

INVENTARIADO

POR: 20-11-2015



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica**



"OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO  
ENERGIA EOLICA"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:  
INGENIERO MECANICO

Presentada por:  
JULIO CORDOBA G.



BIBLIOTECA

Guayaquil - Ecuador

1.988

## A G R A D E C I M I E N T O

A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA  
DEL LITORAL

Al Ing. MARCO PAZMIÑO B. Director  
de Tesis por su ayuda y colabora-  
ción para la realización de este  
trabajo.

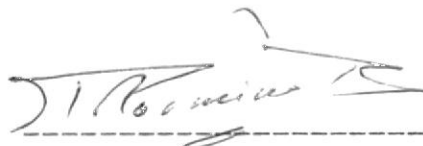
Al (VIS) CONSORCIO DE VIVIENDAS  
DE INTERES SOCIAL por su patroci-  
nio para la realización de la  
misma.

A todas las personas que de una  
forma u otra colaboraron en el  
desarrollo de esta tesis.

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS



---

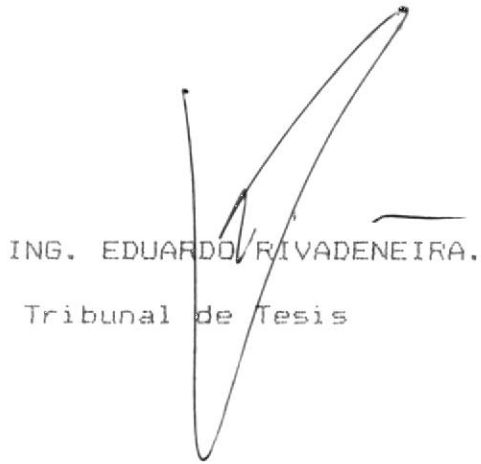
ING. MARCO PAZMIÑO B.  
Director de Tesis



ING. NELSON CEVALLOS.  
Decano de la F.I.M



ING. MARCO PAZMINO.  
Director de Tesis



ING. EDUARDO RIVADENEIRA.  
Tribunal de Tesis



ING. FRANCISCO ANDRADE.  
Tribunal de Tesis



## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL).



BIBLIOTECA

-----  
JULIO CORDOBA GUERRERO.

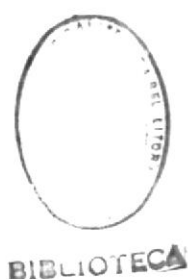
## R E S U M E N

La presente investigación está encaminada a la solución de una parte de los problemas de suministro de oxígeno que se presentan tanto en la cría de peces y crustáceos como en las lagunas de tratamiento de aguas servidas, utilizando la energía eólica de ( viento ) para mover un aerador superficial, el cual incrementa los niveles de oxígeno en las zonas tratadas. Sustituyendo de esta manera los excesivos costos de combustibles y electricidad para bombeo, necesario para la renovación de estas aguas y bajar potencialmente el tiempo de retención de las aguas servidas y de esta forma convertirlas en menos polucionadas ( contaminadas ).

Con el financiamiento del ( VIS ) Consorcio de viviendas de interés social, se construyó una pileta de pruebas en el centro de las lagunas de oxidación de la Alborada, para el tratamiento de las aguas servidas, en la cual se probó el prototipo de mejores resultados sin carga. Se construyeron dos tipos de aeradores aplicando diferentes criterios, los cuales se probaron previamente sin carga, se trabajo con el que dió los mejores re-

sultados, el cual fué el aerador de eje horizontal de tipo multipala, siendo realizado esto en los talleres de la ESPDL.

Se comprobó la eficiencia del aerador midiendo en el agua de la cisterna el contenido de oxígeno disuelto a diferentes horas del día, a intervalos iguales de tiempo, con un equipo medidor de oxígeno disuelto, que utiliza el método volumétrico de Winkler, tomándose lecturas de temperaturas del agua para poder relacionar estas con el oxígeno disuelto (OD).



## INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN .....	7
INDICE GENERAL .....	9
INDICE DE FIGURAS .....	14
INDICE DE TABLAS .....	17
INTRODUCCION .....	18
I. PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA Y NECESIDAD DE OXIGENACION .....	
1.1. Fuentes de suministro .....	20
1.2. Propiedades consideradas .....	21
1.3. Difusión molecular de disolución de sustancia .....	24
1.4. Absorción de luz y calor .....	26
1.5. Necesidades y perturbaciones provocadas por un oxígeno insuficiente .....	29
II. OXIGENO .....	
2.1. Fuentes de oxígeno .....	34
2.2. Contenido de oxígeno en el agua dulce ...	35
2.3. Variación de la solubilidad del oxígeno en el agua, con respecto a los paráme- tros; presión, temperatura y salinidad ..	38
2.4. Saturación de oxígeno en el agua .....	42
2.5. Demanda química de oxígeno - Demanda	

bioquímica de oxígeno .....	43
III. AERACION ( OXIGENACION ) .....	
3.1. Definición y objetivo .....	47
3.2. Ley de aeración por Adeney y Becker .....	49
3.3. Teoría de traspaso de gases a través de dos películas .....	56
3.4. Efectos de agitación .....	62
IV. AERADORES .....	
4.1. Factores que afectan el diseño de aeradores .....	65
4.2. Métodos de aeración .....	67
4.2.1. Aeración natural .....	67
4.2.2. Aeración artificial .....	69
V. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL AERADOR .....	
5.1. Conceptos básicos de la utilización del viento .....	80
5.2. Energía suministrada por el viento .....	89
5.3. Acción del viento sobre las palas .....	97
5.4. Diseño y construcción del prototipo .....	118
5.5. Pruebas experimentales de campo y pruebas de laboratorio .....	125
5.6. Analisis de los resultados .....	129
VI. ANALISIS ECONOMICO .....	139

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	144
APENDICE .....	149
BIBLIOGRAFIA .....	165



INDICE DE ABREVIATURAS BIBLIOTECA

$H_2S$	Acido sulfhídrico
$CO_2$	Anhidrido carbónico
$\theta$	Angulo que forma la velocidad relativa con el plano de giro del rotor
$\alpha_0$	Angulo de ataque
$\beta$	Angulo entre la cuerda y el plano de rotación
A	Area
dQ	Cantidad de calor transferido
cm/hora	Centímetros por hora
cm/min	Centímetros por minuto
$\alpha$	Coefficiente de absorción de Bunsen
Cl	Coefficiente de sustentación
Cd	Coefficiente de resistencia
C	Concentración de gas en la atmósfera
Cs	Concentración de saturación de sustancia disuelta
C <sub>0</sub>	Concentración al tiempo 0
C <sub>t</sub>	Concentración al tiempo t
C <sub>1</sub>	Concentración de gas en la masa del liquido
C <sub>s</sub>	Concentración del gas en la superficie de contacto o interfase
K <sub>d0</sub>	Coefficiente de difusión del gas en la fase gaseosa
K <sub>d1</sub>	Coefficiente de difusión del gas en la fase líquida
K	Constante de aeración
f	Coefficiente de traspaso o difusión del gas
D	Déficit de saturación
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
$\rho$	Densidad
$\sigma$	Exponente que caracteriza al terreno, para la variación de la velocidad de viento con la altitud
K <sub>t</sub>	Factor de proporcionalidad o conductividad térmica
K <sub>d</sub>	Factor de proporcionalidad o coeficiente de difusión molecular
L	Fuerza de sustentación
D	Fuerza de resistencia
PH	Grado de acidez o alcalinidad
Log	Logaritmo natural
log	Logaritmo base 10

B	Número de álabes
M	Número de moles
m/seg	Metros por segundos
Hg	Mercurio
mg/l	Miligramos por litro
OD	Oxígeno disuelto
Q	Par
W	Peso del gas disuelto en el líquido saturado con el gas
w	Peso del gas disuelto en el líquido al tiempo t
$\gamma$	Peso específico
P	Potencia
p	Presión
$p_w$	Presión de vapor
$p_g$	Presión parcial del gas en la masa gaseosa
$p_i$	Presión parcial del gas en la superficie de contacto o interfase
R	Radio del rotor
$\lambda_r$	Relación de velocidades local
$\lambda_o$	Relación de velocidades en el extremo del álabes
t	Tiempo
U	Velocidad de la punta
dw/dt	Velocidad de difusión
v	Velocidad del viento
"w"	Velocidad relativa
$\Omega$	Velocidad angular
V	Volumen
$\mu$	Viscosidad absoluta o dinámica
$\tau$	Viscosidad cinemática
n	Vueltas por segundo
Tf	Temperatura en grados farenheit
Tc	Temperatura en grados centígrados

## INDICE DE FIGURAS

Nº	<u>Pag.</u>
2.1	Fluctuaciones típicas de $\bar{O}_2$ en un estanque con elevadas cantidades de fotosíntesis y respiración .....
2.2	Ejemplo de variaciones diarias de temperatura y oxígeno disuelto .....
2.3	Perfiles típicos de oxígeno disuelto en agua al principio (---) y al final (—) del día en un estanque sin agitación .....
2.4	Variación de la solubilidad del agua con la salinidad .....
2.5	Concentración de saturación de oxígeno en agua a diferentes temperaturas y grados de salinidad .....
2.6	Variaciones del DBO promedio durante el día en una laguna de oxidación .....
3.1	Curva de aeración .....
3.2	Curva de aeración .....
3.3	Intercambio de gases a través de dos películas estacionarias .....
3.4	Influencia de la agitación en la difusión del oxígeno en el agua .....
4.1	Dirección y velocidad horizontal relativa de las corrientes que produce el viento en lago o almacenamiento (idealizado) .....



BIBLIOTECA

4.2	Aeradores de gravedad .....
4.3	Aerador por aspersión y boquillas .....
4.4	Aerador de difusión simple .....
4.5	Esquema de un soplante para aeración .....
4.6	Aerador tipo Venturi .....
4.7	Aerador de superficie tipo spray .....
4.8	Esquema de un aerador flotante .....
4.9	Esquema de un aerador de fondo para estanque .....
5.1	Fenómeno diario cerca de la costa .....
5.2	Gráfica de las variaciones de la velocidad del viento en función de la altitud .....
5.3	Anemómetro de cazoletas .....
5.4	Clasificación de los artefactos eólicos ...
5.5	Límites de Betz para diferentes diámetros de rotor .....
5.6	Definición de la relación de velocidades ...
5.7	$C_Q$ - característicos de molinos de eje horizontal .....
5.8	$C_p$ - característicos de molinos de eje horizontal .....
5.9	Acción del viento sobre una placa plana ....
5.10	Descomposición de la fuerza resultante .....
5.11	Diversos tipos de perfiles de álabes .....
5.12	Fuerzas de sustentación y resistencia sobre un álabes aerodinámico .....
5.13	Cuerda del perfil y ángulo de ataque .....

5.14	Velocidad relativa en un álabe .....
5.15	Velocidad relativa en el álabe de un rotor ..
5.16	Componentes de sustentación y resistencia según el plano de rotación .....
5.17	Torque característico de un molino de viento de baja velocidad .....
5.18	Torque característico de un molino de viento de alta velocidad .....
5.19	Potencia característica de un molino de viento de baja velocidad .....
5.20	Potencia característica de un molino de viento de alta velocidad .....
5.21	Descomposición de la resultante de las fuerzas aerodinámicas en un punto de la pala .....
5.22	Posición del álabe .....
5.23	Construcción del aerador .....
5.24	Montaje del aerador en la piscina de la ESPOL .....
5.25	Pruebas de: orientación y variaciones de las longitudes sumergidas (ESPOL) .....
5.26	Llenado de cisterna (Sauces) .....
5.27	Pruebas del aerador en los Sauces .....
5.28	Paleta sumergida. Agitación del agua (Sauces) .....



BIBLIOTECA

## INDICE DE TABLAS

Nº	<u>Pag.</u>
1.	Coeficiente $\alpha$ a diversas temperaturas en agua pura .....
2.	Saturación de oxígeno a diversas tempera- turas en agua pura .....
3.	Coeficientes de transmisión y espesores de película para gases de baja solubilidad en agua .....
4.	Variación de la solubilidad de oxígeno con la velocidad de agitación .....
5.	Variación del coeficiente $\sigma$ con respecto a la naturaleza del terreno .....
6.	Características de diseño de diversos tipos de álabes .....
7.	Selección del número de álabes de un molino de eje horizontal .....
8.	Secciones transversales del álabes de un molli- no .....
9.	Resultados experimentales .....
10.	Resultados experimentales .....
11.	Resultados experimentales .....
12.	Resultados experimentales .....
13.	Resultados experimentales .....
14.	Resultados experimentales .....

## I N T R O D U C C I O N

En los medios terrestres el oxígeno es abundante, pero en el agua puede llegar a ser un factor limitante, dependiendo de la temperatura, el consumo de oxígeno por parte de los organismos acuáticos y a la producción del mismo por las plantas.

Es función de la ingeniería brindar soluciones a los problemas que nos rodean, aplicando: la observación, el sentido común, la inventiva y en nuestro caso la mecánica, para la solución de estos. De la forma más sencilla y económica posible.

Procurando en estos tiempos de crisis energética recurrir a fuentes renovables de energía como son la solar y la eólica. Fuentes como la eólica que ha sido utilizada desde muchísimo tiempo atrás y que ha dado muy buenos resultados para la propulsión de las embarcaciones y posteriormente en los molinos de viento para la extracción de agua, en la molienda de granos y en muchas otras aplicaciones, teniendo en cuenta que la energía desarrollada por el viento es muy considerable.

Se vió la posibilidad de sustituir los medios convencionales de energía para la producción de oxígeno por medio de la energía de viento o eólica. Se investigó cual era el medio de aeración más eficiente y se llegó a la conclusión que era la aeración superficial, es decir agitación del agua en sus capas superiores, lo cual disminuye el espesor de película entre el aire y el agua. Siendo esto notado en los ríos naturales, el movimiento ó la turbulencia de estos causa el continuo cambio de la superficie del líquido aumentando la transferencia de oxígeno, las cascadas son efectivos aeradores naturales.

Se buscó la fuente de financiamiento del proyecto, así como el sitio adecuado para la realización de la investigación. Se diseñó y construyó un aerador superficial multipala, al cual se le realizaron algunas pruebas sin carga y con carga en la piscina de la ESPOL, como se obtuvieran buenos resultados, se lo probó en una cisterna de aguas servidas en los Sauces, la cual fué, adecuada por el patrocinador (VIS).

En está se realizaron pruebas de oxígeno disuelto del agua de la cisterna, a diferentes horas y con diferentes criterios, para poder así sacar la mayor cantidad de conclusiones posibles.



BIBLIOTECA

## CAPITULO I

### PROPIEDADES FISICAS DEL AGUA Y NECESIDAD DE OXIGENACION

#### 1.1. FUENTES DE SUMINISTRO

El agua juega un papel primordial en el desarrollo de los seres vivientes sobre la tierra, pudiéndose decir que es la base de la vida.

En efecto, la mayor parte del organismo humano está formado por agua y constituye el primero de sus alimentos después del aire. Es imprescindible para la higiene tanto del individuo como de su habitat, siendo fundamental, para el desarrollo de muchas actividades del hombre. Para la mayoría de las actividades, es primordial controlar la calidad de la misma, siendo uno de los parámetros más importantes el contenido de oxígeno.

Las reservas de agua en el globo terrestre son inmensas y conforman aproximadamente  $1460 \times 10^6 \text{ Km}^3$ . Sin embargo de ellas, en los océanos y mares se encuentran 93.8%, cerca de 4.1% son subterráneas, principalmente salinas y solamente cerca de 2.08%

conforman las aguas dulces.

En los medios terrestres el oxígeno es abundante, pero en el agua puede ser un factor limitante, dependiendo de la temperatura, el consumo de oxígeno por parte de los organismos acuáticos y la producción del mismo por las plantas. En los estanques depende así mismo de la renovación que se produce en el agua por medios artificiales, aeradores, etc.

## 1.2. PROPIEDADES CONSIDERADAS

Entre las propiedades físicas del agua de mayor importancia en el aspecto del control hidráulico y de la calidad, están: la densidad, la viscosidad, presión de vapor, tensión superficial, resistencia a la difusión, absorción de la luz, capacidad calorífica, y la absorción del calor.

Casi todas las propiedades físicas del agua, así como sus propiedades químicas y biológicas dependen de la temperatura.

### Densidad y Viscosidad

Se encuentran entre las propiedades más importantes del agua, especialmente del agua con movimiento laminar, son parte integral del número de Reynolds. Las variaciones de densidad en las masas

profundas de agua dan por resultado la estratificación e inversión temporal de lagos y depósitos con las amplias variaciones de la calidad de agua. También la densidad es un elemento importante en la formación de cortos circuitos en masas de agua.

La densidad se expresa en tres formas distintas: 1) como masa, densidad  $\rho$  ó masa por unidad de volumen, 2) como peso específico  $\gamma$  ó peso por unidad de volumen y 3) como peso específico relativo  $S = \rho / \rho_0 = \gamma / \gamma_0$  (adimensional) el subíndice 0 denota aquí la densidad a una temperatura estándar o de referencia.

La presión tiene un efecto pequeño sobre la densidad del agua. La densidad del agua de mar es una función de su salinidad, la cual varía considerablemente según los diferentes océanos, mares y lagos salados.

La viscosidad es una resistencia a la deformación. La viscosidad del agua se expresa en una de las dos siguientes formas: 1) como viscosidad absoluta o dinámica  $\mu$  ó masa por unidad de longitud y tiempo, 2) como viscosidad cinemática  $\nu = \mu / \rho$ , ó longitud elevada al cuadrado por unidad de tiempo.

Se sabe que la viscosidad varía con la temperatu-

ra de hecho más que la densidad, de acuerdo a la aproximación de Hazen dentro del rango de temperaturas de 32° a 80° F ( 0° a 26.7° C ) Ref(8).

$$\mu_{T_f}/\mu_{50} = \tau_{T_f}/\tau_{50} = 60/(T_f + 10) \quad (1.1)$$

Aquí  $T_f$  es la temperatura en grados Fahrenheit, los subíndices de  $\mu$  y  $\tau$  denotan la viscosidades a las temperaturas de  $T_f$  y 50° F ( 10°C ) respectivamente.

#### Presión de vapor y Tensión superficial

Tanto la presión de vapor como la tensión superficial, se manifiestan principalmente en las interfases aire agua.

La presión de vapor es un factor de control de la evaporación, sea desde una superficie libre de agua o desde los lodos de aguas negra. El aire o gas en contacto inmediato con el agua se satura rápidamente con vapor de agua. Entonces las moléculas de vapor se condensan en las superficies de agua tan rápidamente como se evaporan; y el vapor alcanza equilibrio con el agua.

La presión ejercida por el vapor de agua se conoce como su presión parcial y es igual a su volumen relativo en la atmósfera.

La tensión superficial controla la elevación capilar del agua, es un enlace importante en el intercambio de sustancias que van hacia dentro y hacia fuera del agua, fija su habilidad humectante, son depresores de la tensión superficial el jabón y los detergentes. Las cantidades pequeñas de soluto con tensión superficial baja se concentrarán en la película superficial del líquido y disminuirán apreciablemente la tensión superficial.

Presión de vapor. Por lo general, la presión de vapor de agua  $P_w$  se expresa en los mismos términos que la presión barométrica ( mm Hg a  $0^\circ$  C ) para convertir a atmósferas se multiplica por  $1.316 \times 10^{-3}$ .

Tensión superficial. La tensión interfacial entre un líquido y un gas es en esencia, una propiedad del líquido únicamente. Sus dimensiones son energía por unidad de área o fuerza por unidad de longitud. La tensión superficial del agua pura contra el aire es relativamente grande.

### 1.3. DIFUSION MOLECULAR DE DISOLUCION DE SUSTANCIAS

Aún sin el mezclado mecánico, la concentración de las sustancias que se encuentran en solución real dentro del agua, tanto moléculas como iones finalmente llegarán a ser uniforme. Sin embargo este

proceso de igualación es extremadamente lento.

#### Ley de Fick

Análoga a la ley de conducción de calor establece que la velocidad de difusión  $dw/dt$  a través de una área límite  $d_y, d_z$  es proporcional al gradiente de la concentración  $dC/d_x$  de la sustancia, desde un punto de concentración más alto a otro de concentración menor Ref (8).

$$\frac{dw}{dt} = -k_d \left( \frac{dC}{d_x} \right) d_y d_z \quad (1.2)$$

Aquí  $w$  es el peso de la sustancia disuelta,  $t$  el tiempo,  $C$  la concentración,  $x$  en la dirección  $x$ ,  $d_y, d_z$  el área a través de la cual deben pasar las moléculas y  $k_d$  un factor de proporcionalidad o coeficiente de difusión molecular. La magnitud de  $k_d$  disminuye conforme aumenta el peso molecular y los cambios de temperatura. Además para los gases  $k_d$  varía conforme a la raíz cuadrada de la densidad. Debido a que el gradiente de concentración disminuye conforme tiene lugar la difusión, la ecuación de Fick se escribe como una ecuación diferencial parcial. La solución de esta ecuación se encuentra por medio de una serie de Fourier como la de Black y Phelps.

$$C_t = C_s - 0.811 ( C_s - C_0 ) [ \exp(-K_d) + \quad (1.3) \\ + 1/9 \exp(-9K_d) + 1/25 \exp(-25)K_d ]$$

Aquí  $C_s$  es la concentración de saturación de sustancia disuelta,  $C_0$  y  $C_t$  son sus concentraciones en tiempo cero y en tiempo  $t$  respectivamente y;  $K_d = \pi^2 * k_d * t / 4 x^2$ .

Para el oxígeno disuelto en agua, el coeficiente es de  $9.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$  por hora a  $25^\circ\text{C}$  y cambia con apego a las siguientes fórmulas, dentro de las temperaturas normales del agua.

$$k_d = ( 8.7 * 10^{-2} ) * 1.0162^{(T_c - 20)} \quad (1.4) \\ 8.7 * 10^{-2} \exp [ 0.159 ( T_c - 20 ) ] \text{cm}^2/\text{hr}$$

#### 1.4. ABSORCION DE LUZ Y CALOR

La absorción de energía solar por el agua es importante debido a tres factores: 1) los organismos clorofilácticos, utilizan la energía radiante y aumentan la cantidad de sustancias celulares ( fotosíntesis ), 2) las bacterias y otros organismos vivientes son destruidos; 3) la energía absorbida se convierte en calor.

No toda la energía solar dirigida hacia una masa de agua penetra la superficie de esta. Alguna es reflejada aumentando su cantidad a medida que el ángulo de incidencia se hace más agudo. De acuerdo

con eso el período de luz diurna es más corto en el agua que en la atmósfera. La reflexión aumenta cuando el viento ondula la superficie del agua.

La absorción de la radiación solar es selectiva, dependiendo de la longitud de onda. La distribución espectral de la energía solar cambia conforme aumenta la profundidad.

#### Absorción y transferencia de calor

La mayor parte de la energía solar absorbida por una masa natural de agua se convierte en calor, si los rayos solares fueran monocromáticos, el calentamiento tuviera lugar sólo por radiación, y se mantuviera constante la capacidad de absorción, la temperatura del agua disminuirá logarítmicamente desde la superficie hacia el fondo. Sin embargo la absorción selectiva acentúa el gradiente dentro de las capas superiores. La conducción y convección producen cambios aún más radicales. La energía radiante absorbida por el fondo, se desprende en ondas de mayor longitud que son atrapadas por el agua situada a nivel más alto. Los sedimentos del fondo se encuentran más fríos que el agua sobrenadante, durante el verano, y más caliente que ella en el invierno; la diferencia de temperatura es mayor conforme más profundo sea el depósito.

