PRESSURE
OUTPUT(P1,n,N,N,Y,Y)
* Printout for the X-DIRECTION VELOCITY COMPONENT

```

```

OUTPUT(U1,n,N,N,Y,Y,Y)
  * Printout for the Y-DIRECTION VELOCITY COMPONENT
OUTPUT(V1,n,N,N,Y,Y,Y)
  * Printout for the Z-DIRECTION VELOCITY COMPONENT
OUTPUT(W1,n,N,N,Y,Y,Y)
  * Printout for the TURBULENT KINETIC ENERGY
OUTPUT(KE,n,N,N,Y,Y,Y)
  * Printout for the KINETIC-ENERGY DISSIPATION RATE
OUTPUT(EP,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(C2,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(C1,n,N,N,Y,Y,Y)
OUTPUT(ENUT,n,N,N,Y,Y,Y)
  *
  *****
*****
  *
  * GROUP 22. Spot-value print-out.
  *
  * X-Direction Index of Spot-Value
IXMON = 9
  * Y-Direction Index of Spot-Value
IYMON = 4
  * Z-Direction Index of Spot-Value
IZMON = 14
  *
xzpr = t;iyprf = 1;iyprl = 9;ixprf = 2;ixprl = 16;izprf = 5
  *
  *****
*****
  *
  * GROUP 23. Field print-out and plot control.
  *
  * Frequency of tabulation/plots of Spot/Residuals Values
  * (DO NOT Reset)
NPLT = 1
  * Print TABLES AND PLOTS of Spot-Values and Residuals
ITABL = 3
  *
  *****
*****
  *
  * GROUP 24. Preparations for continuation runs.

```