Tanto el aire como el agua son conductores pobres de calor. En ausencia de movimiento de las masas y después de alcanzar un estado estable. La transferencia de calor por conducción se define mediante las siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = - Kt * A ( dT/dl ) \quad (1.5)$$

En donde  $dQ$  es la cantidad de calor transferido en el tiempo  $dt$ ,  $A$  el Area a través de la cual fluye el calor,  $dT$  el cambio de temperatura en la distancia  $dl$  y  $Kt$  es el factor de proporcionalidad, o la conductividad térmica .

Debido a que el calor específico del agua es aproximadamente 4 veces mayor que el del aire y a que la masa del agua es también relativamente mucho mayor, la temperatura en la interfaz sería la correspondiente al agua. De los dos, el movimiento del aire es normalmente más vigoroso, y el calor se distribuye a través de la masa de agua, tanto horizontal como verticalmente, por acción del viento.

El equilibrio se rompe también por los cambios de temperatura originados mediante la transferencia de calor de un fluido a otro, incluyendo los cambios en temperatura producidos por la evaporación.

Si la superficie del agua se enfría, ya sea por contacto con el aire frío o por evaporación se hace más denso y se hunde. Se ponen en movimiento corrientes verticales ( de convección ), y se transfiere calor dentro de la misma masa del agua.

#### **1.5. NECESIDADES Y PERTURBACIONES PROVOCADAS POR UN CONTENIDO INSUFICIENTE DE OXIGENO**

Se llama insuficiencia de oxígeno o déficit de oxígeno de un agua, al peso del mismo necesario para alcanzar la saturación a la temperatura considerada, se expresa en mg/litro.

El nivel del oxígeno disuelto OD presentado en el desarrollo de la acuicultura, está mezclado entre los más importantes factores de la calidad del agua. Si un nivel suficiente de oxígeno no es mantenido, animales son sometidos a esfuerzos, se convierten en vulnerables a las enfermedades y brotes parasitarios, ó mueren. Los animales pueden rehusar la comida por períodos, durante y después de una disminución de oxígeno. Así de este modo la eficiencia en la conversión de comida sufriría, y la comida sería desechada.

Hay déficit cuando la cantidad de oxígeno presente en un cierto momento es inferior al que las condiciones del medio ( temperatura y presión ) permi-

ten definir teóricamente.

La presencia de peces en la superficie de la laguna es una indicación frecuente de niveles bajos de OD.

Casi todos los organismos acuáticos a excepción de algunas bacterias necesitan tener oxígeno para sobrevivir. La mayoría de estos organismos necesitan extraer su oxígeno desde el agua líquida. Así la extracción del oxígeno desde el agua y la adición de este gas al agua son operaciones de importancia crítica en organismos acuáticos, particularmente cuando el sistema es portador de una carga biológica.

Las concentraciones límites de OD que pueden soportar los peces, es dependiente de su formación genética, temperatura del agua, nivel de actividad, esfuerzo experimentado. Generalmente el agua con concentración de oxígeno menor de 3 ppm no puede ser soportado por los peces, aunque si bien crustáceos y otros organismos pueden tolerar esos niveles por períodos limitados de tiempo. Concentraciones de 3 a 5 ppm pueden permitir sobrevivir indefinidamente algunas especies y pueden ser soportados por especies en períodos cortos. Sobre los 5 ppm todos los organismos acuáticos pueden sobrevivir indefinidamente. Los especímenes jóve-

nes son menos tolerante de niveles bajos de oxígeno.

El nivel de actividad también influye en el consumo de oxígeno, el rango del consumo de oxígeno es función de la concentración. Cuando la concentración de oxígeno desciende por debajo de un nivel dado, el consumo de oxígeno se limita y el metabolismo se reduce a niveles de mero mantenimiento del organismo, suprimiendo toda actividad exterior. Un síntoma claro de la falta de oxígeno en los estanques es que los animales tienden a saltar fuera de la superficie como es el caso de los crustáceos ó a permanecer con la boca abierta cerca de la superficie en el caso de los peces, y permanecer agrupados cerca de la entrada de agua fresca. Los peces muertos por asfixia tienen los opérculos levantados y las branquias muy abiertas.

Cuando un nivel sobre el 110% de saturación de gas se presenta, puede ocurrir en los peces la enfermedad de la burbuja que produce problemas en la circulación sanguínea y puede causar muertes masivas en corto intervalo de tiempo, los signos de la enfermedad pueden variar puesto que la embolia de gases puede extenderse hacia el cerebro o al corazón, el pez puede morir repentinamente con ningún otro signo, burbujas justamente debajo de la piel

pueden ser vistas.

Una condición de supersaturación puede aparecer debido a fallas en el bombeo, o una producción excesiva de oxígeno fotosintético.

Desde el punto de vista ambiental y de salud pública el oxígeno es necesario para mantener las diferentes formas de vida en una laguna aeróbica, es usado por las bacterias para permanecer vivas, el oxígeno se combina con muchas sustancias para formar óxidos y degradar muchos compuestos orgánicos complejos, haciéndolos más accesibles a las bacterias. Debido a que el oxígeno es usado para oxidar estos compuestos orgánicos, el oxígeno disuelto decrecerá en proporción a la cantidad de sustancias presentes. Esto se conoce como demanda de oxígeno de las aguas servidas.

Si la demanda de oxígeno es mayor que la que se suministra, las bacterias aeróbicas morirían y condiciones anaeróbicas se desarrollarían con los siguientes problemas operacionales; baja concentración de oxígeno disuelto, resulta en efluentes turbios, malos olores y el crecimiento de bacterias del tipo filamentoso, que resulta en un tratamiento menos eficiente. Se deberá mantener un mínimo de 1 mg/l de OD, a través de la laguna en

períodos de máxima carga.

El ensuciamiento de los ríos, no solamente empeora las condiciones sanitarias de los reservorios, sino que fatalmente influye sobre las vidas de los organismos que las habitan especialmente sobre los peces.



BIBLIOTECA

## CAPITULO II

### OXIGENO

#### 2.1. FUENTES DE OXIGENO

Las dos mayores fuentes de oxígeno para el agua son : la fuente biológica, con las plantas en las cuales ocurre la fotosíntesis y la fuente atmosférica, en la difusión del aire con el agua.

La fotosíntesis es una gran fuente de oxígeno en los sistemas acuáticos. El oxígeno es producto de esta, y es adicionado al agua por medio de las plantas fotosintéticas. Sin embargo la producción de oxígeno ocurre solo en presencia de la luz del día.

Las mismas plantas que liberan oxígeno durante el día requieren suministrarse de oxígeno durante los períodos de obscuridad.

La atmósfera contiene cerca del 21% de oxígeno, y la transferencia se produce por medio de la difusión , en particular en las aguas superficiales

que están constantemente en contacto con el aire.

#### Mediciones de oxígeno disuelto.

Se debe comprobar rutinariamente el nivel de OD y asegurarse que disminuciones en el sistema de agua no estén ocurriendo. Las mediciones deberán ser hechas diariamente preferiblemente al amanecer.

La concentración de OD es más comúnmente medida por el método volumétrico de Winkler o con el oxigenómetro, ambos métodos pueden ser utilizados para la determinación de OD dentro de 0.1 mg/l y requieren pequeños tiempos. Aunque si bien es el oxigenómetro el método más rápido, y en la mayoría de los casos provee lecturas adicionales de temperatura, salinidad y PH. Es el más costoso.

El método de Winkler necesita para su realización de reactivos y de cristalería, los cuales se los puede conseguir en Kits de oxigenación, los mismos que son de fácil manejo y su costo es inferior al anterior.

## **2.2. CONTENIDO DE OXIGENO EN EL AGUA DULCE**

El ciclo diario de oxígeno del arroyo es el resultado de fluctuaciones de temperatura y de las relaciones de respiración fotosintética. En ríos con movimiento rápido y una limitada cantidad de vege-

tación, es la turbulencia quién mantiene la cantidad de oxígeno cerca del punto de saturación. Durante el día la producción de oxígeno fotosintético es frecuentemente mayor que la difusión dentro del aire y la demanda de respiración combinada fig (2.1).

La concentración de oxígeno alcanzada en la superficie de los arroyos es controlada principalmente por temperatura y turbulencia. En las profundidades de los ríos y en los arroyos donde el flujo es bajo y ocurre un rico crecimiento de vegetación, el oxígeno contenido es gobernado mayormente por consideraciones de respiración fotosintética. Las máximas concentraciones de oxígeno son encontradas aquí en la tarde y sus valores disminuyen al amanecer, la turbidez y la composición orgánica produce bajas concentraciones de oxígeno, la entrada de contaminantes tiende a bajar el contenido de oxígeno sobre sus puntos de introducción.

La diferencia del contenido de oxígeno en los distintos ríos es debida a que existen en los mismos diferentes grados de contaminación.

Durante la noche el oxígeno acumulado en la superficie se pierde en el aire o se consume por la respiración de los animales y plantas del estanque

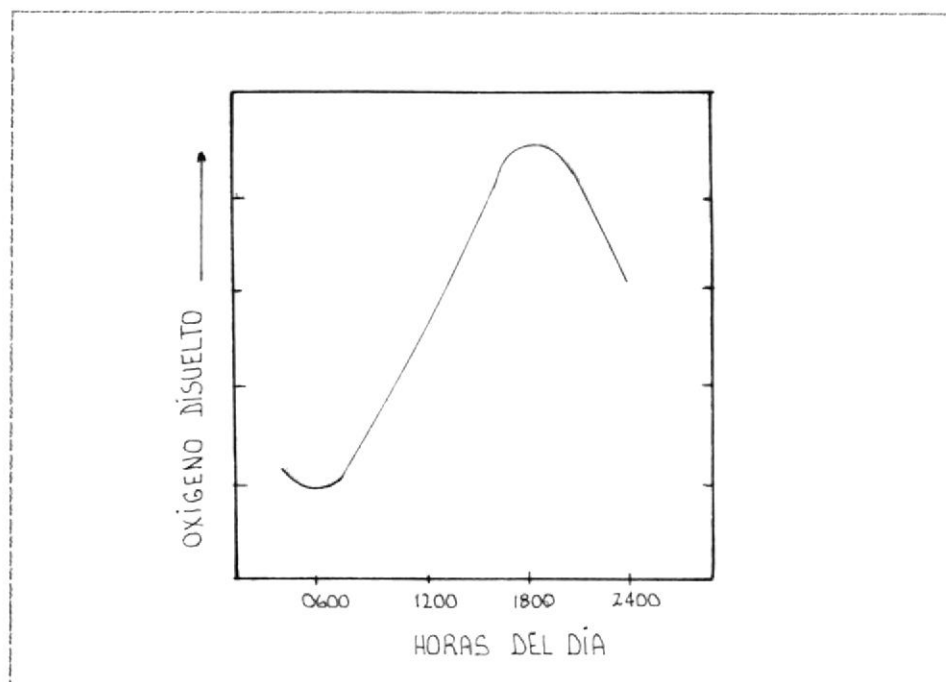


Fig.Nº2.1 FLUCTUACIONES TÍPICAS DE OD EN UN ESTANQUE CON ELEVADAS CANTIDADES DE FOTOSÍNTESIS Y RESPIRACIÓN Ref (ii).

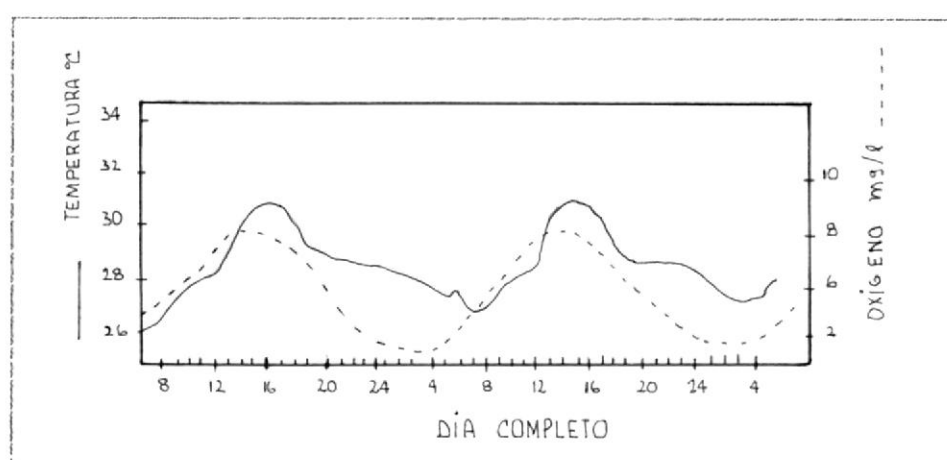


Fig.Nº2.2 EJEMPLO DE VARIACIONES DIARIAS DE TEMPERATURA Y OXIGENO DISUELTO Ref (ii).

o arroyo, las capas más profundas pueden llegar a concentraciones muy bajas de oxígeno, por lo que no es recomendable construir estanques para criaderos de profundidades mayores a los 2 metros, ya que cuando el medio no está iluminado o no existe penetración de luz únicamente se verifica la función respiratoria con la consiguiente absorción de oxígeno fig (2.3).

### 2.3. VARIACION DE LA SOLUBILIDAD DEL OXIGENO EN EL AGUA CON RESPECTO A LOS PARAMETROS :PRESION, TEMPERATURA Y SALINIDAD

La solubilidad de los gases en agua es función de temperatura, presión, coeficiente de solubilidad, salinidad del agua, etc, siendo las tratadas aquí temperatura, presión y salinidad.

Según las leyes de Henry y Dalton : " La solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial e inversamente a la temperatura" y en una mezcla de gases, cada una ejerce una presión específica no influyendo para nada las presiones de los otros gases Ref (19).

Se observa que el agua destilada absorbe más oxígeno que una agua mineralizada y cuanto mayor sea la mineralización menor será la solubilidad fig(2.4). En las aguas negras, la solubilidad del oxígeno es

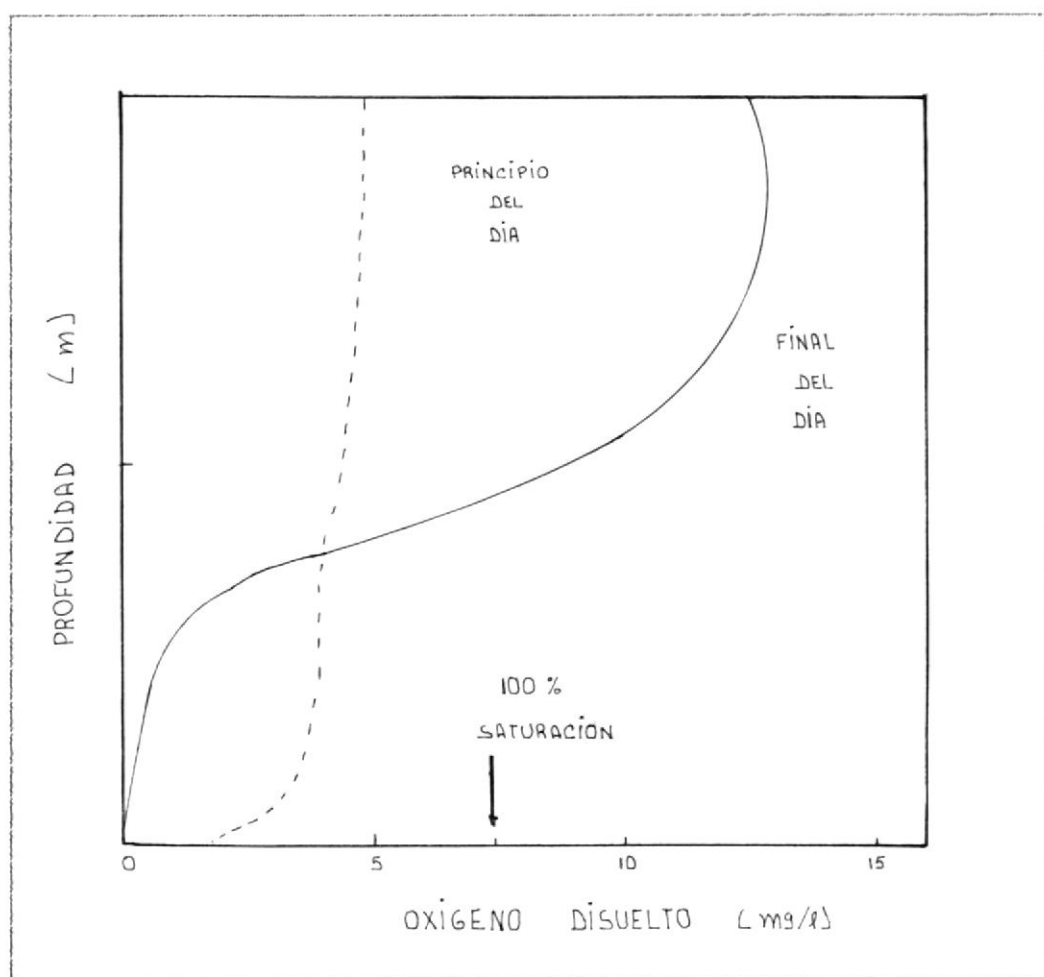


Fig.Nº2.3 PERFILES TÍPICOS DE OXÍGENO DISUELTU EN AGUA AL PRINCIPIO (----) Y AL FINAL (—) DEL DÍA EN UN ESTANQUE SIN AGITACION Ref (11).

TABLA I Ref (3).

COEFICIENTE  $\alpha$  EN 1/1 A DIVERSAS TEMPERATURAS EN AGUA PURA.

T	N <sub>2</sub>	A <sub>r</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>
0	0.02354	0.05780	0.04889	0.02148	0.00967	1.715	4.67	1305
5	0.02086	0.05081	0.04287	0.02044		1.424	3.977	1024
10	0.01861	0.04525	0.03802	0.01955	0.00991	1.194	3.399	915.5
15	0.01685	0.04100	0.03415	0.01883		1.019	2.945	806.7
20	0.01546	0.03791	0.03102	0.01819	0.00994	0.878	2.582	715.4
25	0.01434	0.03442	0.02831	0.01754		0.759	2.282	640.5
30	0.01342	0.03256	0.02608	0.01699	0.01003	0.665	2.037	
35	0.01256	0.03055	0.02440	0.01666		0.592	1.831	
40	0.01184	0.02866	0.02306	0.01644	0.01021	0.530	1.660	
45	0.01130	0.02733	0.02187	0.01624		0.479	1.516	
50	0.01088	0.02569	0.02090	0.01608	0.0107	0.436	1.392	

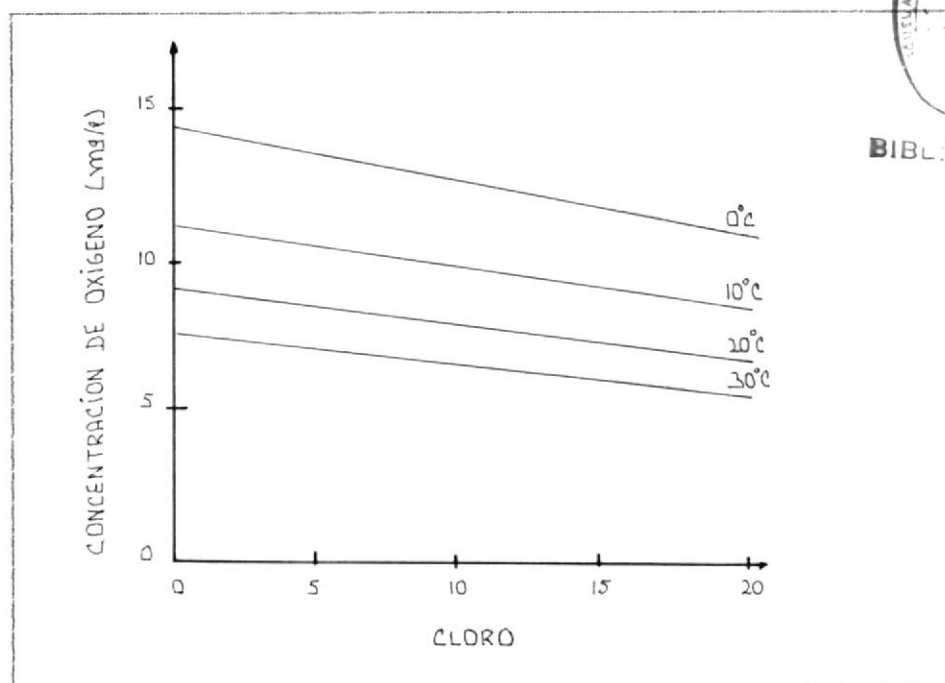


Fig. N.º 2.4 CONCENTRACION DE SATURACION DE OXIGENO EN AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS Y GRADOS DE SALINIDAD Ref (19).



BIBLIOTECA

de aproximadamente el 95% de la solubilidad en el agua dulce.

Obviamente el agua fría puede contener mayor cantidad de oxígeno que el agua tibia o caliente, y las aguas saladas contienen menos oxígeno en su saturación que el agua dulce.

El coeficiente de absorción de Bunsen,  $\alpha$ , es el que expresa cuantitativamente la solubilidad de un gas en un líquido y se define como el volumen de gas, en condiciones normales, que puede disolver un volumen de agua, cuando la presión de este gas es de 760 mm de Hg.

Si queremos este en peso en lugar de volumen, basta tener en cuenta que si  $V$  es el volumen de gas disuelto bajo una presión  $p$  en atmósferas y  $C$  la concentración de este gas en la atmósfera que rodea el agua, tenemos:

$$V = \alpha * C * p \quad (2.1)$$

y el número de moles será:

$$M = \frac{\alpha}{22.4} C * p \quad (2.2)$$

Este coeficiente decrece para temperaturas crecientes o concentraciones crecientes de sales ver

tabla I.

#### 2.4. SATURACION DE OXIGENO EN EL AGUA

La cantidad de oxígeno que puede ser disuelto en el agua bajo condiciones ambientales, es llamada la concentración de saturación. Cuando la cantidad de oxígeno que entra en el agua iguala a la cantidad que abandona el agua se dice que está saturada ver tabla II.

Es mucho más difícil completar la saturación del agua, que aumentar el nivel de 1 a 2 mg/l de contenido de oxígeno.

En los días de verano, la producción de oxígeno fotosintético puede ser suficiente para super saturar la superficie del agua con oxígeno. Cuando esto ocurre el oxígeno es dado a la atmósfera quedando el agua con una saturación permanente mientras se realiza la fotosíntesis.

En contraste con la absorción, la velocidad de desabsorción o desprendimiento de un gas en un líquido, se convierte en proporcional a su grado de saturación en el líquido, o sea al excedente de saturación.

La producción de oxígeno fotosintético se retrasa ligeramente después del ciclo de energía radiante.

Ya que el contenido de oxígeno alcanza su mínimo diario después del amanecer.

A veces se compara el contenido de oxígeno de una agua natural con la que tendría si estuviese saturada, dando lugar a la noción de contenido de saturación. Se halla multiplicando por 100 la concentración de oxígeno encontrado en la muestra y dividiendo para el contenido de oxígeno a saturación a la misma temperatura, tabla II.

## **2.5. DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO - DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO**

La demanda bioquímica es una prueba para medir la potencia contaminante de las aguas servidas.

El DBO5 es una medida de la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos en consumir el material orgánico presente en las aguas servidas, durante un período de cinco días.

Básicamente, el DBO mide indirectamente la carga orgánica de las aguas servidas. Es importante el medir la potencia de las aguas servidas.