```
*  
* Save the Final Flow Field in a RE-START File  
SAVE=T; NSAVE=CHAM  
*  
*****_  
*****  
STOP
```



# APÉNDICE B.

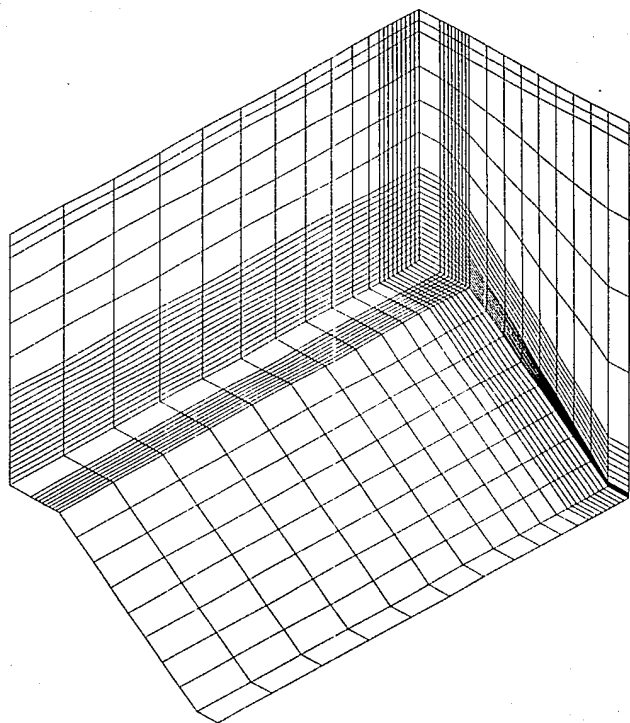
B.1

imax 27  
jmax 29  
li 1 2 1 1 -0.04762 0.0 0.0 0.0  
li 2 10 1 1 0.0 0.0 0.14286 0.0  
li 10 18 1 1 0.14286 0.0 0.35 0.0  
sp 18 26 1 1 1.4  
nd 7  
da  
.3500 0.0  
.3810 -0.00544  
.4286 -0.01356  
.5714 -0.03625  
.6667 -0.0499  
.7143 -0.05644  
.783 -0.06613  
li 26 27 1 1 0.783 -0.06613 0.8828 -0.06613  
li 1 1 1 10 -0.04762 0.0 -0.04762 0.080950  
li 1 1 10 17 -0.04762 0.080950 -0.04762 0.18405  
li 1 1 17 27 -0.04762 0.18405 -0.04762 0.47619  
li 1 1 27 29 -0.04762 0.47619 -0.04762 0.52381  
li 2 2 1 10 0.0 0.0 0.0 0.080950  
li 2 2 10 17 0.0 0.080950 0.0 0.18405  
li 2 2 17 27 0.0 0.18405 0.0 0.47619  
li 2 2 27 29 0.0 0.47619 0.0 0.52381  
li 10 10 1 10 .14286 0.0 0.14286 0.06199  
li 10 10 10 17 0.14286 0.06199 0.14286 0.16509  
li 10 10 17 27 0.14286 0.16509 0.14286 0.47619  
li 10 10 27 29 0.14286 0.47619 0.14286 0.52381  
li 18 18 1 10 .35 0.0 0.35 0.02975  
li 18 18 10 17 0.35 0.02975 0.35 0.13285  
li 18 18 17 27 0.35 0.13285 0.35 0.47619  
li 18 18 27 29 0.35 0.47619 0.35 0.52381  
li 26 26 1 10 0.783 -0.06613 0.783 -0.05574  
li 26 26 10 17 0.783 -0.05574 0.783 0.04736  
li 26 26 17 27 0.783 0.04736 0.783 0.47619  
li 26 26 27 29 0.783 0.47619 0.783 0.52381  
li 27 27 1 10 0.8828 -0.06613 0.8828 -0.05574  
li 27 27 10 17 0.8828 -0.05574 0.8828 0.04736  
li 27 27 17 27 0.8828 0.04736 0.8828 0.47619

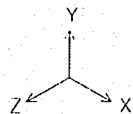
li 27 27 27 29 0.8828 0.47619 0.8828 0.52381  
li 1 2 27 27 -0.04762 0.47619 0.0 0.47619  
li 2 10 27 27 0.0 0.47619 0.14286 0.47619  
li 10 18 27 27 0.14286 0.47619 0.35 0.47619  
li 18 26 27 27 0.35 0.47619 0.783 0.47619 1.4  
li 26 27 27 27 0.783 0.47619 0.8828 0.47619  
li 1 2 29 29 -0.04762 0.52381 0.0 0.52381  
li 2 10 29 29 0.0 0.52381 0.14286 0.52381  
li 10 18 29 29 0.14286 0.52381 0.35 0.52381  
li 18 26 29 29 0.35 0.52381 0.783 0.52381 1.4  
li 26 27 29 29 0.783 0.52381 0.8828 0.52381  
li 1 2 10 10 -0.04762 0.080950 0.0 0.080950  
sp 2 10 10 10  
nd 5  
da  
0.0 0.080950  
0.02381 0.07797  
0.0476 0.07493  
0.09524 0.06860  
0.14285 0.06199  
spl 10 18 10 10  
nd 5  
da  
0.14285 0.06199  
0.2381 0.04786  