Las aguas servidas domésticas normalmente varían entre 150 y 250 mg/litro por día y el tratamiento de las lagunas debe reducir estos niveles a valores o niveles permitidos.

Este análisis mide la demanda de oxígeno disuelto en el cuerpo receptor donde las aguas servidas descargan sin tratamiento o la demanda del afluente tratado. De los resultados de los análisis, la eficiencia del tratamiento utilizado puede ser determinado. Existen métodos para el tratamiento de estas aguas, siendo el más utilizado en nuestro medio el de las lagunas de oxidación fig (2.5).

Demanda química de oxígeno (DQO), llamada también demanda inmediata, es la cantidad de oxígeno consumido por los cuerpos reductores, presentes en el agua, sin intervención de los organismos vivos. Se ideó a fin de solucionar las dificultades, fundamentalmente en lo que se refiere al tiempo.

Esta técnica suele hacerse con Dicromato. Para ella se añade una determinada cantidad de oxidante al agua y se determina el que se ha consumido. La determinación de oxígeno consumido con Permanganato Potásico es otra forma de realizar la prueba de DQO.

Si la demanda de oxígeno es mayor que la que se suministra, las bacterias aeróbicas morirán y condiciones aeróbicas se desarrollarán.



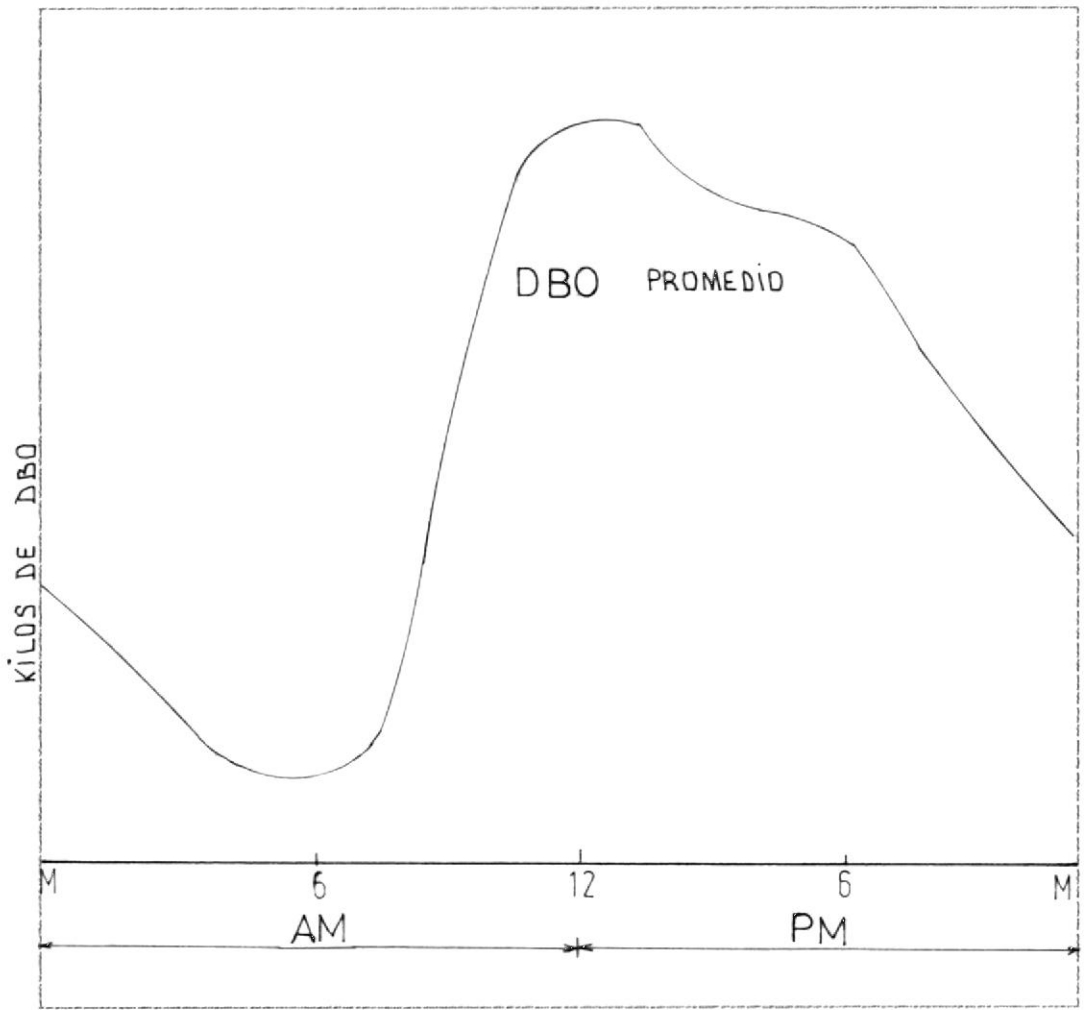


Fig. Nº2.5 VARIACIONES DEL DBO PROMEDIO DURANTE EL DIA EN UNA LAGUNA DE OXIDACION Ref (7).

TABLA II Ref (B).

Para determinar la saturación de oxígeno en el agua.

t °C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	14.16	14.12	14.08	14.04	14.00	13.97	13.93	13.89	13.85	13.81
1	13.77	13.74	13.70	13.66	13.63	13.59	13.55	13.51	13.48	13.44
2	13.40	13.37	13.33	13.30	13.26	13.22	13.19	13.15	13.12	13.08
3	13.05	13.01	12.98	12.94	12.91	12.87	12.84	12.81	12.77	12.74
4	12.70	12.67	12.64	12.60	12.57	12.54	12.51	12.47	12.44	12.41
5	12.37	12.34	12.31	12.28	12.25	12.22	12.18	12.15	12.12	12.09
6	12.06	12.03	12.00	11.97	11.94	11.91	11.88	11.85	11.82	11.79
7	11.76	11.73	11.70	11.67	11.64	11.61	11.58	11.55	11.50	11.50
8	11.47	11.44	11.41	11.38	11.36	11.33	11.30	11.27	11.25	11.22
9	11.19	11.16	11.14	11.11	11.08	11.06	11.03	11.00	10.98	10.95
10	10.92	10.90	10.87	10.85	10.82	10.80	10.77	10.75	10.72	10.70
11	10.67	10.65	10.62	10.60	10.57	10.55	10.53	10.50	10.48	10.45
12	10.43	10.40	10.38	10.36	10.34	10.31	10.29	10.27	10.24	10.22
13	10.20	10.17	10.15	10.13	10.11	10.09	10.06	10.04	10.02	10.00
14	9.98	9.95	9.93	9.91	9.89	9.87	9.85	9.83	9.81	9.78
15	9.76	9.74	9.72	9.70	9.68	9.66	9.64	9.62	9.60	9.58
16	9.56	9.54	9.52	9.50	9.48	9.46	9.45	9.43	9.41	9.39
17	9.37	9.35	9.33	9.31	9.30	9.28	9.26	9.24	9.22	9.20
18	9.18	9.17	9.15	9.13	9.12	9.10	9.08	9.06	9.04	9.03
19	9.01	8.99	8.98	8.96	8.94	8.93	8.91	8.89	8.88	8.86
20	8.84	8.83	8.81	8.79	8.78	8.76	8.75	8.73	8.71	8.70
21	8.68	8.67	8.65	8.64	8.62	8.61	8.59	8.58	8.56	8.55
22	8.53	8.52	8.50	8.49	8.47	8.46	8.44	8.43	8.41	8.40
23	8.38	8.37	8.36	8.34	8.33	8.32	8.30	8.29	8.27	8.26
24	8.25	8.23	8.22	8.21	8.19	8.18	8.17	8.15	8.14	8.13
25	8.11	8.10	8.09	8.07	8.06	8.05	8.04	8.02	8.01	8.00
26	7.99	7.97	7.96	7.95	7.94	7.92	7.91	7.90	7.89	7.88
27	7.86	7.85	7.84	7.83	7.82	7.81	7.79	7.78	7.77	7.76
28	7.75	7.74	7.72	7.71	7.70	7.69	7.68	7.68	7.66	7.65
29	7.64	7.62	7.61	7.60	7.59	7.58	7.57	7.57	7.55	7.54
30	7.53	7.52	7.51	7.50	7.48	7.47	7.46	7.46	7.44	7.43
31	7.42	7.41	7.40	7.39	7.38	7.37	7.36	7.35	7.34	7.33
32	7.32	7.31	7.30	7.29	7.28	7.27	7.26	7.25	7.24	7.23
33	7.22	7.21	7.20	7.20	7.19	7.18	7.17	7.16	7.15	7.14
34	7.13	7.12	7.11	7.10	7.09	7.08	7.07	7.06	7.05	7.05
35	7.04	7.03	7.02	7.01	7.00	6.99	6.98	6.97	6.96	6.95
36	6.94	6.94	6.93	6.92	6.91	6.90	6.89	6.88	6.87	6.86
37	6.86	6.85	6.84	6.83	6.82	6.81	6.80	6.79	6.78	6.77
38	6.76	6.76	6.75	6.74	6.73	6.72	6.71	6.70	6.70	6.69
39	6.68	6.67	6.66	6.65	6.64	6.63	6.63	6.62	6.61	6.60
40	6.59	6.58	6.57	6.56	6.56	6.55	6.54	6.53	6.52	6.51

## CAPITULO III

### AERACION (OXIGENACION )

#### 3.1. DEFINICION Y OBJETIVOS

Es la adición del oxígeno contenido en el aire hacia el agua, esto es un proceso crítico para los criadores de peces sobre todo en sistemas de crecimiento rápido e intensivo, y es un factor importante tanto en el tratamiento de agua (potabilización del agua), como de las aguas residuales. Las lagunas aeradas son empleadas en aquellos casos donde el oxígeno suplementario se necesita introducir debido a las altas cargas orgánicas.

Hay procedimientos para poner en contacto el aire y el agua como son:

- Fraccionando el agua en el seno del aire ( surtidores, pulverizadores, cascadas, producción de olas, gotas, etc).
- Fraccionando el aire en el agua ( difusores).
- Mezclando aire y agua (aspiradores y mezcladores).

Por cualquiera de estos procedimientos se establece un equilibrio físico entre el aire y el agua debido a la difusión de los gases.

La aeración del agua persigue mejorar sus características físicas y químicas a través del intercambio de gases y sustancias volátiles con el aire, sus objetivos son:

- Remoción de olores y sabores que se deben a: algas y otros organismos, a la descomposición de materia orgánica, al ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), el cloro presente en el agua, compuestos de hierro y magnesio que son solubles en el agua, y por acción del oxígeno son oxidados formando productos insolubles que se precipitan.
- Remoción de gases disueltos. Ejemplo: Anhídrido carbónico  $CO_2$ , remoción del gas que se encuentra presente en el agua.
- Cambio del PH por reducción del  $CO_2$ .
- Adición de gases.
- Oxígeno: Mejora el sabor del agua, precipita sales solubles y oxida la materia orgánicas.
- Tratamiento de las aguas servidas. La aeración se emplea en el tratamiento de las aguas servidas para una diversidad de propósitos, para oxidación de materia orgánica.

### 3.2. LEY DE AERACION DE ADENEY Y BECKER

Adeney y Becker estudiaron la reducción de presión experimentada por burbujas de aire que escurrían a través del agua contenida en un dispositivo especial llamado "sliding Bubble Apparatus".

De estos trabajos se concluyó que la tasa con que el agua absorbe un gas, varía proporcionalmente a la diferencia entre la saturación del gas en el líquido y la cantidad de gas disuelto en ese instante Ref (18).

Matemáticamente se expresa:

$$\frac{dw}{dt} = K ( W - w ) \quad (3.1)$$

W = Peso del gas disuelto en el líquido saturado con el gas.

w = Peso del gas disuelto en el líquido al tiempo t.


t = Tiempo de aeración.

K = constante de aeración.

La ecuación anterior en términos de concentración

$C = \frac{w}{V}$ , toma la forma :

$$\frac{dC}{dt} = K ( C_s - C ) \quad (3.2)$$



BIBLIOTECA

$C_s$  = concentración de saturación.

$C$  = concentración en la solución al tiempo  $t$ .

La magnitud de  $K$  aumenta con la temperatura, como también con la agitación, o en otros términos con la tasa de renovación de la interfase entre gas y líquido y el grado de difusión. La mezcla o tasa de renovación de interfase y el grado de difusión son de difícil definición.

Ya que el traspaso del gas se realiza a través de la interfase,  $K$  se hace más específica si el área de esta interfase se identifica con el volumen del líquido. Esto es factible por ejemplo, cuando el agua cae en finas gotas a través del aire o el aire es inyectado en burbujas a través del agua.

El valor de  $K$  depende, por tanto entre otros factores, de la superficie expuesta a aeración y el volumen de agua que ella involucra.

Por consiguiente, esta constante puede sustituirse por la expresión  $f\left(\frac{A}{V}\right)$ , en la cual " $f$ " es el "coeficiente de traspaso o difusión del gas" y corresponde al peso del gas soluto que pasa a través de la unidad de área en la unidad de tiempo bajo una diferencia de concentración y se expresa en cm/seg o cm/hora.

Debe suponerse implícitamente en la determinación de la magnitud  $f$ , que el factor de control es la tasa de traspaso a través de la interfase en lugar de la difusión del gas en el líquido.

Los valores de  $f$  en cm/hora observados por Becker para el oxígeno y el aire fueron:  $32.3 \cdot 1.0182^{t-20}$  y  $32.1 \cdot 1.014^{t-20}$  para temperaturas comprendidas entre  $3.5^\circ\text{C}$  hasta  $35^\circ\text{C}$ . Hay que hacer notar que estos valores son válidos solamente para las condiciones específicas de los experimentos de Becker Ref (18).

Si  $D = C_s - C$ , déficit de saturación al tiempo  $t$ .

$$\frac{dC}{dt} = f \left( \frac{A}{V} \right) (C_s - C) \quad (3.3)$$

#### Forma integrada de la ley de Adeney y Becker

Si en los experimentos efectuados por Adeney y Becker, o en cualquier otro sistema de aeración, se miden las concentraciones de oxígenos:  $C_1$ ;  $C_2$ ,  $C_3$  en función del tiempo, se obtiene la forma integrada de la ley fig (3.1).

Integrando la expresión anterior se encuentra la ecuación.

$$\text{Log} \frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} = K (t_2 - t_1) \quad (3.4)$$

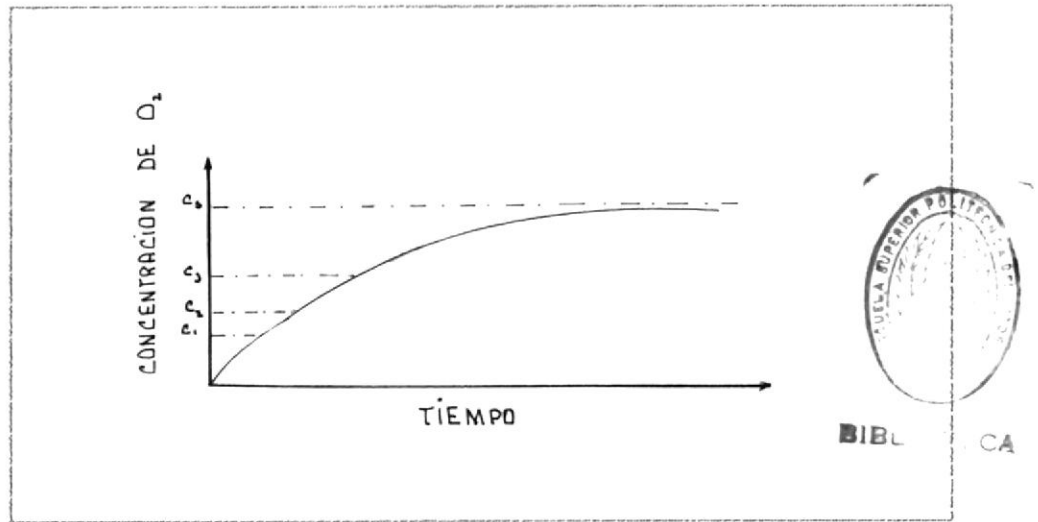


Fig.Nº3.1 CURVA DE AERACION Ref (18).

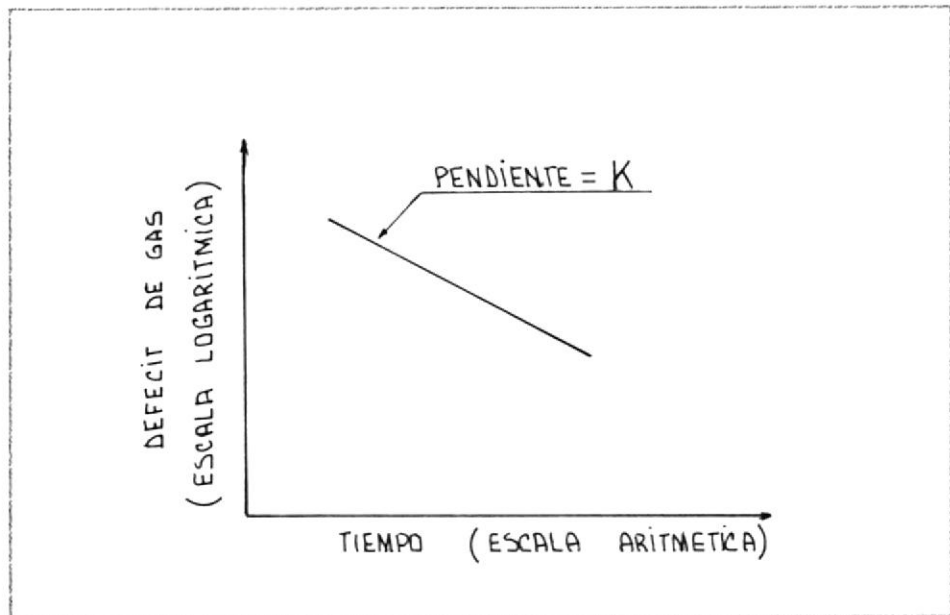


Fig.Nº3.2 CURVA DE AERACION Ref (18).

$$2.3026 \log \frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} = K ( t_2 - t_1 ) \quad (3.5)$$

$C_1$  = concentración al tiempo  $t_1$ .

$C_2$  = concentración al tiempo  $t_2$ .

Si se hace  $D_1 = C_s - C_1$  ;  $D_2 = C_s - C_2$  la ecuación (3.5) se simplifica.

$$\log \frac{D_1}{D_2} = K ( t_2 - t_1 ) \quad (3.6)$$

$$2.3026 \log \frac{D_1}{D_2} = K ( t_2 - t_1 ) \quad (3.7)$$

Para  $t_1 = 0$  y  $t_2 = t$  ; tiempo de aeración.

$$\log \frac{C_s - C_0}{C_s - C_t} = K t \quad (3.8)$$

$$\log \frac{C_s - C_t}{C_s - C_0} = - K t = \log \frac{D}{C_s - C_0} \quad (3.9)$$

La expresión (3.9) dibujada en papel semilogarítmico presenta una línea recta, graficando en las ordenadas el  $\log D - \log ( C_s - C_0 )$  y en abscisa el tiempo.

El valor  $K$  corresponde a la pendiente de la recta fig (3.2).

En caso de sobre saturación de gases en el agua.

$$\text{Log} \frac{C_0 - C_s}{C_t - C_s} = K t \quad \text{ó} \quad \text{Log} \frac{C_t - C_s}{C_0 - C_s} = - K t \quad (3.10)$$

$C_0$  = concentración de sobresaturación al tiempo 0

$C_s$  = concentración de saturación.

$C_t$  = concentración del gas al tiempo t.

#### Análisis de los factores que afectan la constante

- Volumen de agua expuesto a aeración "V". La ley logarítmica anteriormente mencionada supone que la mezcla del gas disuelto en el agua es completa y por lo tanto es uniforme en todo el volumen.

Investigaciones de carácter teórico y experimental demuestran que la aeración es función de la mezcla del agua y del aire, y en caso de ser ella deficiente, el rendimiento disminuye y trae consigo una reducción del valor "f" y por lo tanto de la constante "K". Los valores máximos dados por Adeney corresponden a una mezcla perfecta .

- Superficie de aeración "A".

La superficie de contacto del aire con el agua es realmente difícil de medir debido a las variaciones a que está sometida durante el proceso. En términos generales pueden distinguirse 5 tipos diferentes de superficie de contacto:

- a) Superficie de aguas tranquilas. La superficie de contacto está inmóvil y por lo tanto de dimensiones constantes.
- b) Agua en movimiento con superficie "inmóvil". Esto ocurre cuando la masa de agua, a pesar de estar en movimiento, sólo tiene una suave turbulencia pudiendo considerarse como una superficie inmóvil y comparativamente similar a las aguas tranquilas.
- c) Superficie de "burbujas". La superficie de contacto que origina las burbujas de gas o aire, se considera inmóvil, pero su determinación es difícil.
- d) Superficie de agua "agitada". Se genera por paletas que agitan mecánicamente el agua y por consiguiente es difícil calcular la verdadera área de contacto.
- e) Superficie de agua "discontinua". Este tipo es totalmente indeterminado y se caracteriza por la continua formación de nuevas superficies de contacto, generada por corrientes ascendentes a través del líquido.

Adeney y Becker desarrollaron una expresión para el valor de  $f$  en función de la temperatura y bajo ciertas condiciones Ref (18).

### 3.3. TEORIA DE TRASPASO DE GASES A TRAVES DE DOS PELICULAS

Cuando el aire y el agua entran en contacto, se producen dos capas o películas finísimas, adyacentes a la superficie de contacto. En la película del aire el movimiento por convección es pequeño comparado con el que se realiza en el resto de su masa y en la película de agua, la mezcla por convección es prácticamente nula.

Aceptando la existencia de la teoría de las dos películas estacionarias, en las cuales prácticamente no hay corrientes por convección, cualquier intercambio de oxígeno u otro gas a través de estas capas se efectuará esencialmente por el proceso de difusión fig (3.3).

La tasa de difusión del  $O_2$  a través de la película de aire es proporcional a la diferencia de concentración que existe entre ella y la masa gaseosa. En forma similar, la difusión a través de la película del líquido es función de la cantidad de  $O_2$  disuelto en la película y en el resto del agua por consiguiente, la diferencia de concentración entre estas dos películas estacionarias, representa la fuerza potencial que causa la difusión del gas.

Todo el oxígeno que pasa por una película atravie-

sa la segunda y ambas pueden ser consideradas como dos resistencias difusionales en serie, representando el líquido una mayor resistencia. El paso a través de estas capas estacionarias, es un proceso de difusión y está determinado por el grosor de las películas. El espesor de las películas, aunque fundamentalmente es función de la viscosidad, decrece batiendo o agitando la masa de agua o gas.

La cantidad de oxígeno difundida en la unidad de tiempo por unidad de área,  $(dw/A dt)$ , se puede expresar por el producto de la diferencia de concentración, como fuerza directriz, por el coeficiente de difusión.

$$\frac{dw}{A dt} = K_{d0} (p_0 - p_1) = K_{d1} (C_1 - C_2) \quad (3.11)$$

$A$  = Área de contacto.

$K_{d0}$  = Coeficiente de difusión de gas en la fase gaseosa que es igual al coeficiente de difusión molecular por unidad de espesor de película.

$p_0$  = Presión parcial del gas en la masa gaseosa.

$p_1$  = Presión parcial del gas en la superficie de contacto o interfase.

$K_{d1}$  = Coeficiente de difusión del gas en la fase líquida que es igual al coeficiente de difu-

si3n molecular por unidad de espesor de peli-  
culia.

$C_1$  = Concentraci3n del gas en la superficie de  
contacto o interfase.

$C_2$  = Concentraci3n del gas en la masa de liquido.

Tres situaciones generales pueden ocurrir segun  
sea la solubilidad del gas en el liquido:

i. Gases de alta solubilidad ( $NH_3$ ,  $HCl$  en agua).

Cuando el gas es altamente soluble en el liqui-  
do, la difusi3n es r3pida;  $p_1$  se reduce a valo-  
res despreciables y  $C_1$  es grande aun cuando  $p_1$   
sea pequeno, luego el factor de control del  
proceso es el paso de gas a trav3s de la peli-  
cula gaseosa y la ecuaci3n (3.11) se aproxima a  
un valor.

$$\frac{dw}{A dt} = K_{d0} p_0 \quad (3.12)$$

Si se reemplaza  $dw$  por  $V dC$ ,

$$\frac{dC}{dt} = K_{d0} \frac{A}{V} p_0 \quad (3.13)$$

Por consiguiente el traspaso es acelerado redu-  
ciendo el espesor de la peli-  
cula de gas por mo-  
vimiento o agitaci3n de la masa gaseosa. En o-  
tros t3rminos, para gases muy solubles en el a-

qua, la tasa de absorción está determinada por la tasa de difusión a través de la película de gas con una diferencia de presión igual a  $p_0$  y el efecto es similar como si la película de líquido no existiese.

2. Gases de baja solubilidad ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  en agua). Cuando la solubilidad de un líquido es baja,  $C_1$  es prácticamente igual a  $C_s$ , ya que la película de líquido se satura instantáneamente hasta una profundidad de algunas moléculas. El factor de control es el paso del gas a través de la película de líquido y la ecuación (3.ii) se aproxima a:

$$\frac{dw}{A dt} = K_{d1} (C_s - C_1) \quad (3.14)$$

$$\frac{dC}{dt} = K_{d1} \frac{A}{V} (C_s - C_1) \quad (3.15)$$

Que es la misma ecuación de Adeney para  $K_{d1} = f$  y  $C_1 = C$ .

El traspaso del gas es promovido reduciendo el espesor de la película de líquido.

3. Gases de solubilidad intermedia ( $H_2S$  en agua). Para gases de solubilidad intermedia el efecto de ambas películas es importante. Si se desea

TABLA IV Ref(18).  
EFECTOS DE LA AGITACION.

Velocidad de Agitación.	Tasa de solución de oxígeno comparada con mezcla perfecta.
r. p. m.	%
0	0.3
60	7.0
80	12.0
140	15.0
340	27.0
590	38.0
1000	47.0

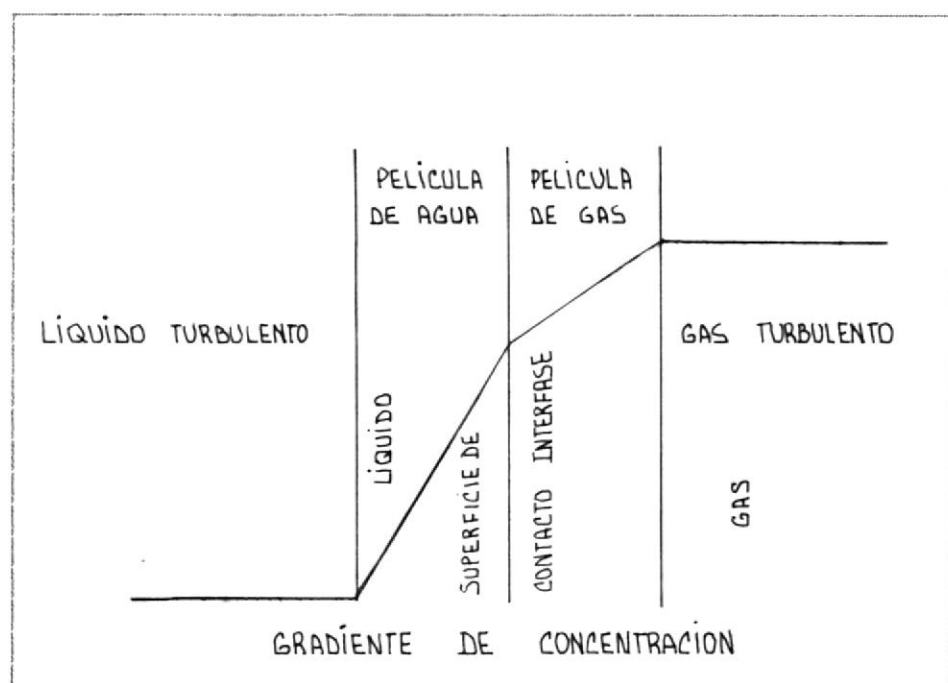


Fig.Nº3.3 INTERCAMBIO DE GASES A TRAVES DE DOS PELICULAS ESTACIONARIAS Ref(18).

TABLA III Ref (8).

## COEFICIENTES DE TRANSMISION Y ESPESORES DE LA PELICULA PARA GASES DE BAJA SOLUBILIDAD EN AGUA.

Gas	Temperatura °C	Condición de Prueba	Coefficiente de transmisión $K_d(i)$ , cm/hr	Coefficiente de difusión $K_d$ , cm <sup>2</sup> /hr	Espesor de la película $K_d/K_d(i)$ , cm	Observador
Superficies planas en contacto con 50ml de agua a una velocidad establecida de movimiento.						
O <sub>2</sub>	25	0 rpm	0.41	$9.4 \times 10^{-2}$	$2.3 \times 10^{-1}$	Hutchinson
		76 rpm	1.20		$7.8 \times 10^{-2}$	
		171 rpm	3.00		$3.1 \times 10^{-2}$	
		486 rpm	5.43		$1.7 \times 10^{-2}$	
		1025 rpm	7.64		$1.2 \times 10^{-2}$	
CO <sub>2</sub>	25	0 rpm	1.46	$7.4 \times 10^{-2}$	$5.1 \times 10^{-2}$	
		93 rpm	1.65		$4.5 \times 10^{-2}$	
		171 rpm	2.73		$2.7 \times 10^{-2}$	
		486 rpm	4.81		$1.5 \times 10^{-2}$	
		1025 rpm	8.35		$8.9 \times 10^{-2}$	
Burbujas de gas de tamaño establecido, en agua.						
O <sub>2</sub>	25	10 ml	20	$9.4 \times 10^{-2}$	$4.7 \times 10^{-3}$	Schwab Ippen
	20-21	1.51-2.13 ml	88		$1.1 \times 10^{-3}$	
Gotas de agua de tamaño establecido						
CO <sub>2</sub>	24	0.1 ml	269	$7.4 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-4}$	Whitman

promover el traspaso del gas, ambas películas deben reducir sus espesores agitando el gas y el líquido. Si la ley de Henry puede ser aplicada con razonable éxito y se tiene un coeficiente satisfactorio que depende de ambas películas,  $K_{d01}$ , la ecuación que rige el proceso está definida por la expresión:

$$\frac{dC}{dt} = K_{d01} \frac{V}{A} (C_s - C_1) \quad (3.16)$$

#### Naturaleza del factor $f = K_{d01}$

Lewis y Whitman expresan "f" en función de sus dos componentes,  $f = \frac{K_d}{x}$  en que:

$x$  = Espesor efectivo de la película de líquido

$K_d$  = Coeficiente de difusión molecular del gas en el líquido.

$K_d = f * x$  = Coeficiente de difusión molecular.

#### 3.4. EFECTOS DE AGITACION

La turbulencia o agitación violenta de la interfase aire agua, disminuye el espesor de película e incrementa eficazmente el área de contacto aire agua, ya que renueva constantemente el área efectiva de transferencia del agua puesta en contacto con el aire tabla IV.

El aumento del área de la interfase aumenta la transferencia, ya que el valor de la constante de aeración aumenta. La transferencia de oxígeno en el agua es enteramente debida a la circulación, corrientes y turbulencia.

La difusión de oxígeno a través del agua es un proceso lento y de significancia pequeña. De aquí la influencia de los rápidos, piedras y pequeñas cascadas, en los ríos polucionados para lograr su reoxigenación.

De esto se puede concluir que se puede mejorar enormemente la aeración del agua de un estanque con un mínimo de energía, esto puede hacerse por aeradores superficiales o por mezclado, los cuales traen agua desde capas inferiores, o ponen en contacto nuevas superficies de agua con la atmósfera.

# TASA DE SOLUCION DE OXIGENO (%)

VS. VELOCIDAD DE AGITACION (RPM)

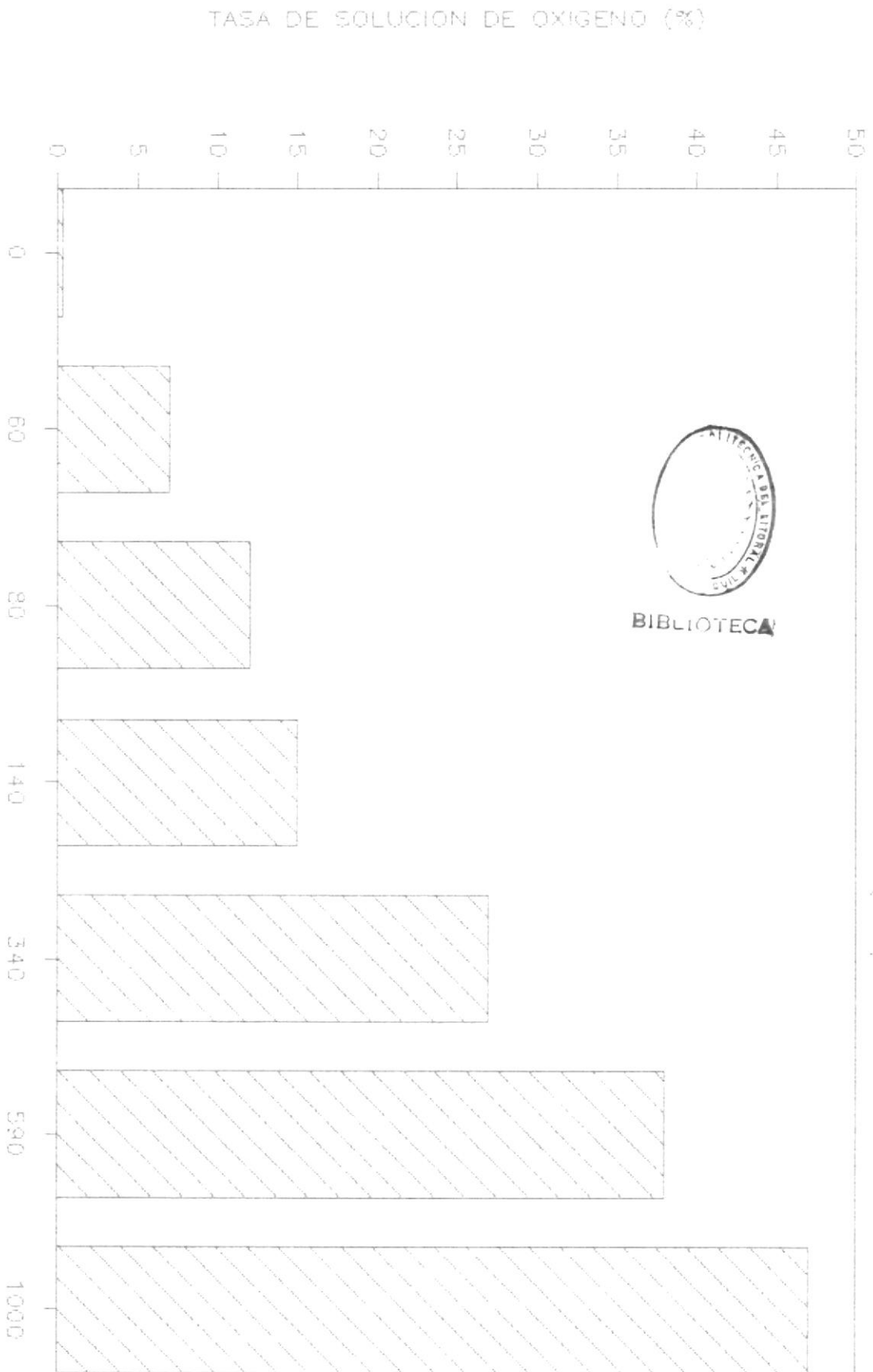


FIG. 3.4. INFLUENCIA DE LA AGITACION



BIBLIOTECA

## CAPITULO IV

### AERADORES

#### 4.1. FACTORES QUE AFECTAN EL DISEÑO DE AERADORES

Es deseable diseñar un aerador para aplicaciones específicas. Muchos diseños se basan sobre ensayos y errores porque existe una limitada cantidad de información actual de diseño, disponibles en publicaciones.

Los factores principales que rigen el rendimiento de un aerador son los siguientes:

- 1.- Factor (  $A/V$  ). El traspaso de gas se acelera con el aumento de superficie en relación con el volumen expuesto a aeración. Esto se realiza en la práctica, dividiendo la masa de agua en finísimas gotas o en burbujas de aire en contacto con el líquido.
- 2.- Factor (  $t$  ). Los aeradores deben diseñarse para que el aire con el agua tengan el mayor tiempo de contacto posible en las condiciones que rigen el proceso, ( carga de agua o energía dis-

ponible ). Ejemplos: escurrimiento de agua en cascada o sobre bandejas en lugar de caída libre; burbujas de aire a través del líquido en reemplazo de esparcidores de agua.

- 3.- Factores  $(A/V)$  y  $(t)$ . Los diferentes tipos de aeradores emplean los factores  $(A/V)$  y  $(t)$  según las condiciones de operación. Por ejemplo, una boquilla esparcidora, logra un alto valor del factor  $A/V$ , en un corto período de contacto, en cambio, es posible conseguir el mismo efecto de aeración en el escurrimiento de un estanque a costa de un prolongado tiempo de exposición.
- 4.- Reduciendo el espesor de la película  $(\lambda)$ , se aumenta en forma efectiva el valor de "f" y por consiguiente la tasa de aeración: pulverización del agua en finas gotas, inyección de burbujas de aire, agitación turbulenta del líquido.
- 5.- Factor  $(C_s - C)$ . El valor de  $C_s$  es función de la temperatura y de la presión parcial del gas. Para una concentración dada  $C_1$ , el valor es:  $(C_s - C_1)$ .
- 6.- Factor de renovación continua de la película del líquido. La película del líquido se satura instantáneamente de gas en la renovación continua de superficies de contacto, logrando por

tanto una mayor tasa de aeración, comparada con el traspaso a través de la película de líquido estacionaria.

#### 4.2. MÉTODOS DE AERACION

La aeración puede realizarse de dos formas: natural y artificial.

##### 4.2.1. AERACION NATURAL

La aeración natural se efectúa a través del contacto del agua con el aire en los ríos y quebradas, conductos y canales, almacenamientos naturales, embalses, lagos, etc.

Los vientos y corrientes cambian la superficie de contacto, sometiendo a aeración permanente nuevas masas de agua. Sin embargo este proceso es eficiente sólo en zonas de circulación activa, por cuanto la difusión de los gases es sumamente lenta. En los ríos o canales abiertos, la aeración natural aumenta considerablemente por las caídas, quebradas o lechos que originan turbulencia.

##### Resistencia térmica al mezclado

El agua arrastrada hacia la orilla de barlovento de un lago produce una columna que genera co-



corriente de retorno. Según la topografía de la orilla, estas corrientes se mueven en la superficie del agua, o debajo de ella. El agua que retorna se desplaza hacia abajo en las calceñas; y lateralmente en los puntos donde la tierra se proyecta hacia afuera de la orilla.

En la figura ( 4.1 ) se ilustra la distribución vertical de las corrientes producidas por el viento, en una sección idealizada de un lago o almacenamiento. La profundidad de las corrientes de retorno dependen de la temperatura del agua. Mientras mayor sea la disminución de la temperatura con la profundidad mayor será la resistencia térmica a la mezcla y las corrientes de retorno estarán más confinadas hacia la capa superior del agua.

Por resistencias térmicas se entiende la resistencia de la capa inferior de agua más fría, y por consiguiente más densa a ser desplazada por el agua que se encuentra más arriba y que es más ligera. Existiendo un plano de corte que divide las corrientes superficiales que siguen al viento, de las corrientes de retorno que se mueven en sentido contrario.

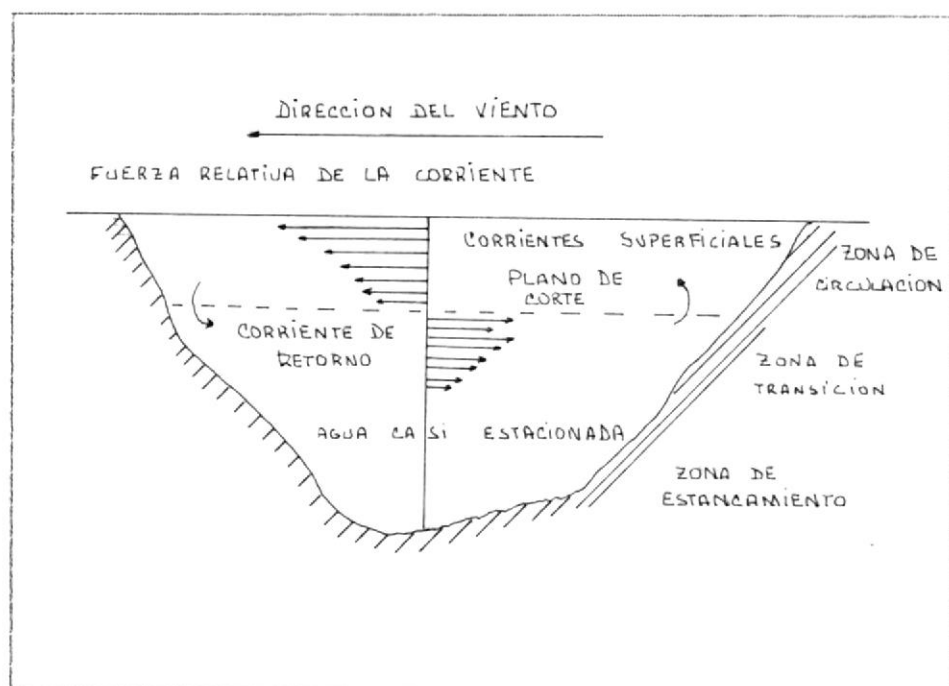


Fig.Nº4.1 DIRECCION Y VELOCIDAD HORIZONTAL RELATIVA DE LAS CORRIENTES QUE PRODUCE EL VIENTO EN UN LAGO O ALMACENAMIENTO (IDEALIZADO) Ref (8).

#### 4.2.2. AERACION ARTIFICIAL

Por lo general, se usan cuatro tipos de aeradores: 1) aeradores por gravedad, 2) aeradores de boquilla por aspersión o de spray, 3) difusores de aire y 4) aeradores mecánicos. Existiendo aeradores que utilizan combinaciones de dos o más dentro de una unidad.

El objetivo de cada uno, de acuerdo con sus propios medios, consiste en crear una interfase extensa y autorenovable entre el aire y el agua, para impedir que las películas interfaciales au-

menten de espesor, optimizar el tiempo de transferencia de gas, y para alcanzar estos objetivos con un gasto mínimo de energía. Para asegurar la mezcla del líquido de aquella agua de baja concentración de oxígeno esta es llevada con el aire o con el oxígeno gaseoso, aumentando el gradiente efectivo de concentración, causando transferencia.

Los aeradores gravitacionales; utilizan la energía libre cuando el agua pierde altitud para incrementar la superficie del área aire-agua, así de este modo se incrementa la concentración de oxígeno en el agua fig (4.2).

Los aeradores gravitacionales tienen una ventaja inherente de utilización de una fuente de energía gravitacional. Sin embargo esto es solamente verdad cuando la fuente del agua es elevada. Aunque si bien el aerador gravitacional puede ser usado cuando estas condiciones de elevación no existen, el agua debe bombearse hacia grandes elevaciones y permitir la caída de la columna en el área usada. Raramente ocurre supersaturación con aeradores gravitacionales.

Entre los aeradores gravitacionales tenemos:

- De cascada, en los cuales la caída disponible

se subdivide en una serie de etapas. El agua escurre sobre las escaleras de concreto, varillas inclinadas.

- Planos inclinados. Provistos generalmente de placas de retención colocadas en planos en posición angular para romper la lámina de agua que en otra forma se produciría.
- Columnas verticales, a través de las cuales caen gotas de agua y ascienden corrientes de aire en flujo a contracorriente.
- De charolas o canales perforados, frecuentemente lleno con material de contacto como coque o piedra, el agua cae libremente de una charola a otra o de canal a canal y gotéa sobre la superficie del medio de contacto.

Aeradores por aspersion o a presión ; atomizan gotas de agua en el seno del aire a partir de orificios o boquillas estacionarias o móviles. Son muy eficientes para la eliminación de gases y sustancias volátiles y en general reducen los olores, sabores, y el  $\text{CO}_2$  fig (4.3).

Difusores de aire ; la mayor parte de difusores de aire o aeradores de inyección barbotan aire comprimido dentro del agua a través de orificios o boquillas colocadas en tuberías, placas difu-

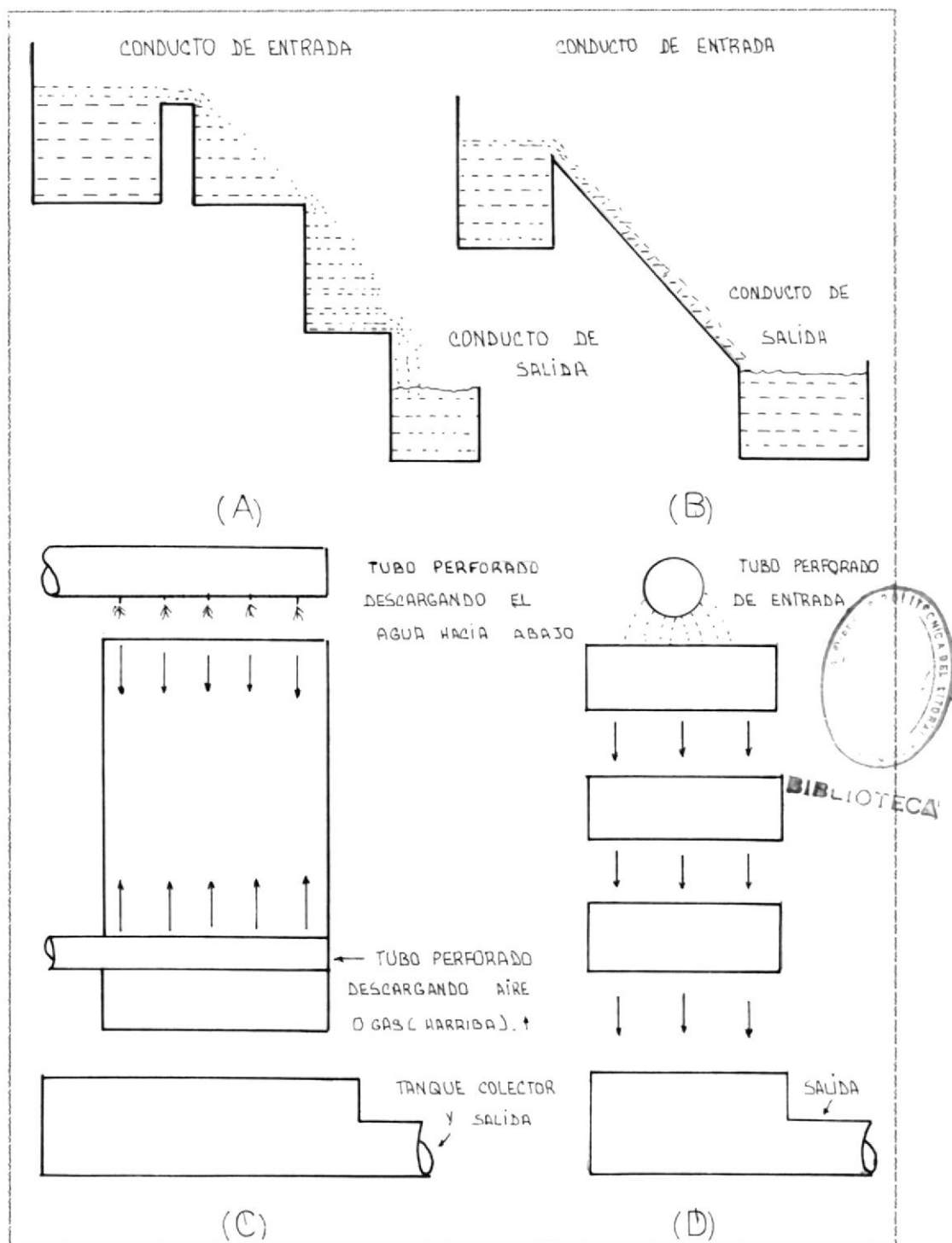


Fig. Nº4.2 AERADORES POR GRAVEDAD A) DE CÁSCADA; B) DE PLANO INCLINADO C) DE TORRE CON FLUJO A CONTRACORRIENTE DE AIRE (GAS) Y AGUA; D) COLUMNA DE CHAROLAS PERFORADAS CONTENIENDO POSIBLEMENTE MEDIO DE CONTACTO Ref (8).

soras o rociadores de aire. Las burbujas ascendentes adquieren velocidades terminales menores de las que alcanzarían gotas de agua si cayesen libremente en el aire a través de la misma distancia. Esto incrementa el tiempo de exposición las burbujas de aire, pero reduce la turbulencia en la interfaz de la burbuja.