0.28 0.04127  
0.3170 0.03527  
0.35 0.02975  
spl 18 26 10 10 1.4  
nd 6  
da  
0.35 0.02975  
0.47619 .0074  
0.57143 -0.0109  
0.6667 -0.0304  
0.7143 -0.04054  
0.783 -0.05574  
li 26 27 10 10 0.783 -0.05574 0.8828 -0.05574  
li 1 2 17 17 -0.04762 0.18405 0.0 0.18405  
sp 2 10 17 17  
nd 5  
da

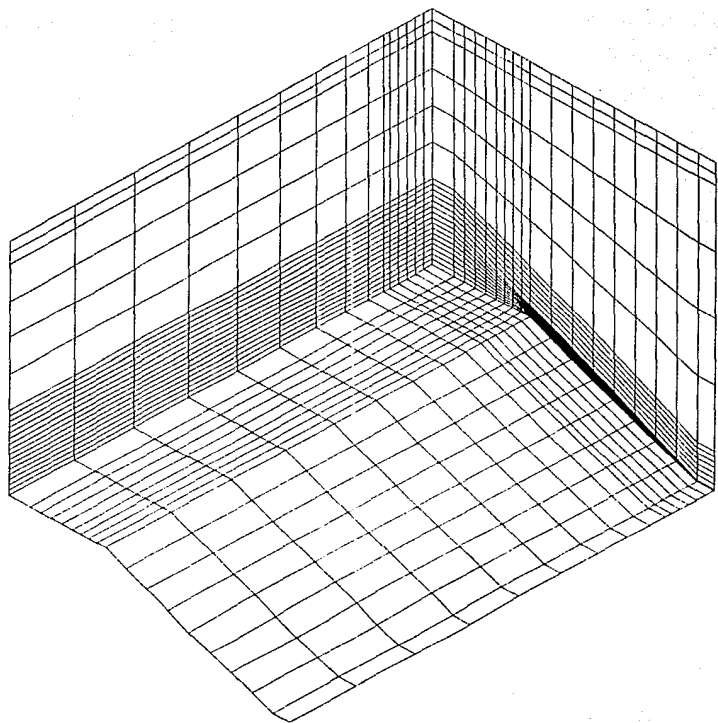
0.0 0.18405  
0.02381 0.18107  
0.04762 0.17803  
0.09524 0.17170  
0.14286 0.16509  
spl 10 18 17 17  
nd 5  
da  
0.14286 0.16509  
0.2381 0.15096  
0.28 0.14437  
0.3170 0.13837  
0.35 0.13285  
spl 18 26 17 17 1.4  
nd 6  
da  
0.35 0.13285  
0.47619 0.1105  
0.57143 0.0922  
0.66667 0.0727  
0.7143 0.06256  
0.783 0.04736  
li 26 27 17 17 0.783 0.04736 0.8828 0.04736  
fxy 1 27 10 10  
fxy 1 27 17 17  
fxy 1 27 21 21  
fxy 2 2 1 23  
fxy 18 18 1 23  
fxy 18 18 1 23  
fxy 26 26 1 23  
gr 1 2 1 10  
gr 2 10 1 10  
gr 10 18 1 10  
gr 18 26 1 10  
gr 26 27 1 10  
gr 1 2 10 17  
gr 2 10 10 17  
gr 10 18 10 17  
gr 18 26 10 17  
gr 26 27 10 17  
gr 1 2 17 27  
gr 2 10 17 27

gr 10 18 17 27  
gr 18 26 17 27  
gr 26 27 17 27  
gr 1 2 27 29  
gr 2 10 27 29  
gr 18 26 27 29  
gr 10 18 27 29  
gr 26 27 27 29  
gr

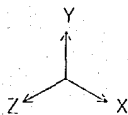
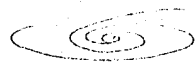


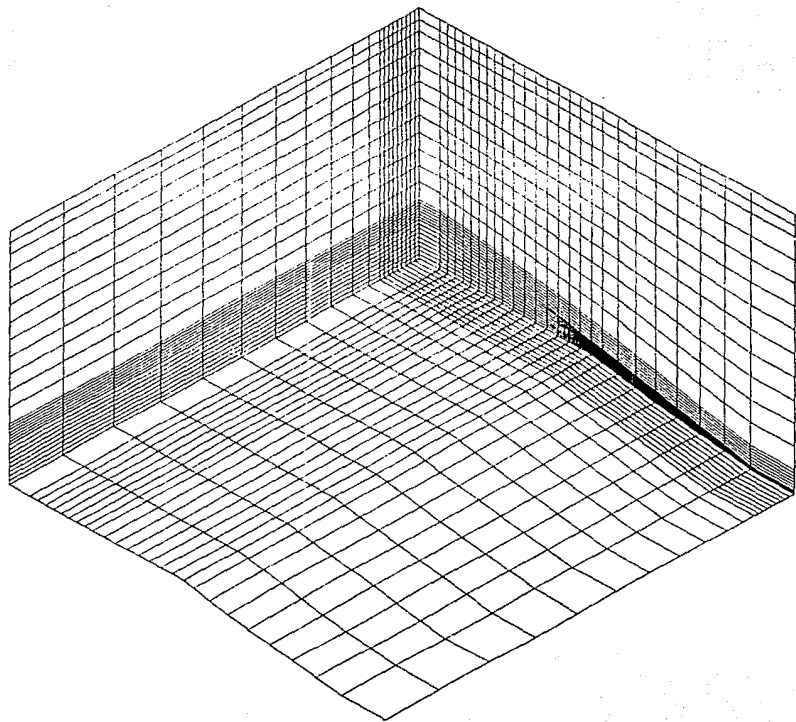
MALLA DEL AIREADOR 1.



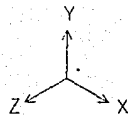


MALLA DEL AIREADOR 4.





MALLA DEL AIREADOR 5.





# APÉNDICE C.

La subrutina GROUND es llamada desde el programa Q1 con la instrucción " grnd ", que se coloca en la cuarta instrucción del comando COVAL. Esta instrucción, en nuestro caso, se colocó en la variable p1, esto con el fin de que una vez calculada p1 (que viene siendo diferencia de Presión en la ecuación de demanda de aire), va a la subrutina GROUND donde calculará el gasto de aire y el parámetro beta para cada punto de las dos siguientes maneras:

- 1) Se inicializan las constantes GROUND (se recomienda que comiencen con g), cuyo valor previamente se les dió en Q1.

gqw = rg(1) Gasto de agua.  
gk1 = rg(2) Constante k1.  
gfrud = rg(3) El froude en esa sección (agua).  
gk2 = rg(4) Constante k2.  
gk3 = rg(5) Constante k3.  
grav = rg(6) Aceleración de la gravedad.  
gtiran = rg(7) Tirante en esa sección (agua).  
gama = rg(8) Constante gama.  