El aire a presión proveniente del inyector, se difunde por tuberías perforadas o placas porosas de gran permeabilidad, dispuestas en el fondo del estanque o canal.

Estos son algunos tipos de aeradores de difusión, el más simple es una tubería colocada en un tanque de agua, aire bombeado hacia abajo en la tubería, en forma de burbuja de aire al fondo del estanque. La transferencia de oxígeno ocurre como causa de la fuerza de boyantes de las burbujas al elevarse en el líquido. Este es un sistema ineficiente porque el diámetro de la burbuja es grande y una relativamente pequeña superficie de área. La fig (4.4) muestra una modificación de este sistema en el cual el aire es liberado a través de la difusión. El difusor forma pequeñas burbujas uniformes teniendo una extensa superficie de área por unidad de gas de entrada. De este modo se encuentra el coeficien-

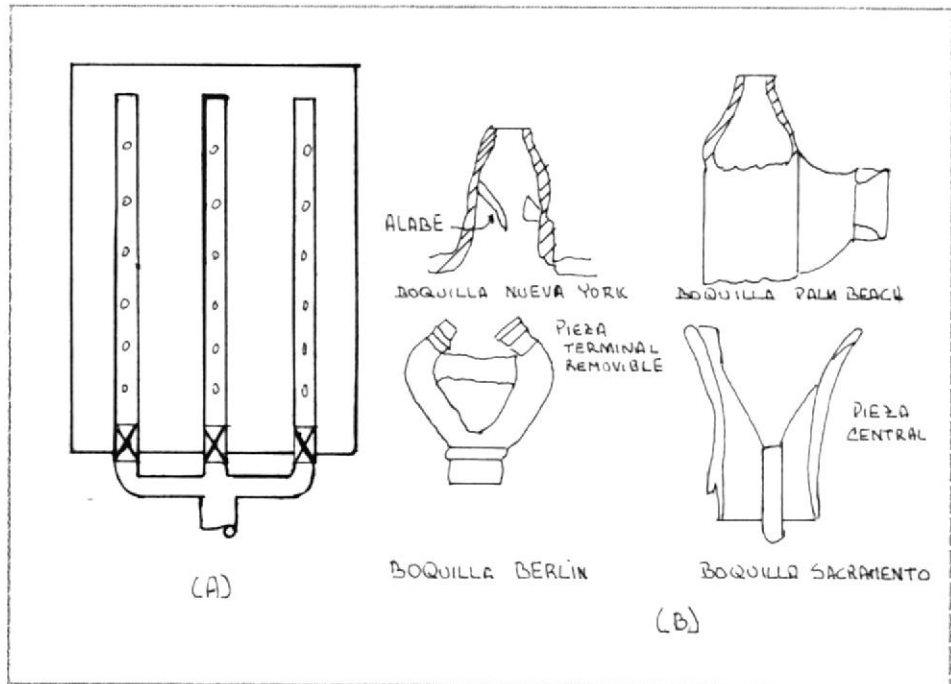


Fig.Nº4.3 AERADOR FOR ASPERSION Y BOQUILLAS  
 A) AERADOR DOTADO DE BOQUILLAS B) BO-  
 QUILLAS PARA AERADORES Ref (8).

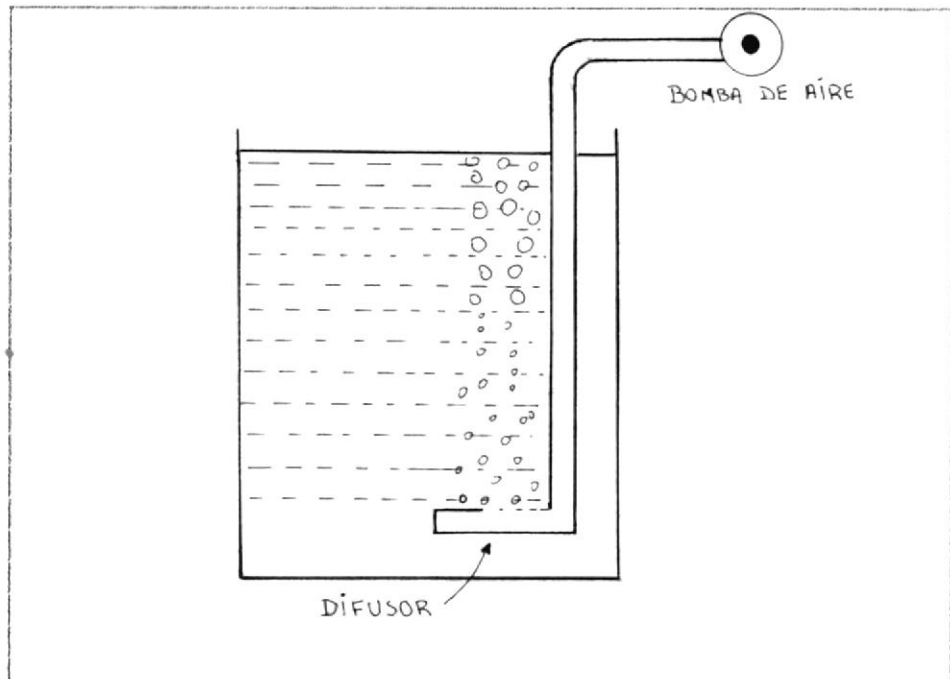


Fig.Nº4.4 AERADOR DE DIFUSION SIMPLE Ref (19).

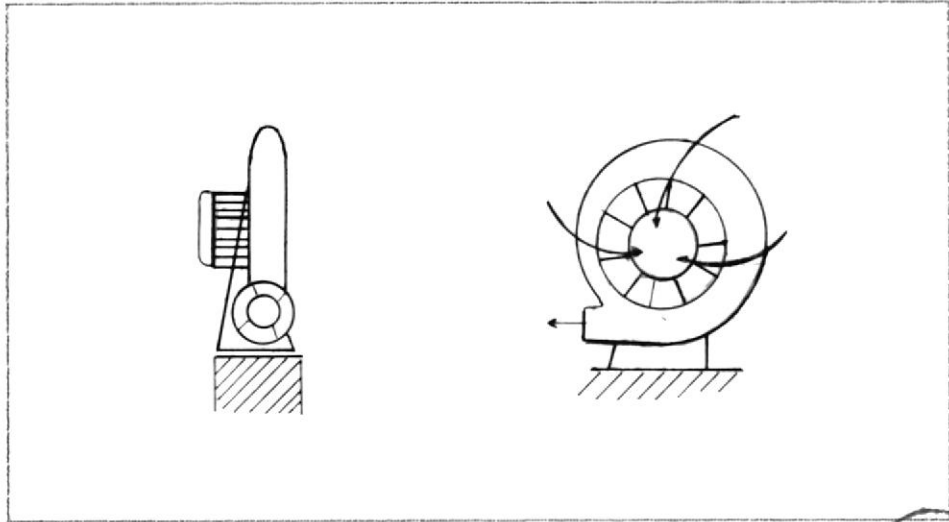


Fig.N°4.5 ESQUEMA DE UN SOPLANTE PARA AERACION.  
Ref (11).

BIBLIOTECA

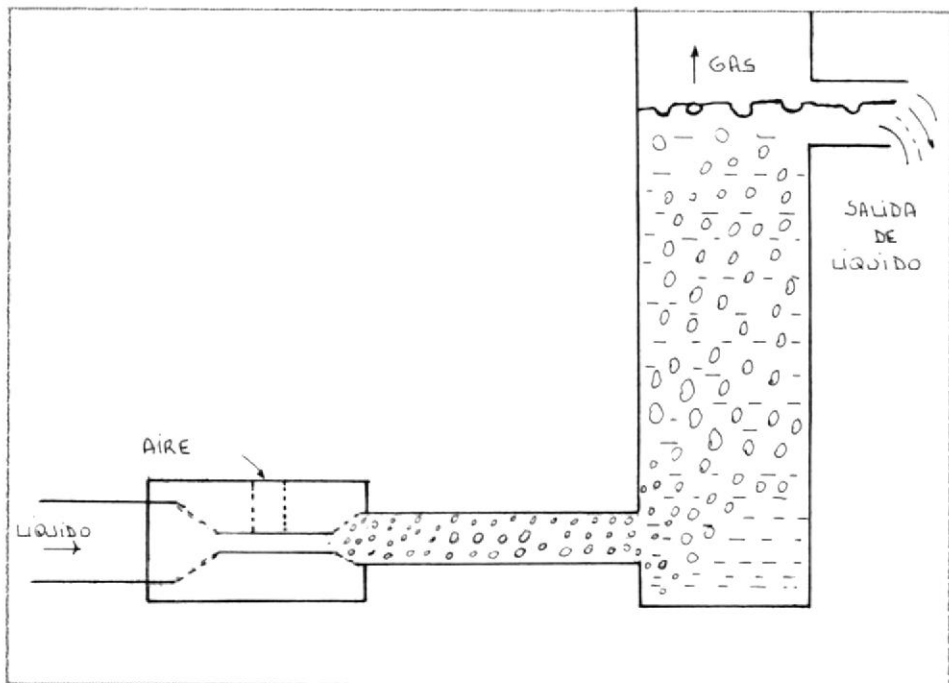


Fig.N°4.6 AERADOR TIPO VENTURI Ref (19).

te total de transferencia de oxígeno. Muchos materiales son usados para difusores, incluyendo varios plásticos, carbonatos y madera.

Otro tipo de sistema de difusión es basado sobre un sistema de aspiración fig (4.6). Un apropiado diseño de Venturi, orificio, boquilla u otro tipo de medidas de pérdida de cabeza, es usado para bajar la presión estática en un punto de la línea del líquido. Abriendo el mismo a la atmósfera local, el punto de baja presión permite que la presión atmosférica fuerce el aire dentro de la corriente de líquido. De este modo se forman burbujas aeradas de líquido. Este sistema requiere una bomba de líquido y un arreglo de aspiración pero no es un sistema adecuado para suministrar aire presurizado.

#### Aeradores Mecánicos

Existen muchísimas clases de aeradores mecánicos, de los cuales nombraremos algunos:

De paletas sumergidas, que hacen circular el agua y remueven su interfaz aire-agua.

De paletas o cepillos superficiales, ligeramente sumergidos en las cámaras de aeración, pero a suficiente profundidad para hacer circular sus aguas, desprenden la burbujas de aire, y arrojan

por aspersión gotas sobre la superficie del agua.

De paletas impulsoras, que guían en el fondo de un tubo de flujo descendente, aspirando aire hacia el interior del agua.

De paletas de turbina, que coronan un tubo central de flujo ascendente en una cámara de aeración y rocían gotas de agua sobre su superficie.

Cepillos y paletas rotando horizontalmente en su lugar con una sección, parcialmente sumergida y rotando a altas velocidades relativas, son también utilizadas como aeradores de superficie. La rotación de estas unidades crean gran turbulencia alrededor de ellos, además dividen el agua en gotitas las cuales son arrojadas sobre la superficie del agua.



**BIBLIOTECA**

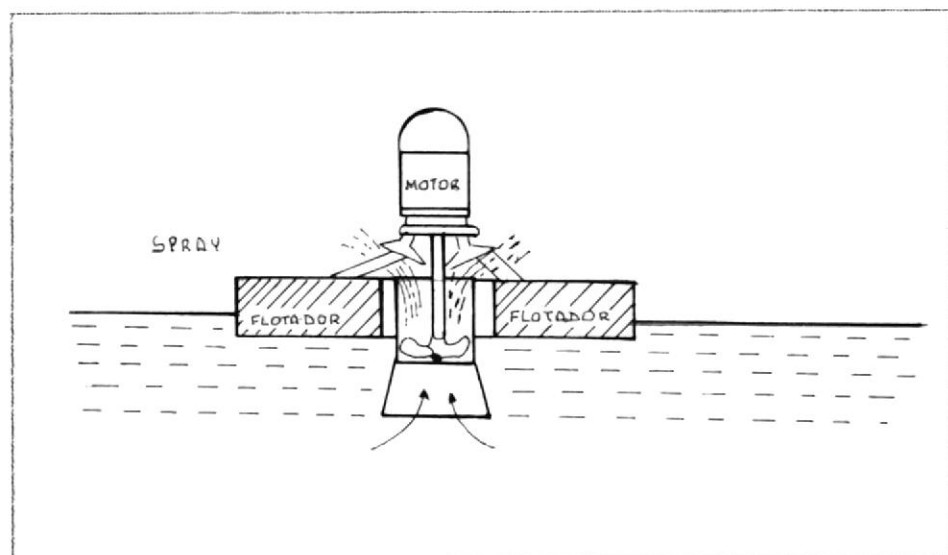


Fig.Nº4.7 AERADOR DE SUPERFICIE TIPO SPRAY  
Ref (19).

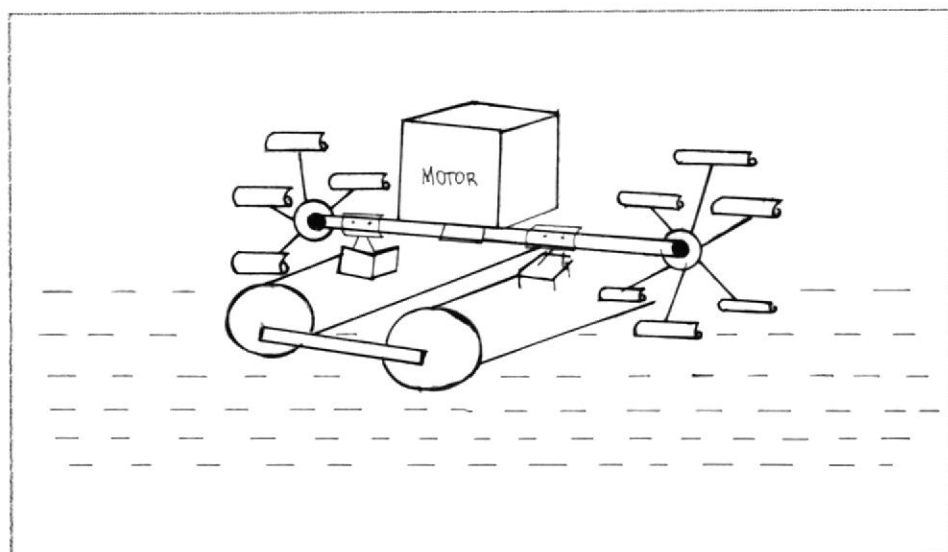


Fig.Nº4.8 ESQUEMA DE UN AERADOR FLOTANTE  
Ref (11).

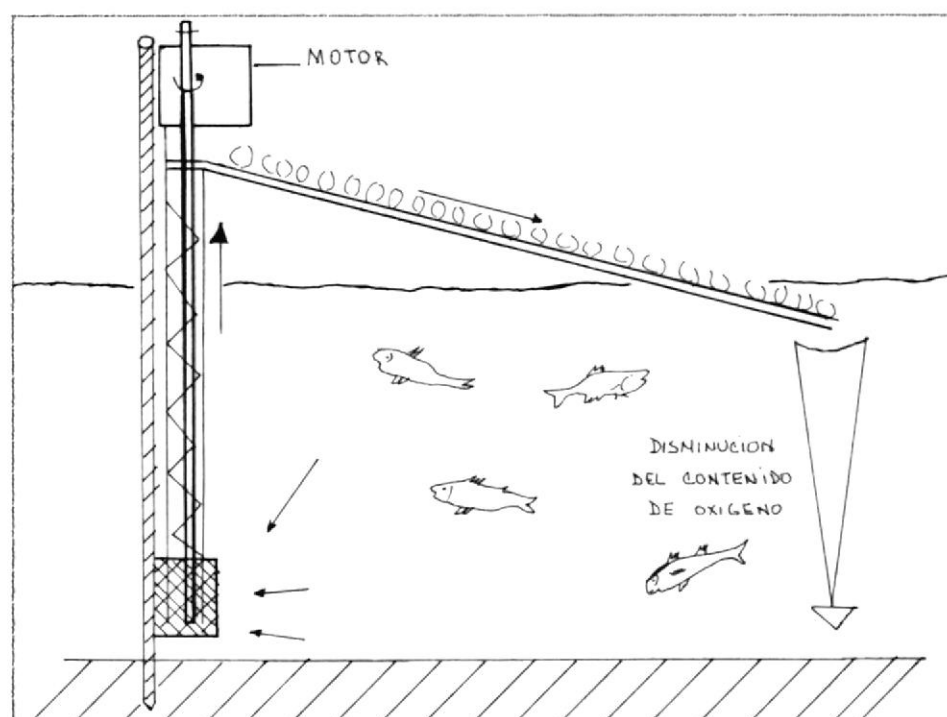


Fig.Nº4.7 ESQUEMA DE UN AERADOR DE FONDO PARA ESTANQUE Ref(11).



BIBLIOTECA

## CAPITULO V

### DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL AERADOR

#### 5.1. CONCEPTOS BASICOS DE LA UTILIZACION DEL VIENTO

Las variaciones de temperatura provocan diferencias de densidad en las masas de aire, por lo que estas se desplazan de unas latitudes a otras. Este desplazamiento se efectúa desde las zonas donde la densidad del aire es alta hacia las zonas en las que esta es baja (presión atmosférica).

El viento se caracteriza por; dos grandes variables respecto al tiempo, la velocidad y la dirección.

#### Fenómenos instantáneos; ráfagas

Son bastantes difíciles de predecir si los regímenes de viento no son periódicos, se necesitan registros meteorológicos de muchos años para llegar a tener una idea de las variaciones instantáneas.

### Fenómenos diarios

Se deben a los fenómenos térmicos originados por la radiación solar. Las variaciones de la temperatura con la altitud crean corrientes ascendentes, en nuestro medio la velocidad media del viento aumenta entre las 12 horas y las 16 horas, y al anochecer. Por ejemplo tenemos las variaciones entre el mar y la tierra.

Durante el día se calienta el suelo y el aire que está sobre él. Este aire caliente se eleva, el aire frío que está sobre el mar viene hacia la costa; es la brisa de mar fig (5.1).

Durante la noche el suelo se enfría; el mar está más caliente y produce el fenómeno inverso, brisa de tierra fig (5.1).



BIBLIOTECA

### Las variaciones de las velocidades del viento con la altitud

Dependen esencialmente de la naturaleza del terreno por encima del cual se mueven las masas de aire. Estas variaciones se pueden representar por una ley sencilla de la forma:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left[ \frac{h_1}{h_2} \right]^\sigma$$

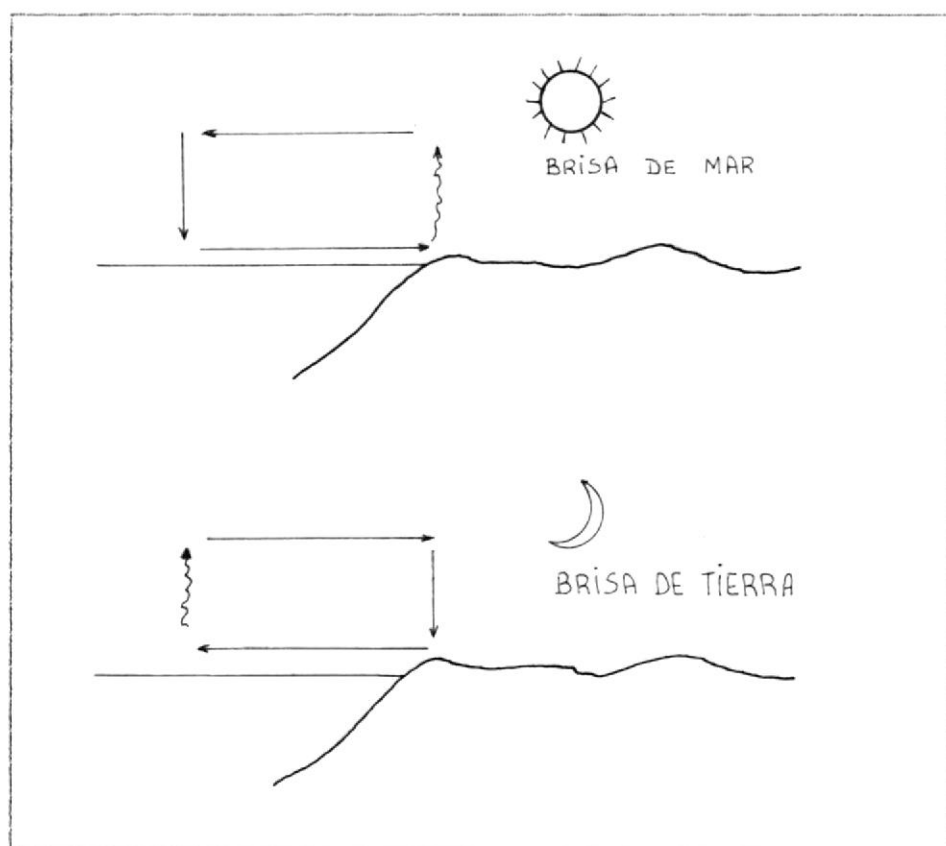


Fig. Nº5.1 FENOMENO DIARIO CERCA DE LA COSTA.  
Ref (6).