grhow = rg(9) Densidad del agua.

- 2) Se obtienen las siguientes partes de la ecuación, almacenándose en las variables g1, g2 y g3.

$$g1 = \rho_{1} * gqw \quad (2.27)$$

$\rho_{1}$  = densidad del aire.

$$g2 = gk1 * (gfrud * gk2) \quad (2.28)$$

$$g3 = -gk3 * (grhow * grav * gtiran) \quad (2.29)$$

- 3) A partir de las partes anteriores de la ecuación, se hacen otras más complejas.

$$g4 = g1 * g2 = \rho_{1} * gqw * gk1 * (gfrud * gk2) \quad (2.30)$$

$$g5 = g1 * g3 = \rho_{1} * gqw * (-gk3) * (grhow * grav * gtiran) \quad (2.31)$$

- 4) El GROUND cuenta con una serie de funciones (más de 100), para facilitar el manejo de las ecuaciones. Las funciones que se usaron en este caso fueron las siguientes:

FN0(y,x)	$y = x$	(2.32)
FN2(y,x,A,B)	$y = A + B * x$	(2.33)
FN8(y,x,A,B,C,D)	$y = A * (x + B) ** C + D$	(2.34)
FN23(Y,A)	$y = \text{AMIN1}(y,A)$ (toma el menor valor)	(2.35)
FN25(y,A)	$y = A * y$	(2.36)
FN40 (y)	$y = \text{ABS}(y)$	(2.37)

Se debe de anteponer a cada función el comando CALL, para llamar a la función dada.

Guarda el valor de p1 en la variable grsp1 (previamente inicializada en el principio del propio GROUND).

CALL FN0 (grsp1,p1) grsp1 = p1 (2.38)

Se toma el valor absoluto de grsp1.

CALL FN40(grsp1) grsp1 = ABS(grsp1) (2.39)

Se conforma, propiamente dicho, la ecuación.

CALL FN8(val,grsp1,g5,0.0,gama,g4) (2.40)

val = g5 \* (grsp1) \*\* gama + g4 (2.41)

val = rho1 \* gqw \* ((rho1 \* grav \* gtiran) \*\*

(gama)) \* ((grsp1) \*\* (gama)) +

rho1 \* gqw \* (gk1 \* (gfrud - gk2)) (2.42)

Se le cambia el signo (dirección del flujo).

CALL FN25(val,-1.0) val = -val (2.43)

Toma el menor valor de 0 y val.

CALL FN23(val,0.0) val = AMIN(val,0.0) (2.44)

Con ésto, ya se ha obtenido el gasto de aire en el aereador.

El siguiente paso es calcular el parámetro beta.

CALL FN2(C1,val,0.0,-1.0/g1) (2.45)

C1 = -val/g1 (2.46)

C1 es una variable que se puede manipular como las variables ya conocidas (v1,w1,etc).

La segunda forma, que es la que fue usada consiste en sustituir el ultimo paso del algoritmo anterior, por el siguiente:

4\*) Se adimensionalizan las variables P1 y Val, y se les da el nombre gP1 y gval.

CALL gtyx(P1,gP1,nydim,nxdim) (2.47)

CALL gtyx(val,gval,nydim,nxdim)

Se hace la subprograma (FORTRAN), para que calcule beta.