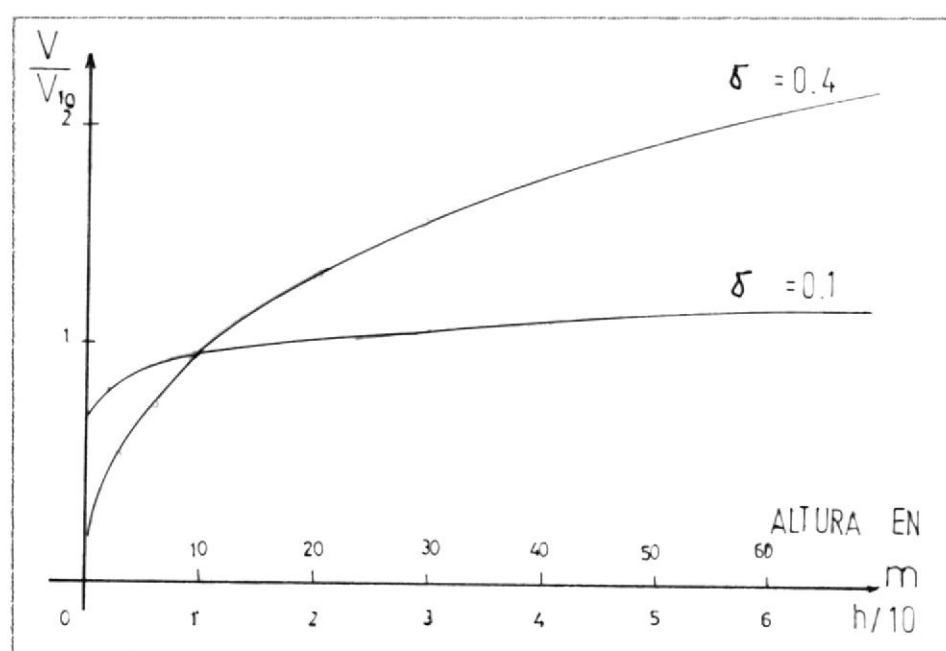


Fig. Nº5.2 GRAFICA DE LAS VARIACIONES DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO EN FUNCION DE LA ALTITUD Ref (6).

Donde  $v_1$  y  $v_2$  representan las velocidades horizontales del viento a las alturas  $h_1$  y  $h_2$ , respectivamente.

El exponente  $\sigma$  caracteriza el terreno. En la tabla V, se encuentran los valores de ( $\sigma$ ) para diferentes tipos de terreno agrupados en cuatro familias. Esto demuestra que los lugares más interesantes para la recuperación de energía eólica son los pocos o no accidentados para los cuales el exponente ( $\sigma$ ) es bajo. En efecto en estos casos, se beneficia de velocidades elevadas cerca del suelo y la variación de la velocidad del viento para diferencias pequeñas de altura es leve. La velocidad del viento respecto con las diferentes partes, altas y bajas de la máquina tienen sensiblemente el mismo valor. Esto tiene como consecuencia directa la disminución de los esfuerzos cíclicos sobre palas del aeromotor cuando está girando.

#### Medición de las velocidades del viento

Antes de comenzar la explotación de un aeromotor en un lugar, es necesario disponer de un mínimo de datos sobre las características del viento en dicho lugar.

#### Lugares de emplazamiento de los aeromotores

Para todo tipo de aeromotor la elección del empla-



TABLA V Ref(6).  
 VARIACION DEL EXPONENTE ( $\sigma$ ), SEGUN LA IRREGULARIDAD DEL SUELO.

NATURALEZA DEL TERRENO	IRREGULARIDAD DEL SUELO, $h_0$ en mm	EXPONENTE ( $\sigma$ )
1. Llano: Hielo, nieve, lagunas, hierba ...	0 a 20	0.08 a 0.12
2. Poco accidentado. (Irregularidades de pequeña amplitud): campos, pastos y cultivos .....	20 a 200	0.13 a 0.16
3. Accidentado: Bosques, zonas poco habitadas.	1000 a 1500	0.20 a 0.23
4. Muy accidentado: Ciudades .....	1000 a 4000	0.25 a 0.4

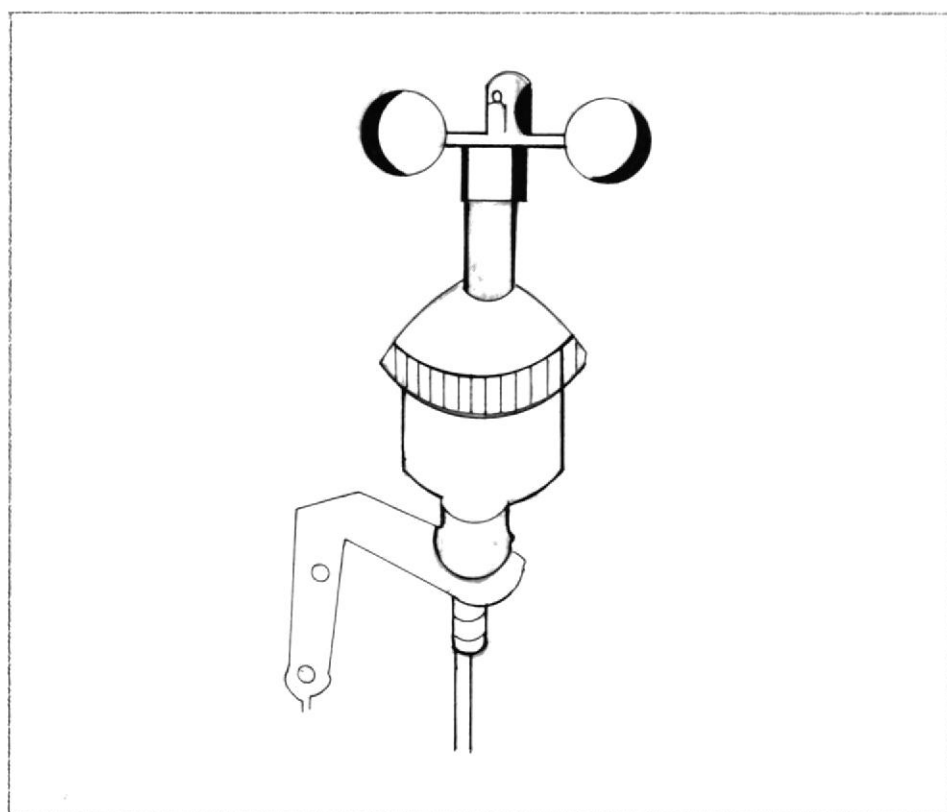


Fig. N°5.3 ANEMOMETRO DE CAZOLETAS Ref(6).

zamiento es un elemento determinante para la explotación, pero los parámetros definitivos del lugar son sensiblemente diferentes si se trata de un aeromotor de pequeña potencia o de gran potencia.

### Potencial Eólico

La evaluación de la energía recuperable en un lugar debe conocerse o estimarse antes de cualquier otro trabajo. En efecto el usuario debe estar seguro de que el viento puede abastecer sus necesidades energéticas, y que la inversión no sea desproporcionada al rendimiento del aeromotor.

Medios para medir la velocidad del viento: Existen un cierto número de aparatos para la medición de la velocidad del viento, más o menos sofisticada, pero el aparato más comercializado es el anemómetro de cazoletas.

### Distintas clases de máquinas Eólicas o aeromotores

Un gran número de sistemas de captación de energía eólica han sido patentados, algunas veces puestos a punto y realizados a nivel de prototipo; no obstante pocos de ellos se han generalizado.

Se definen en general a los aeromotores según la posición de su eje de rotación con relación a la dirección del viento, en;

- Aeromotores de eje horizontal.
- Aeromotores de eje vertical.

#### Aeromotores de eje horizontal

Actualmente son las máquinas más difundidas ya que su rendimiento es superior al de todas las demás máquinas. En este grupo se incluyen aquellas que tienen 1, 2, 3 ó 4 palas, además de las típicas multipalas empleadas para el bombeo de agua.

Entre las máquinas con eje horizontal, hay que distinguir también las que tienen las palas situadas "cara al viento" y aquellas que las tienen, situadas "de espalda al viento" fig (5.4).

Los aeromotores para bombeo de agua acoplados a bombas de pistón, son rotores multipala, ya que necesitan un elevado par de arranque para el funcionamiento de las bombas.

#### Aeromotores de eje vertical

Son presumiblemente las primeras máquinas que se utilizaron para la captación de energía eólica ya que son conceptualmente mucho más sencillas que las de eje horizontal; en particular no necesitan de ningún sistema de orientación, lo que constituye una ventaja constructiva nada despreciable, y en funcionamiento, las palas, los rodamientos y

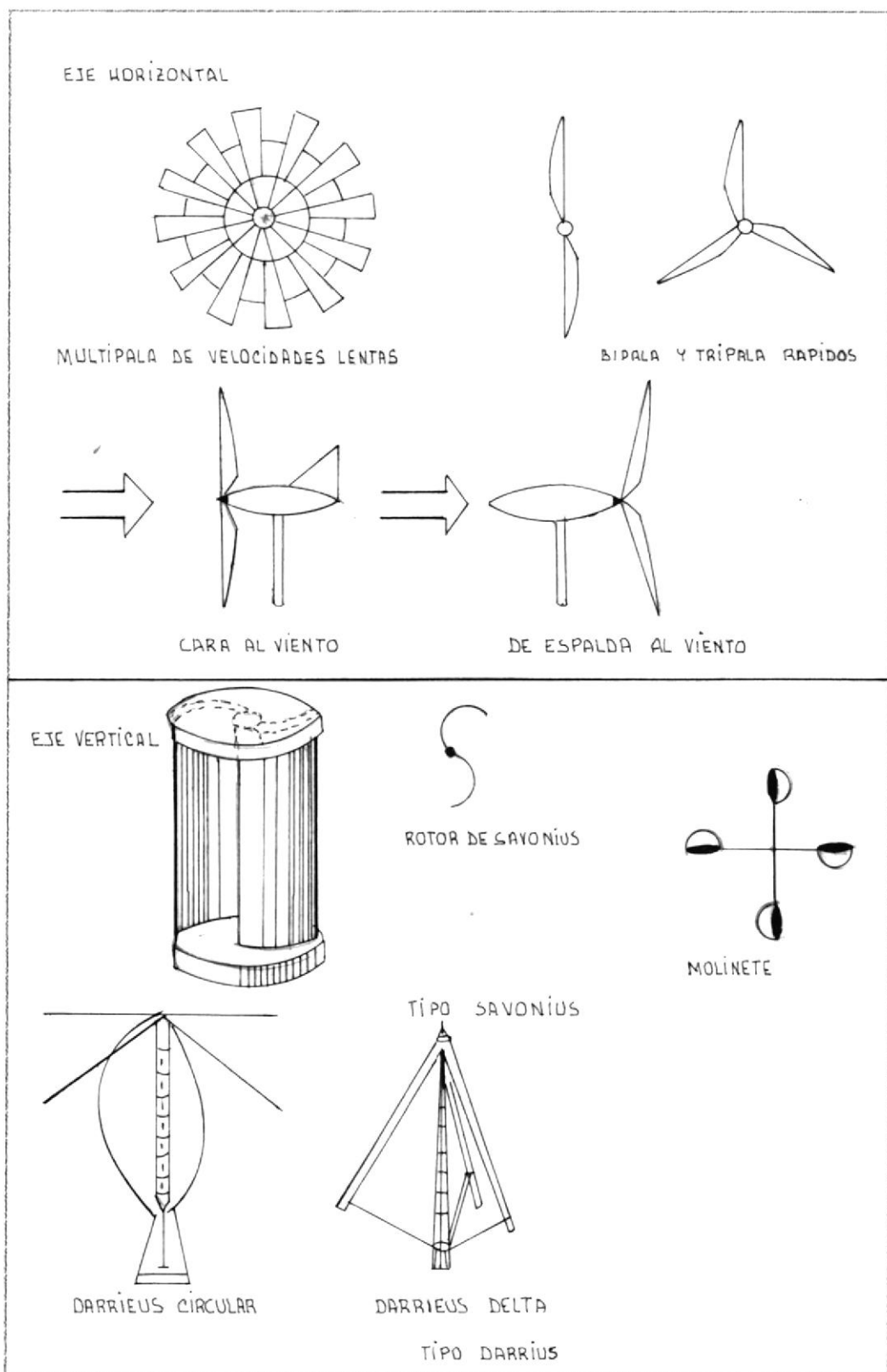


Fig. Nº5.4 CLASIFICACION DE LOS ARTEFACTOS EOLICOS.  
Ref (6).

los ejes no están sometidos a esfuerzos importantes debido a cambios de orientación, como en el caso de las máquinas de eje horizontal. Son pues de fácil construcción, desgraciadamente tienen un rendimiento mediocre fig (5.4).

Existen 2 grandes familias de aeromotores de eje vertical:

- Aeromotores derivados del rotor de Savonius.
- Aeromotores derivados del rotor de Darrieus.

#### Aeromotores Savonius

Esencialmente utilizan el arrastre diferencial creado por las palas, que pueden tener diversas formas.

El par de arranque es elevado, pero la velocidad máxima es claramente inferior a la de los aeromotores de eje horizontal: bipalas o tripalas.

#### Aeromotores Darrieus ( Ingeniero francés )

Emplean la sustentación de las palas y están caracterizadas por un débil par de arranque y una velocidad de rotación elevada, que permite la recuperación de una gran potencia. Pueden tener diferentes configuraciones. Para mejorar el par de arranque, se les suele acoplar algún tipo de rotor ( un savonius, por ejemplo ).

## 5.2. ENERGIA SUMINISTRADA POR EL VIENTO

Se llama viento al movimiento de una masa de aire. La energía que el viento proporciona es en forma de energía cinética, en función de la masa ( $m$ ) y de la velocidad de un determinado volumen de aire.

$$E = \frac{1}{2} m * v^2 \quad (5.1)$$

Si se considera que la masa por unidad de volumen, o densidad es ( $\rho$ ), entonces la energía cinética por volumen de aire cuya velocidad es  $v$ , es:

$$E_v = \frac{1}{2} \rho * v^2$$

Considerando un área  $A$  perpendicular a la dirección del viento, y un flujo de aire a través de  $A$  en función del tiempo, tenemos un flujo:  $\dot{V} = v A$ .

La potencia de este flujo de aire a través de  $A$ , es el flujo de energía cinética por segundo.

Potencia = Energía por segundo.

Potencia = Energía por volumen \* volumen por segundo Ref(15).

$$P = \frac{1}{2} \rho * v^3 * A \quad (5.3)$$



(5.5) BIBLIOTECA

Se entiende por energía la potencia durante un período determinado de tiempo de funcionamiento de la máquina de viento. Con la finalidad de poder extraer del viento la mayor cantidad posible de energía, se debe combinar adecuadamente las características del aparato y las condiciones del ambiente.

Desgraciadamente, no se puede captar toda esta energía, ya que la velocidad del viento, una vez atravesada la superficie de captación, no es nula y el teorema de Betz muestra que la máxima energía recuperable (recuperable sólo en teoría) es igual a 16/27 (60%) de la energía total Ref (15).

Tomando como densidad del aire ( $\rho$ ) un valor promedio de 1.165 Kg/m<sup>3</sup>, la potencia máxima teóricamente recuperable por un aeromotor de superficie A es igual a:

$$P = \frac{16}{27} * \frac{1}{2} * 1.165 * A * v^3 \quad (5.4)$$

Efectivamente, el límite de Betz:  $P = 0.545 A * v^3$

P = potencia expresada en watts.

A = Area expresada en m<sup>2</sup>.

v = velocidad expresada en m/seg.

En el caso de un rotor, la superficie A es la ba-

trida por las pañas. Si el diámetro de las pañas es  $D$ , el límite de Bétz es:

$$P = 0.345 \pi/4 * D^2 * v^3 \quad (5.5)$$

$$P = 0.27 D^2 * v^3 \quad (5.6)$$

Luego la potencia suministrada por un aeromotor es proporcional:

- Al cuadrado del diámetro o radio del rotor.
- Al cubo de la velocidad del viento.

La energía proporcionada por un aeromotor adquiere la forma de energía mecánica que se puede utilizar directamente (bombeo) o transformar según las necesidades y posibilidades (electricidad y calor).

Para los aerogeneradores clásicos, actualmente comercializados, el rendimiento varia entre el 30 y el 50% del límite de Betz fig (5.5).

#### Características de una máquina Eólica

Es interesante precisar las principales relaciones que permiten calcular los datos importantes de una máquina eólica. Se verá a continuación las expresiones de la potencia, y del momento con respecto al eje de la máquina. Estas son:

$$P = C_p \frac{\rho * A * v^3}{2} \quad \text{Potencia} \quad (5.7)$$

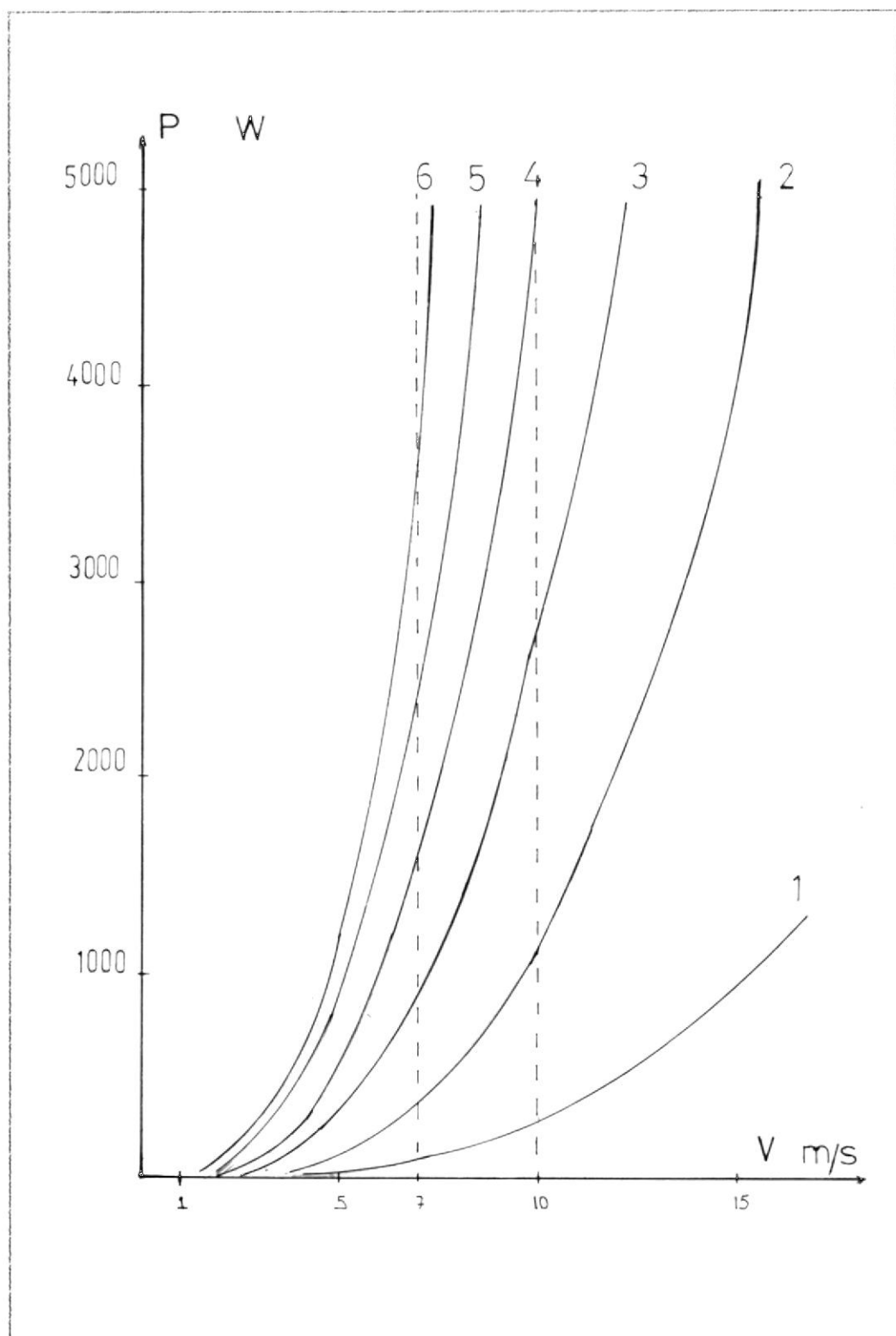


Fig. Nº5.5 LIMITES DE BETZ PARA DIFERENTES DIÁMETROS DE ROTOR  $P = 0.29 D^2 * v^3$  Ref (6).

$$\bar{Q} = C_m \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad \text{Momento} \quad (5.8)$$

En la cuales:

$C_p$  = Coeficiente de potencia, que depende del tipo de máquina, de la velocidad del viento y de la velocidad de rotación de la máquina. En la práctica este coeficiente varia entre 0.1 y 0.5.

$A$  = Superficie eficaz que se enfrenta al viento.

$v$  = Velocidad del viento.

$\rho$  = Densidad del aire.

$C_m$  = Coeficiente de momento.

$R$  = Largo del álabe o radio de la rueda.

#### Influencia de la Inercia

El problema de la inercia de los rotores de las máquinas eólicas se ha abordado muy raramente, a pesar que es importante. En efecto un rotor que tiene una inercia muy grande necesita de cierto tiempo para lograr su velocidad de régimen o para adaptarse a las variaciones de viento; se aprecia por lo tanto, la importancia de poseer un rotor liviano, rígido y de poca inercia Ref(13).



**BIBLIOTECA**

### Elección de la velocidad de rotación de la máquina Eólica

De una manera general, mientras más grande sea la máquina, más pequeña debe ser la velocidad de rotación. Esta velocidad es generalmente importante dependiendo de las aplicaciones que se haga de la máquina eólica, pudiendo ser estas: para la producción de energía eléctrica, para el bombeo, o para cualquier otra aplicación. Por ejemplo para nuestro caso específico para aerar agua.

No hay que olvidar que si la velocidad de rotación tiene en general importancia, el torque también puede ser importante y a veces crítico. Los mejores rendimientos si se considera solamente la máquina eólica, se obtienen generalmente con máquinas rápidas. En contraposición, el torque a la partida y a bajas velocidades es a menudo muy débil, luego no es favorable si se debe usar con vientos débiles durante tiempos largos.

### Coeficientes adimensionales

Para poder comparar la efectividad de los rotores introducimos el coeficiente  $C_p$ . El producto de este coeficiente por la potencia de la corriente de aire, resulta ser la potencia mecánica del rotor.

$$\text{Pot. mecánica} = \text{Pot. del viento} * C_p \quad (5.9)$$

Podemos decir que  $C_p$  es la relación entre la potencia que se obtiene en eje del rotor y la potencia de la corriente de aire. De acuerdo a la ecuación (5.9), y considerando  $A = \pi * R^2$  la sección por la cual cruza el flujo de aire en el rotor, tendremos que:

$$C_p = \frac{\text{Potencia mecánica}}{1/2 * v^3 * \pi * R^2 * \rho} \quad (5.10)$$

Otra relación que nos interesa es la que se obtiene al dividir la velocidad tangencial  $U$  del álabe a la distancia  $r$ , para la velocidad de la corriente  $v$  fig (5.6).

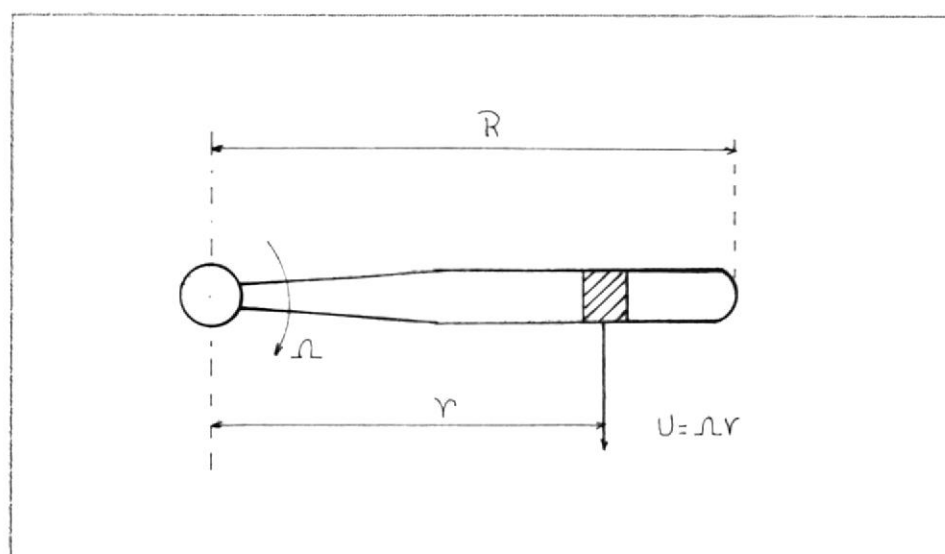


Fig.Nº5.6 DEFINICION DE LA RELACION DE VELOCIDADES Ref (15).

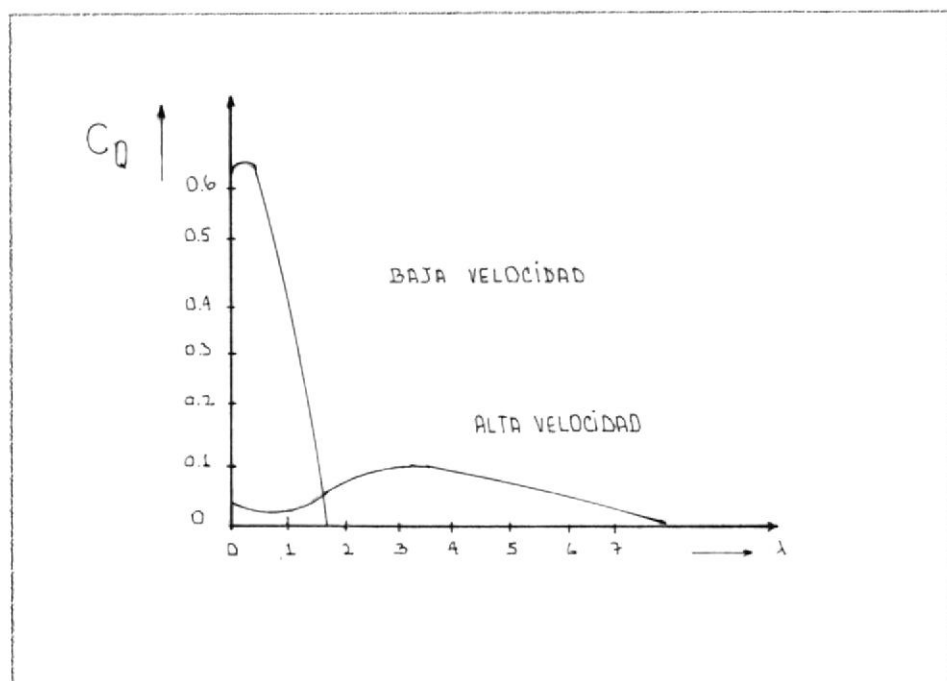


Fig.Nº5.7  $C_D$ - CARACTERISTICOS DE MOLINOS DE EJE HORIZONTAL Ref (15).

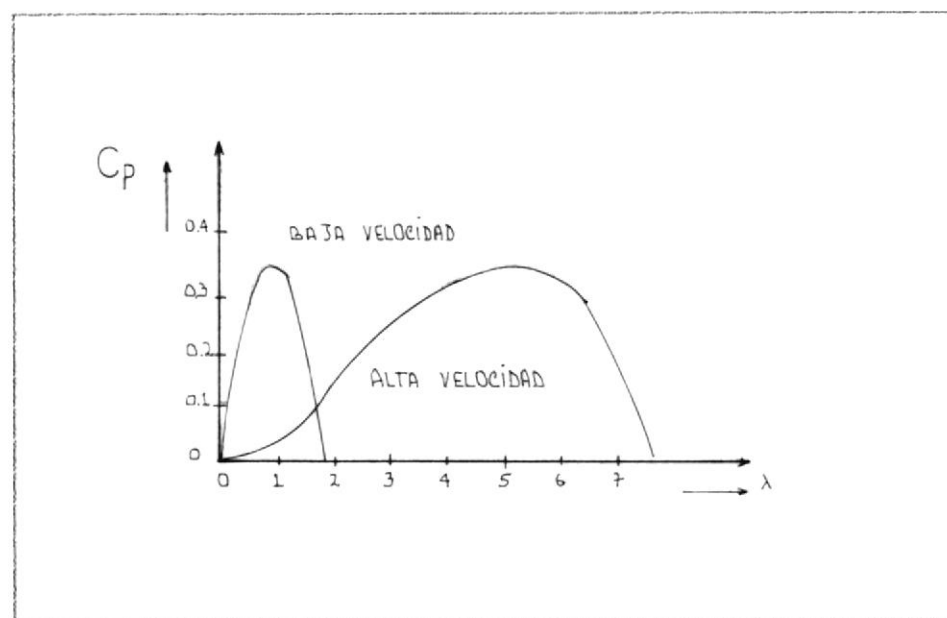


Fig.Nº5.8  $C_p$  - CARACTERISTICOS DE MOLINOS DE EJE HORIZONTAL Ref (15).

Al resultado de la relación  $(U/v)$  se le llama relación de velocidad local  $\lambda_r$ .

$$\lambda_r = \frac{U}{v} = \frac{\Omega * r}{v} \quad (5.11)$$

Y al resultado de la misma relación, pero referida al radio total de la pala  $R$ , se llama relación de velocidades en el extremo del álabe  $\lambda_o$ .

$$\lambda_o = \frac{\Omega * R}{v} \quad (5.12)$$

Cada molino tiene un valor  $\lambda_o$  para el cual el coeficiente de potencia es máximo, a  $\lambda_o$  se le conoce generalmente como relación de velocidades de un molino.

Existe una relación directa entre  $\lambda_o$  y  $\lambda_r$ . De las relaciones (5.11) y (5.12) podemos obtener la siguiente expresión:

$$\lambda_r = \frac{r}{R} * \lambda_o \quad (5.13)$$

### 5.3. ACCION DEL VIENTO SOBRE LAS PALAS

Si se coloca una superficie plana y delgada, ya sea cuadrada, rectangular o circular, en el seno de un flujo de aire, se observa que los diferentes fenómenos, para una velocidad de circulación de

aire constante, están íntimamente ligados al ángulo que forman la superficie y la dirección del flujo. La forma de la superficie tiene también su influencia fig (5.9).

Estos fenómenos, que pueden observarse en un túnel aerodinámico, se traducen en una presión sobre la cara delantera de la placa (la expuesta al viento) y una depresión sobre la parte trasera, las cuales pueden evidenciarse mediante manómetros.

BIBLIOTECA

Sus fuerzas, debidas a la presión y a la depresión se suman. La resultante de estas fuerzas es perpendicular a la placa y su punto de aplicación es el centro aerodinámico.

Si se denomina borde de ataque, al borde de la placa que recibe en primer lugar el impacto del aire y borde de fuga al opuesto, se observa que la presión y la depresión son mayores, en el borde de ataque y se anulan en las proximidades del borde de fuga.

La fuerza resultante  $F_r$  de la acción del aire, es perpendicular a la superficie. Su punto de aplicación depende del ángulo de incidencia fig (5.10).

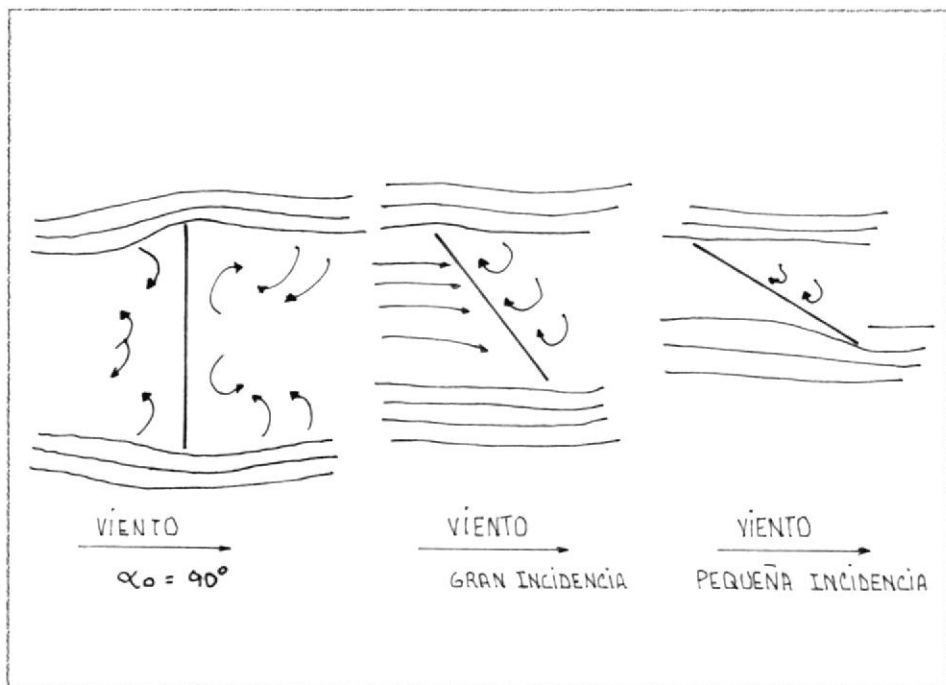


Fig.Nº5.9 ACCION DEL VIENTO SOBRE UNA PLACA PLANA Ref (6).

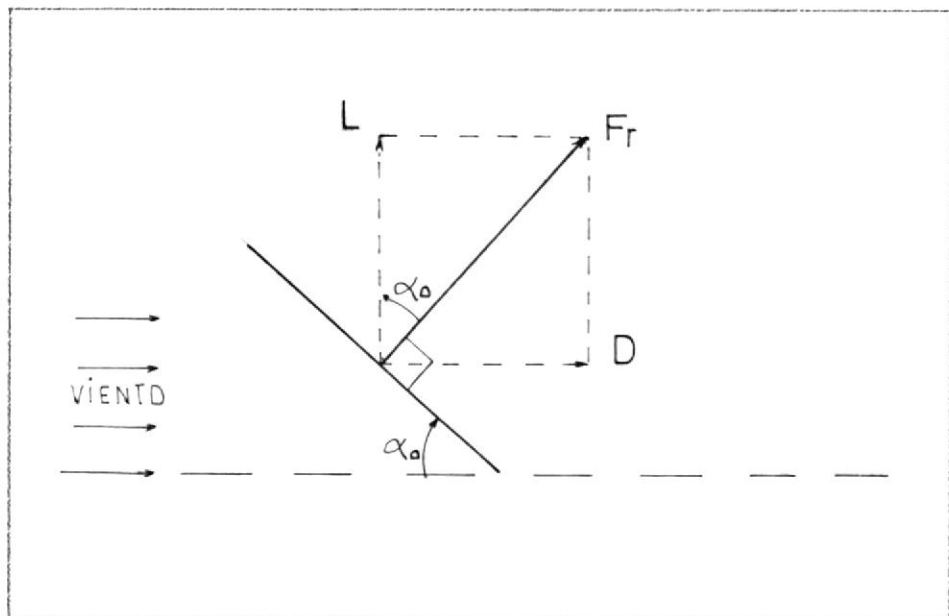


Fig.Nº5.10 DESCOMPOSICION DE LA FUERZA RESULTANTE Ref (6).

El rotor de un molino está constituido por uno o más álabes unidos a un cubo. Las secciones transversales de los álabes pueden tener diversas formas. En la fig (5.11) se observan algunas de estas formas. A las secciones transversales de una pala o álabe se las conoce con el nombre de perfiles.

#### Características de sustentación y resistencia en un perfil aerodinámico

En un álabe con perfil aerodinámico, el aire que fluye sobre él origina dos fuerzas: una de sustentación o de elevación (  $L$  ) y otra de resistencia al desplazamiento (  $D$  ). La de sustentación se mide según la dirección perpendicular a la de la corriente; en cambio la de resistencia, según la dirección paralela. La fig (5.12) indica lo expresado.

Para que las placas sustentadoras cumplan con su cometido, es necesario que el flujo de aire ataque a las mismas con un cierto ángulo. En la fig(5.13) se ve el mencionado ángulo, medido respecto de la cuerda del perfil. La cuerda es la recta que une los puntos extremos del mismo.

$$L = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_l \quad (5.14)$$

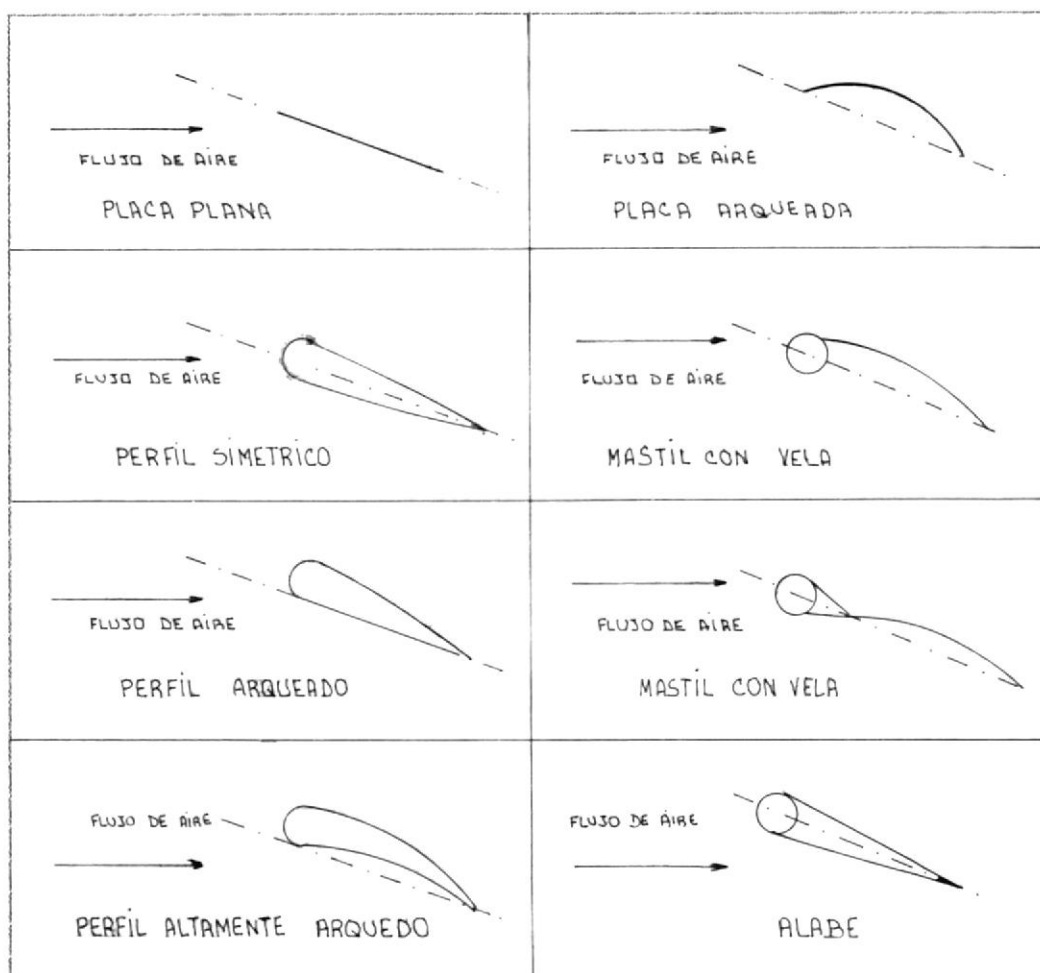


Fig. N°5.11 DIVERSOS TIPOS DE PERFILES DE ALABES.  
Ref (15).

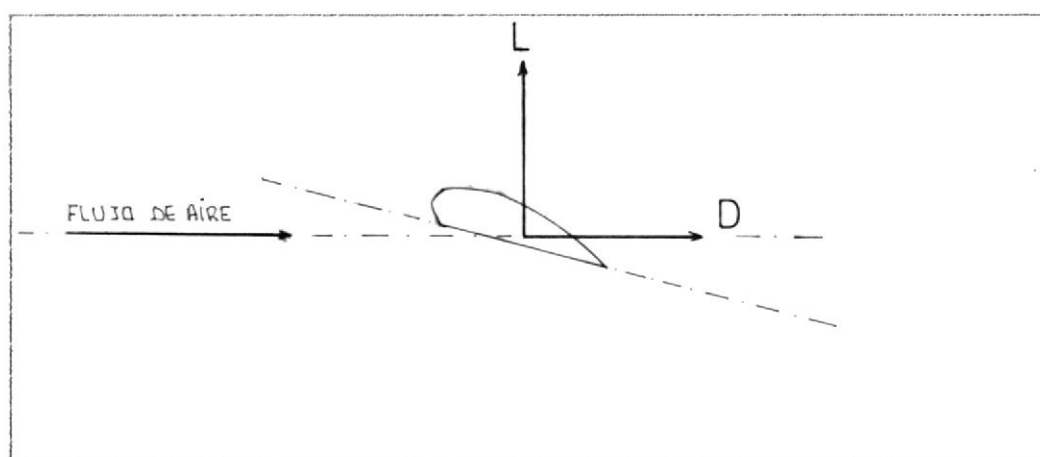


Fig. N°5.12 FUERZAS DE SUSTENTACION Y RESISTENCIA SOBRE UN ALABE AERODINAMICO Ref (15).

$$D = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_d \quad (5.15)$$

En las cuales:

$\rho$  = Densidad del aire ( kg m<sup>-3</sup> )

A = Area del álabes ( m<sup>2</sup> )

v = Velocidad de la corriente de aire ( m s<sup>-1</sup> )

C<sub>l</sub> = Coeficiente de sustentación

C<sub>d</sub> = Coeficiente de resistencia

Los coeficientes de reacción de un perfil, o sea C<sub>l</sub> y C<sub>d</sub>, se obtienen ensayando placas sustentadoras en túneles de viento. Con las magnitudes L y D, medidas en el túnel, el cálculo de los coeficientes es inmediato.

$$C_l = \frac{L}{1/2 * \rho * v^2 * A} \quad (5.16)$$

$$C_d = \frac{D}{1/2 * \rho * v^2 * A} \quad (5.17)$$

Como se mencionó anteriormente, las magnitudes de las fuerzas de sustentación y de resistencia dependen del ángulo de ataque. En la tabla VI encontramos los valores de diseño de algunos perfiles.

### Velocidad relativa del álabo de un rotor

Para obtener los coeficientes de reacción de un perfil es indistinto que el perfil se desplace respecto del aire con velocidad "w" o que el aire se desplace respecto del perfil "w". Por lo tanto, cuando hablamos de la velocidad del fluido nos referimos a la velocidad relativa fig (5.14).

La velocidad relativa de la corriente de aire que afecta al álabo de un rotor, es la resultante de las velocidades tangencial y frontal fig (5.15).

$\theta$  es el ángulo que forma la velocidad relativa con el plano de giro del rotor.

### Par y potencia característicos

La contribución del álabo, al par del rotor, está dada por el producto de la resultante, de las componentes de sustentación y de resistencia según el plano de rotación y la distancia al centro de rotación fig (5.16).

La velocidad angular  $\Omega$  del rotor, es el producto entre el número de radianes de una circunferencia y el número de vueltas que el rotor realiza en un segundo.

$$\Omega = 2 * \pi * n \quad (5.18)$$

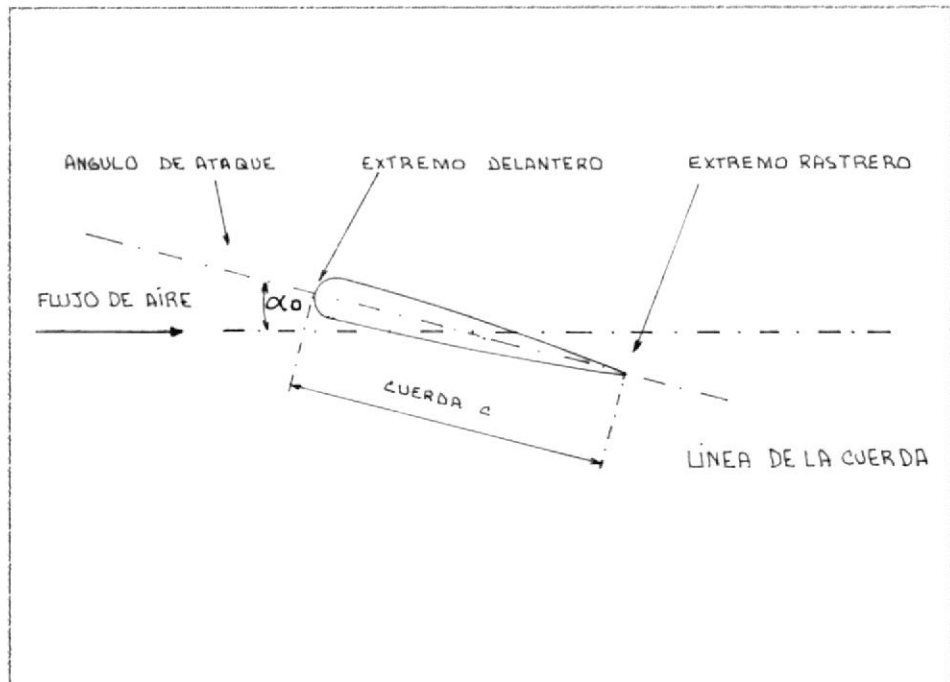


Fig. Nº5.13 CUERDA DEL PERFIL Y ANGULO DE ATAQUE  
Ref (15).

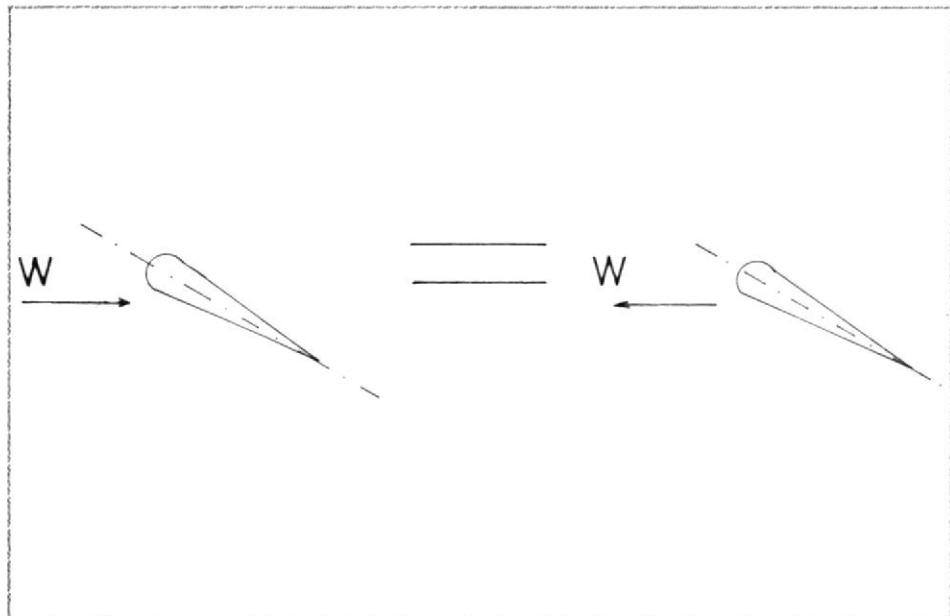


Fig. Nº5.14 VELOCIDAD RELATIVA EN UN ALABE  
Ref (15).