```

do ix=ixf,ixl                                     (2.48)
do iy=iyf,iyl
  if (gp1(iy,ix).gt.0.0) gp1 (iy,ix) =0.0
  gval(ix,iy) =-(g4-gp1(iy,ix) *g5)
  if(gval(ix,iy).gt.0.0)gval(iy,ix) =0.0
end do
end do

```

## MODIFICACIONES AL GROUND.

```

PROGRAM MAIN
C FILE NAME GROUND.FTN-----200190
c
C THIS IS THE MAIN PROGRAM OF EARTH
C
C (C) COPYRIGHT 1984, LAST REVISION 1989.
C CONCENTRATION HEAT AND MOMENTUM LTD. ALL RIGHTS
RESERVED.
C This subroutine and the remainder of the PHOENICS code are
C proprietary software owned by Concentration Heat and Momentum
C Limited, 40 High Street, Wimbledon, London SW19 5AU, England.
CXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX USER
SECTION STARTS:
C
C 1 Set dimensions of data-for-GROUND arrays here. WARNING: the
C corresponding arrays in the MAIN program of the satellite
C and EARTH must have the same dimensions.
PARAMETER (NLG = 20, NIG = 20, NRG = 100, NCG = 10)
C
COMMON/LGRND/LG(NLG)//GRND/IG(NIG)/RGRND/RG(NRG)/CGRND/CG(
NCG)
LOGICAL LG
CHARACTER*4 CG
C
C 2 User dimensions own arrays here, for example:
C DIMENSION GUH(10,10),GUC(10,10),GUX(10,10),GUZ(10)
C
parameter(nzdim = 50,nxdim = 50,nydim = 50)
dimension gc1(nydim,nxdim),gval(nydim,nxdim)
dimension gp1(nydim,nxdim)

```

```

dimension garean(nydim,nxdim),gareap(nydim,nxdim)

IXL = IABS(IXL)
IF(IGR.EQ.13) GO TO 13
IF(IGR.EQ.19) GO TO 19
GO TO (1,2,3,4,5,6,25,8,9,10,11,12,13,14,25,25,25,25,19,20,25,
125,23,24),IGR
25 CONTINUE
RETURN
C*****
*****
C
C--- GROUP 1. Run title and other preliminaries
C
1 GO TO (1001,1002),ISC
1001 CONTINUE
call make(yg2d)
call make(grsp1)
call make(grsp2)
call make(grsp3)
C User may here change message transmitted to the VDU screen or
C batch-run log file.
IF(IGR.EQ.1.AND.ISC.EQ.1) THEN
CALL WRYT40('GROUND file is GROAEREA.F of: 290393 ')
CALL WRYT40('PHOENICS version number is : 1.5.3 ')
ENDIF
C
RETURN
1002 CONTINUE
RETURN
C--- GROUP 13. Boundary conditions and special sources
C Index for Coefficient - CO
C Index for Value - VAL
13 CONTINUE
GO TO (130,131,132,133,134,135,136,137,138,139,1310,
11311,1312,1313,1314,1315,1316,1317,1318,1319,1320,1321),ISC
130 CONTINUE
C----- SECTION 12 ----- value = GRND
Capp .Calculo del flujo de aire que entra al aereador y se lleva
c ...el agua por la parte inferior del tirante
c ...Primera opcion corresponde a Wood. Segunda al otro guey
IF(LG(10)) then

```

```

    call getyx(p1,gp1,nydim,nxdim)
    call getyx(val,gval,nydim,nxdim)
c ...I.R. Wood Air Entrainment in Free-Surface flows, pp 96
c ... rho*qaire=rho*qw*((K1*(Fr-K2)-K3*(DP/rhow*g*h)^gama)
Capp Se reemplaza el signo de la ec. para dejar a la presion con su signo
c ... rho*qaire=rho*qw*((K1*(Fr-K2) +K3*(DP/rhow*g*h)^gama)
gqw = rg(1)
gk1 = rg(2)
gfrud = rg(3)
gk2 = rg(4)
gk3 = rg(5)
grav = rg(6)
gtiran = rg(7)
gama = rg(8)
grhow = rg(9)
g1 = rho1*gqw
g2 = gk1*(gfrud - gk2)
g3 = gk3*(grhow*grav*gtiran)**(-gama)
g4 = g1*g2
g5 = g1*g3
c call fn0(grsp1,p1)
c call fn23(grsp1,0.0)
c call prn('GRSP',grsp1)
c call fn8(val,grsp1,g5,0.0,gama,g4)
c call fn8(val,p1,5.36e-04,0.0,gama,g4)
c call fn8(val,grsp1,.2,1.0,gama,g4)
do ix=ixf,ixl
  do iy=iyf,iyl
    if(gp1(iy,ix).gt.0.0) gp1(iy,ix)=0.0
    gval(iy,ix)=-g4+gp1(iy,ix)*g5
    if(gval(iy,ix).gt.0.0) gval(iy,ix)=0.0
  end do
end do
  call setyx(val,gval,nydim,nxdim)
c call fn25(val,-1.0)
if((isweep.eq.lisweep-1.or.enufsw).and.LG(20)) then
write(6,*) 'no entro aqui !!!!!!!!!!!!!!!'
write(14,*) 'PARCHE ',npatch
write(14,*) 'step ',izstep
write(14,*) 'G1',g1,'G2 ',g2,'G3',g3,'G4',g4,'G5',g5
c call prn('pres',p1)
c call prn('valo',val)

```

```

endif
  if((isweep.eq.isweep-1.or.enufsw)) then
c   write(6,*) 'estoy onde debo !!!!!!!!!!!!!!!'
    call fn2(c1,val,0.0,-1./g1)
  endif
ELSE IF(LG(11)) THEN
  gvmedia = rg(1)
  grhow = rg(2)
  gqw = rg(3)
  gzeta = rg(4)
  gbetamax = rg(5)
  ggrav = rg(6)
  gpi = rg(7)
  gtheta = rg(8)
  galfa = rg(9)
  gts = rg(10)
  gtr = rg(11)
  gtirante = rg(12)
  Emr = 1.0/2.3*tan(gtheta)**1.15*exp(1.15*(tan(galfa)**2.0))
  Ems = 1.0/3.0*(gts/gtirante)**2.0
  Emin = -(Emr + Ems)
  call fn0(grsp1,p1)
  call fn40(grsp1)
  call fn28(c1,grsp1,grhow*gvmedia**2.0)
  call fn33(c1,Emin)
  call fn25(c1,0.003)
  call getyx(c1,gc1,nydim,nxdim)
  do ix=ixf,ixl
  do iy=iyf,iyl
    garg = gc1(iy,ix)
    gval(iy,ix) = -rho1*rg(5)*gqw*(2.0/gpi*atan(garg))**zeta
c   if(isweep.eq.isweep) then
c     write(14,*) 'ix, iy, step ',ix,iy,izstep
c     write(14,*) 'gc1 ',gc1(iy,ix)
c     write(14,*) 'garg ',garg
c     write(14,*) 'gval ',gval(iy,ix)
c   endif
  end do
end do
end do
call setyx(val,gval,nydim,nxdim)
if(isweep.eq.isweep-1.or.enufsw) then
  write(14,*) 'B E T A M A X ',rg(5)

```

```

write(14,*) 'PARCHE ',npatch
write(14,*) 'step ',izstep
call prn('valo',val)
endif
ELSE
  gqw = rg(1)
  gfrud = rg(3)
  grav = rg(6)
  gtiran = rg(7)
  gama = rg(8)
  grhow = rg(9)
  call fn0(grsp1,p1)
  call fn40(grsp1)
  gbeta1 = 0.47*(gfrud-4.5)**0.59
  gbeta = rho1*gqw*gbeta1*(grhow*grav*gtiran)**-gama
  call fn8(val,grsp1,gbeta,0.0,gama,0.0)
  call fn25(val,-1.0)
  call fn23(val,0.0)
  if(isweep.eq.lswEEP-1.or.enufsw) then
c   write(6,*) 'estoy onde debo !!!!!!!!!!!!!!!'
  write(14,*) 'PARCHE ',npatch
  write(14,*) 'step ',izstep
  call prn('valo',val)
  endif
ENDIF
RETURN
C--- GROUP 19. Special calls to GROUND from EARTH
C
  19 GO TO (191,192,193,194,195,196,197,198),ISC
191 CONTINUE
C * ----- SECTION 3 ---- Start of iz slab.
capp ... start
C * Las siguientes lineas calculan el area este de las celdas
c * a seleccionar con ig(1) e ig(2) y el gasto asociado. Los
c * valores de ig(1) e ig(2) se deben especificar en el Q1

IF(.NOT.LG(19).OR.IZSTEP.LE.(ig(6)-1)) RETURN
IF(ISWEEP.EQ.LSWEEP-1) THEN
  if(izstep.eq.ig(6)) then
    GTOTN=0.0
    GTOTP=0.0
  endif

```



```

GARZN = 0.0
GARZP = 0.0
GARN = 0.0
GARP = 0.0
c   GASTO = 0.0
    CALL GTIZYX(APROJN,izstep,GAREAP,NYDIM,NXDIM)
    CALL GTIZYX(ASURFN,izstep,GAREAN,NYDIM,NXDIM)
c   CALL GETYX(U1,GUVEL,NYDIM,NXDIM)
    do ix = ig(1),ig(2)
      do iy = ig(3),ig(4)
        garn = garn + garean(iy,ix)
        garp = garp + gareap(iy,ix)
c       gflujo = gareae(iy,ix)*guvel(iy,ix)
c       gasto = gasto + gareae(iy,ix)*guvel(iy,ix)
        write(14,*) ' Slab No. ',izstep
        write(14,*) 'Elemento (',ix,',',iy,'):'
        write(14,*) 'area normal',garean(iy,ix)
        write(14,*) 'areaproj ',gareap(iy,ix)
c       write(14,*) 'velocidad ',guvel(iy,ix)
c       write(14,*) 'Flujo ',gflujo
        call writbl
      END DO
      write(14,*) 'Area Normal para ix',ix,' es ',garn
      write(14,*) 'Area Proyectada para ix',ix,' es ',garp
c     write(14,*) 'GASTO TOTAL ',gasto
c     call writst
      call writbl
      GARZN = garzn + garn
      GARZP = garzp + garp
      garn = 0.0
      garp = 0.0
    END DO
    call writbl
    call writst
    write(14,*) 'Area Normal para slab',izstep,' es ',garzn
    write(14,*) 'Area Proyectada para slab',izstep,' es ',garzp
    GTOTN = gtotn + garzn
    GTOTP = gtotp + garzp
  ENDF
  if(izstep.eq.nz.and.isweep.eq.lisweep-1) then
    write(14,*) 'Area Normal Total es ',gtotn
    write(14,*) 'Area Proyectada Total es ',gtotp
  
```

```

endif
capp ... end
RETURN
C * ----- SECTION 6 ---- Finish of iz slab.
if(isweep.eq.lisweep-1) then
  call fn0(grsp1,p1)
  call fn40(grsp1)
  call fn2(c2,grsp1,0.0,1.0/9800.0)
endif
RETURN
197 CONTINUE
C * ----- SECTION 7 ---- Finish of sweep.
Capp. Suma de todos los parches para calcular el flujo total
c ... de aire que sale del aereador
if(isweep.eq.lisweep-1) then
  if (.not.bfc) then
    call getsor('SAL1',r1,aire1)
    call getsor('SAL2',r1,aire2)
    call getsor('SAL3',r1,aire3)
    call getsor('SAL4',r1,aire4)
    call getsor('SAL5',r1,aire5)
    call getsor('SAL6',r1,aire6)
    call getsor('SAL7',r1,aire7)
    call getsor('SAL8',r1,aire8)
    call getsor('SAL9',r1,aire9)
    call getsor('SAL10',r1,aire10)
  else
    call getsor('BFCSAL1',r1,aire1)
    call getsor('BFCSAL2',r1,aire2)
    call getsor('BFCSAL3',r1,aire3)
    call getsor('BFCSAL4',r1,aire4)
    call getsor('BFCSAL5',r1,aire5)
    call getsor('BFCSAL6',r1,aire6)
    call getsor('BFCSAL7',r1,aire7)
    call getsor('BFCSAL8',r1,aire8)
    call getsor('BFCSAL9',r1,aire9)
    call getsor('BFCSAL10',r1,aire10)
    call getsor('BFCSAL11',r1,aire11)
    call getsor('BFCSAL12',r1,aire12)
  endif
  gflujo = aire1 + aire2 + aire3 + aire4 + aire5 + aire6 + aire7 + aire8 +
&      aire9 + aire10 + aire11 + aire12

```

```

write(14,*) 'FLUJO total de aire ',gfluj0
else if(isweep.eq.lswEEP) then
  if (.not.bfc) then
    call getsor('SAL1',r1,aire1)
    call getsor('SAL2',r1,aire2)
    call getsor('SAL3',r1,aire3)
    call getsor('SAL4',r1,aire4)
    call getsor('SAL5',r1,aire5)
    call getsor('SAL6',r1,aire6)
    call getsor('SAL7',r1,aire7)
    call getsor('SAL8',r1,aire8)
    call getsor('SAL9',r1,aire9)
    call getsor('SAL10',r1,aire10)
  else
    call getsor('BFCSAL1',r1,aire1)
    call getsor('BFCSAL2',r1,aire2)
    call getsor('BFCSAL3',r1,aire3)
    call getsor('BFCSAL4',r1,aire4)
    call getsor('BFCSAL5',r1,aire5)
    call getsor('BFCSAL6',r1,aire6)
    call getsor('BFCSAL7',r1,aire7)
    call getsor('BFCSAL8',r1,aire8)
    call getsor('BFCSAL9',r1,aire9)
    call getsor('BFCSAL10',r1,aire10)
    call getsor('BFCSAL11',r1,aire11)
    call getsor('BFCSAL12',r1,aire12)
  endif
  gfluj1 = aire1 + aire2 + aire3 + aire4 + aire5 + aire6 + aire7 + aire8 +
&      aire9 + aire10 + aire11 + aire12
  write(14,*) 'FLUJO FINAL de aire ',gfluj1
endif
RETURN

```

## APÉNDICE D.

```

1 KEY OFF
2 CLS
3 PRINT "ESTE PROGRAMA CALCULA EL ESPESOR DEL FLUJO DE AGUA"
4 PRINT "DEL VERTEDOR DE LA PRESA DE HUITES, POR MEDIO DEL "
22 PRINT " "EN CUANTOS SEGMENTOS QUIERES DIVIDIR EL VERTEDOR?"
23 INPUT "SE RECOMIENDA DE 20 A 100";F
24 G=1.1578514#/F
25 L=.8961-G
26 GOTO 1005
27 REM **G la totalidad de la cubeta entre la cantidad de segmentos en que
iere dividir**
28 REM **el es grado inicial donde comienza la cubeta circular, menos g**
1000 REM***CALCULO DE LA ECUACION PARA VISUALIZACION EN PANTALLA*****
1001 REM ** H0-tirante inicial, Dy-diferencia de longitud del vertedor**
1002 REM **dteteta diferencia de angulo, t-angulo inicial**
1005 CLS
1007 DIM GL(2)
1008 DIM DT(2)
1009 PRINT "TETA          H          V          Fr"
1011 H0=.279
1012 T=.8961
1013 DY=G*8.38638
1014 GL(1)=.279
1015 FOR T=L TO -.264 STEP -G
1017 DT(2)=T
1018 DTETA=-G
1020 O=((COS (T)/DY) - (SIN(T)*(DTETA/DY)))
1030 P=(H0*(COS(T))/DY+SIN(T))
1031 REM ** valores de las constantes A y b para los diferentes gastos**
1032 REM*6000-2998,2220-410.5,9500-7518.8*
1034 REM*6000-374.7,2220-51.32,9500-939.7*
1040 Q=1.09*(.3223/DY)
1050 R=(H0*1.09*(.3223/DY)+.04043*.015)
1060 GOSUB 1200
1061 V=1.78137/(H)
1062 J=V/(SQR(9.8*H))
1063 REM **en la subrutina se calcula h y en 1061 y 1062 se calcula v(v) y
**
1065 PRINT TAB(1)'T;TAB(15)H;TAB(27)V;TAB(38)J
1070 H0=H
1075 DT(1)=DT(2)
1080 NEXT T
1085 PRINT "CALCULOS TERMINADOS"
1090 GOTO 2500
1190 REM***SUBROUTINA GAUS-JORDAN SOLUCION DE LA ECUACION PRINCIPAL***
1200 FOR X=1 TO 10
1205 H=GL(1)
1206 REM ***f funcion, df derivada de la funcion***
1210 F=O*H^4-P*H^3-Q*H+R
1220 DF=4*O*H^3-3*P*H^2-Q
1230 H=GL(1)
1250 GL(2)=H-F/DF
1260 IF GL(1)-GL(2)<.001 AND GL(1)-GL(2)>.001 GOTO 1300
1270 GL(1)=GL(2)
1280 NEXT X
1300 H=GL(1)
1310 RETURN
1320 END
1500 END
1 KEY OFF

```