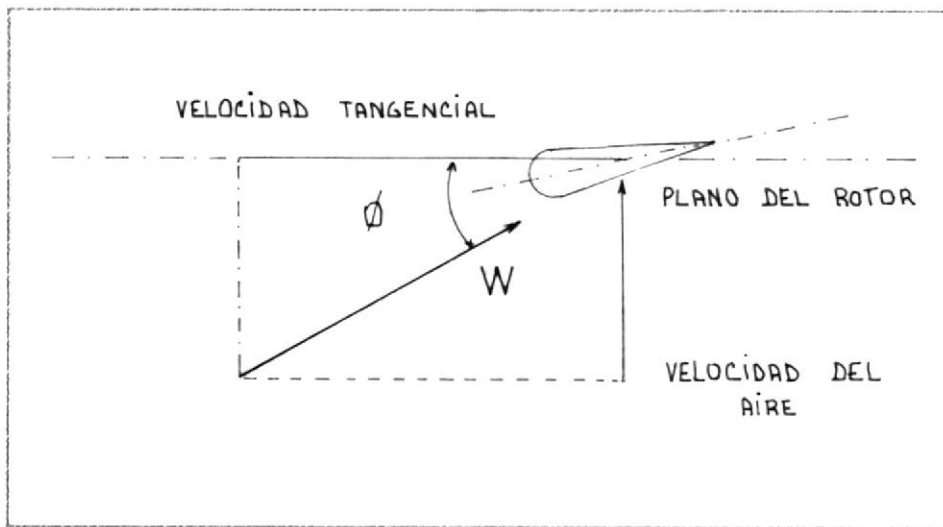


Fig.Nº5.15 VELOCIDAD RELATIVA EN EL ÁLABE DE UN ROTOR Ref (15).

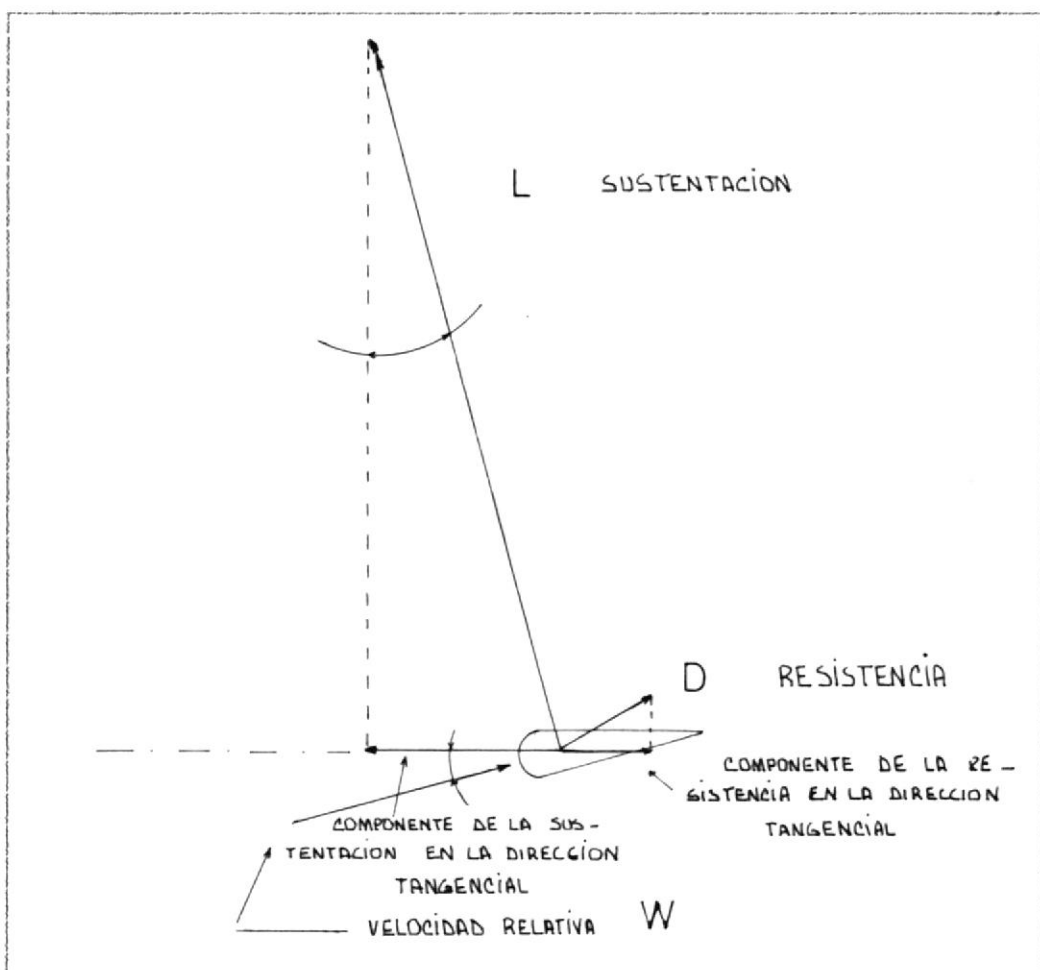


Fig.Nº5.16 COMPONENTES DE SUS-TENTACION Y RESISTENCIA SEGUN EL PLANO DE ROTACION Ref (15).

La función del rotor es transformar la energía del viento en energía mecánica. El producto entre el par desarrollado en él y su velocidad angular, determinan la potencia de salida en el eje.

$$Q = \text{Par}$$

$$\Omega = \text{velocidad angular}$$

$$\text{Potencia } P = Q * \Omega \quad (5.19)$$

La potencia que un rotor puede desarrollar depende de sus dimensiones. Para una dimensión determinada, vemos que la potencia según la ecuación (5.19) puede obtenerse empleando criterios distintos. Uno de ellos sería producir un par alto con baja velocidad angular, y otro producir un par bajo con alta velocidad angular.

El par característico de un rotor es el par que se desarrolla en él, en función de sus velocidades angulares. Las figs (5.17 y 5.18) muestran los pares característicos de los molinos de la misma potencia pero distintas velocidades angulares. El par característico depende de la velocidad del viento  $v$ , por eso en un mismo gráfico se han trazado las curvas para distintas velocidades del viento.

De la ecuación (5.19) se ve que es muy fácil obte-

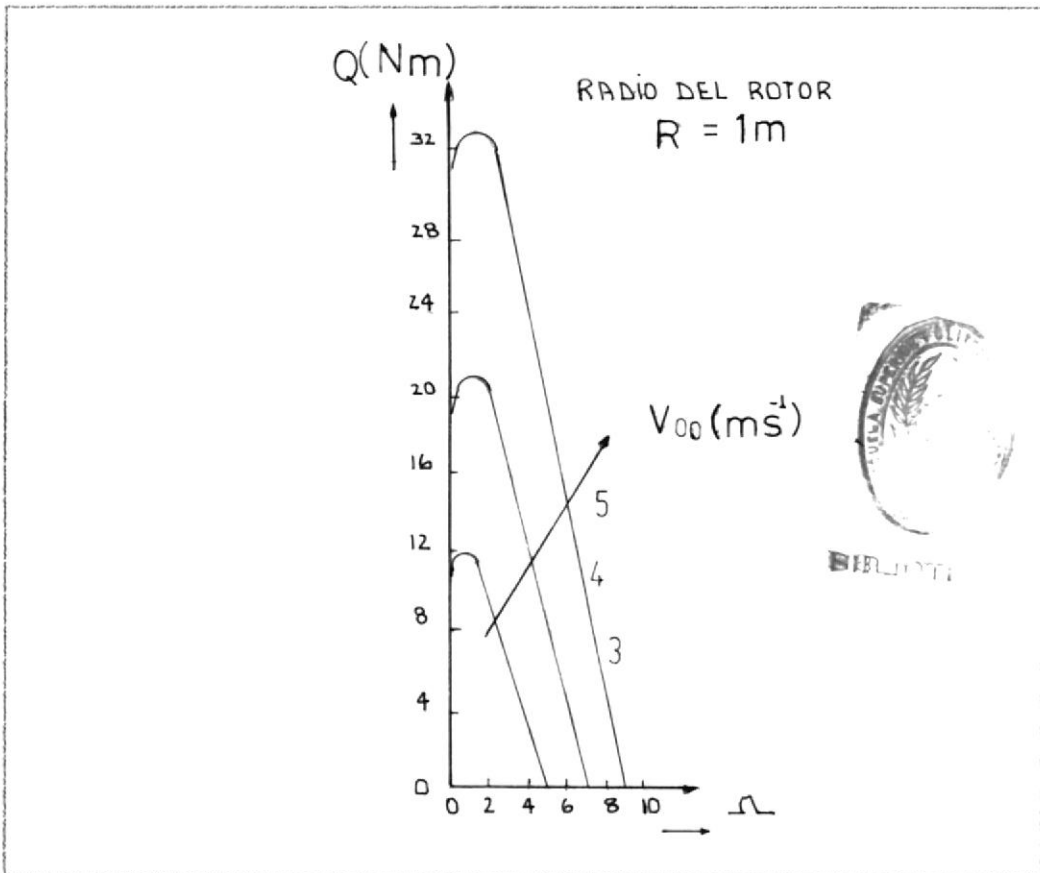


Fig.Nº5.17 TORQUE CARACTERISTICO DE UN MOLINO DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD Ref (15).

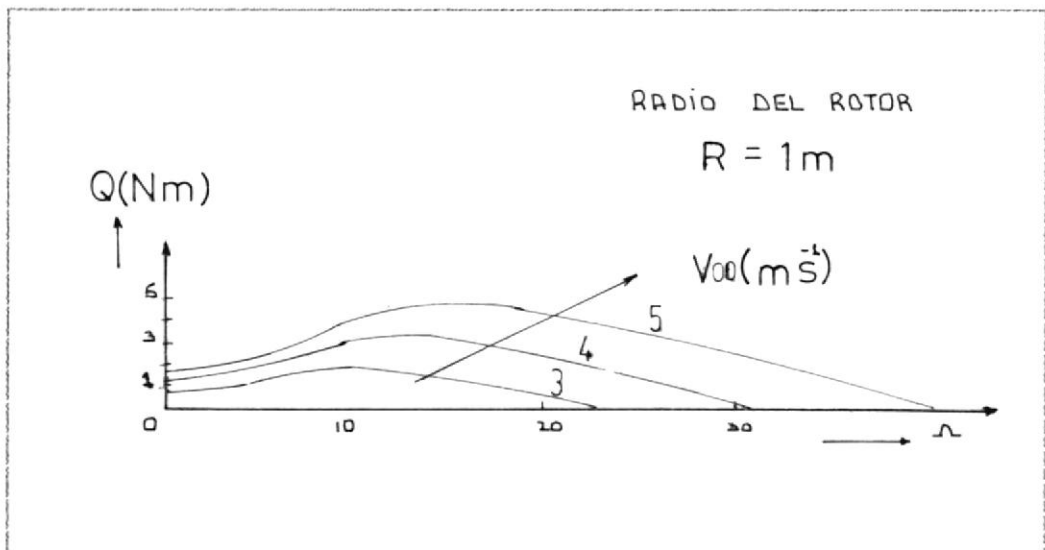


Fig.Nº5.18 TORQUE CARACTERISTICO DE UN MOLINO DE VIENTO DE ALTA VELOCIDAD Ref (15).

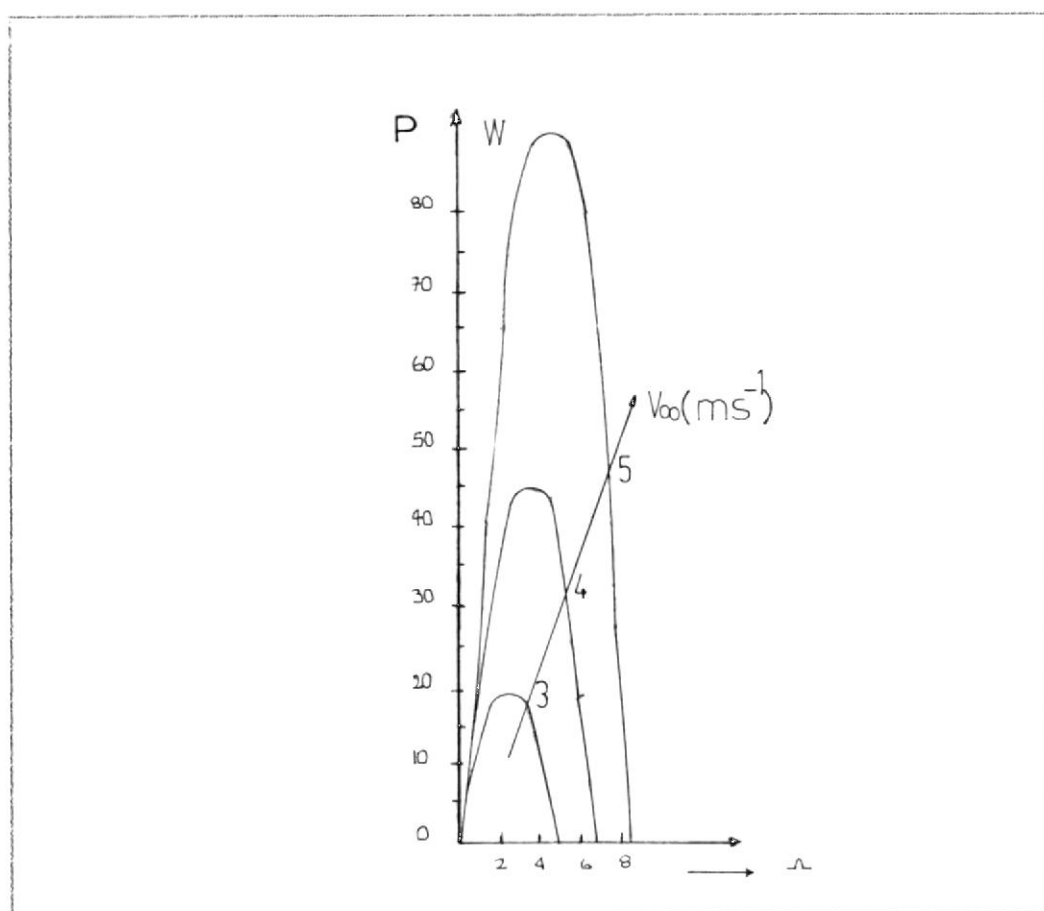


Fig.Nº5.19 POTENCIA CARACTERISTICA DE UN MOLINO DE VIENTO DE BAJA VELOCIDAD (15).

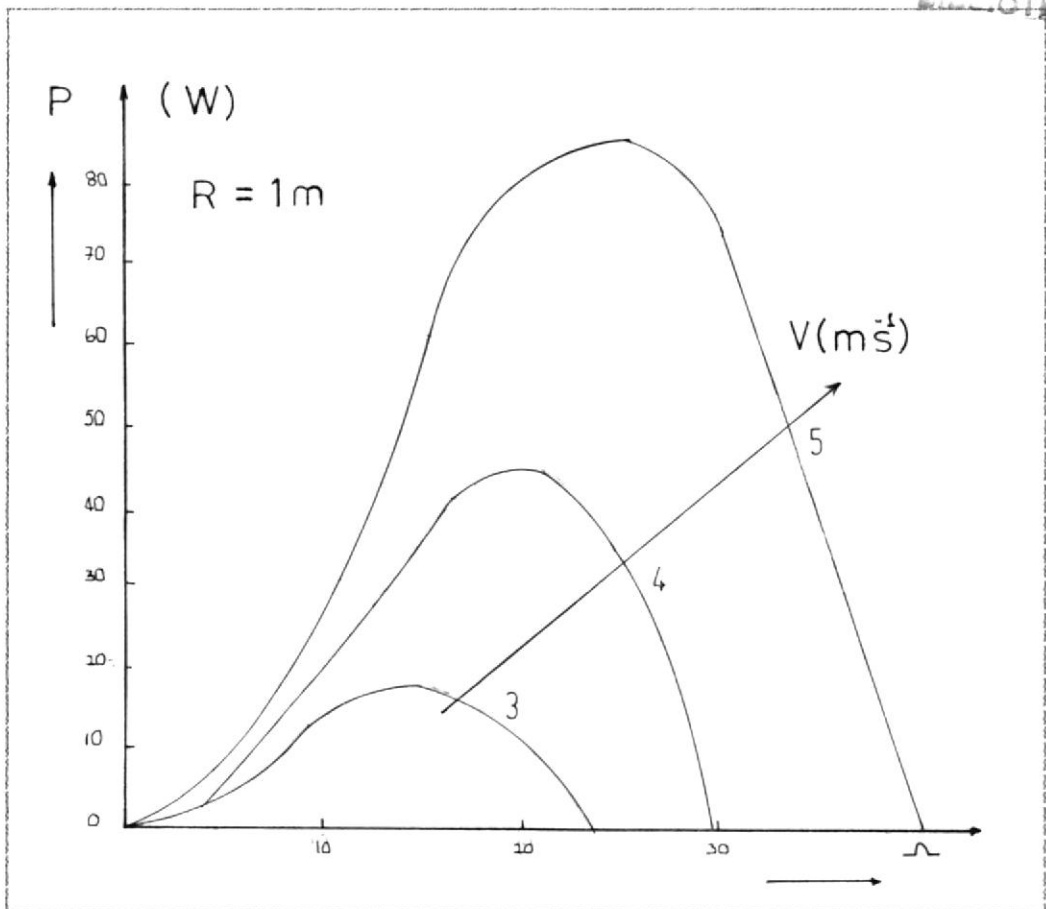


Fig. Nº5.20 POTENCIA CARACTERISTICA DE UN MOLINO DE VIENTO DE ALTA VELOCIDAD Ref (15).

ner la potencia característica de un rotor, figs (5.19 y 5.20).



#### Aplicación al caso de un aeromotor

Supongamos que la placa considerada anteriormente sea la pala de un rotor inmóvil, cuyo eje de rotación sea paralelo a la dirección del viento. Para cada pala se puede dibujar la fuerza resultante, perpendicular al perfil, aplicada en el centro de sustentación aerodinámica y dirigida según se muestra en la figura (5.21).

Descomponiendo la resultante de las fuerzas aerodinámicas en un punto de la pala. Las palas empiezan a girar. De ello resultan:

Dos fuerzas  $\vec{A}_1$  y  $\vec{A}_2$  paralelas en el mismo sentido que tienden a desplazar al rotor con un movimiento de traslación en la dirección del viento.

Dos fuerzas  $\vec{S}_1$  y  $\vec{S}_2$  paralelas y en diferentes sentidos ( que tienden a desplazar el rotor con un movimiento de rotación ). Estas dos fuerzas de sustentación crean un par rotor que tiende a girar el rotor en un plano perpendicular a la dirección del viento.

Si se dejan libres las palas, bajo la acción de las fuerzas  $\vec{S}_1$  y  $\vec{S}_2$  el rotor girará. Y el viento que ve la pala será la composición de la acción

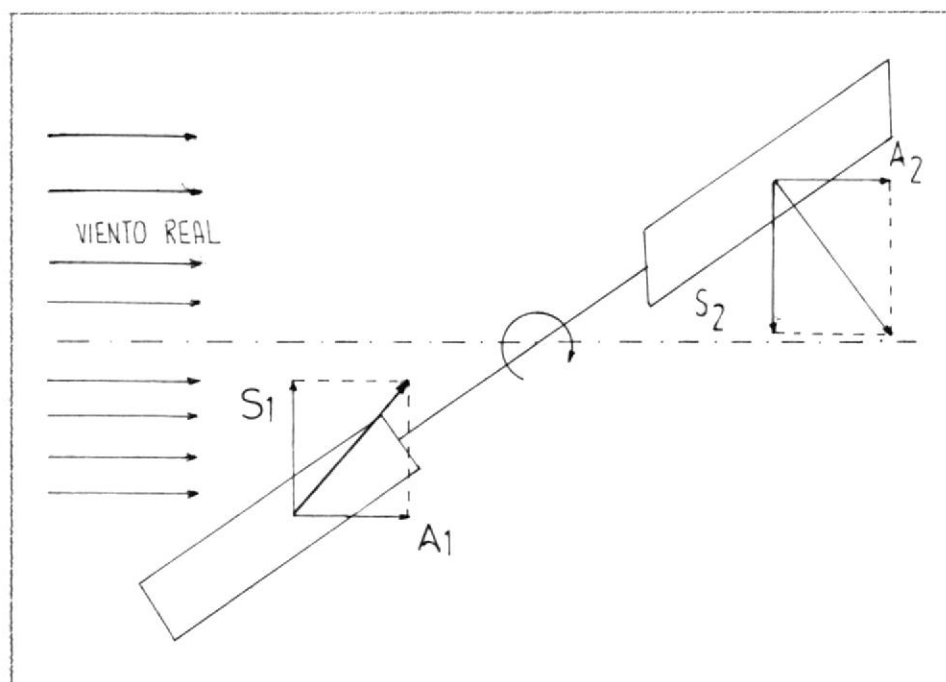


Fig.Nº5.21 DESCOMPOSICION DE LA RESULTANTE DE LAS FUERZAS AERODINAMICAS EN UN PUNTO DE LA PALA Ref(6).

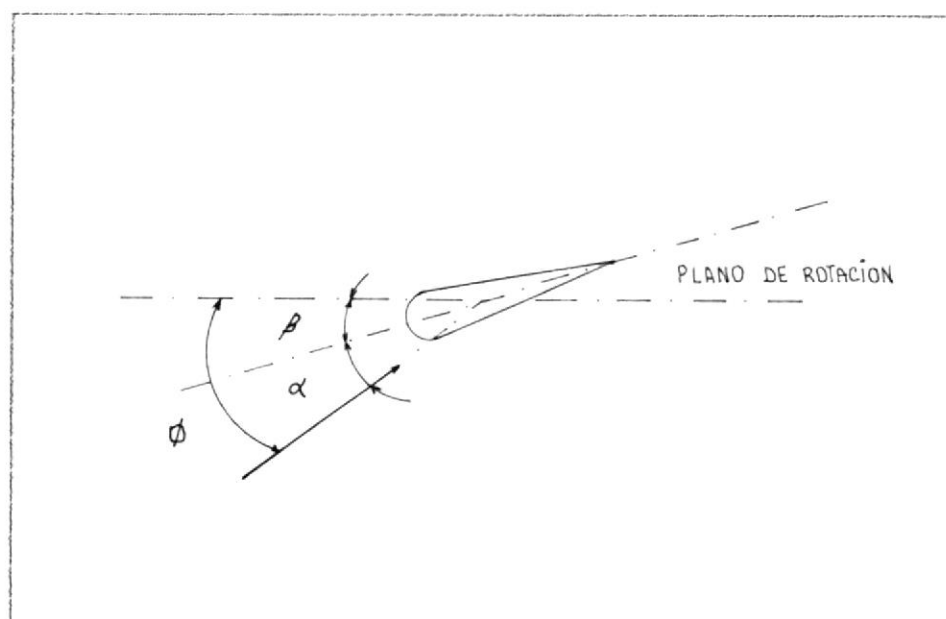


Fig.Nº5.22 POSICION DEL ALABE Ref(15).

real del viento y la acción del viento creado por el giro de las pala. Este viento resultante se denomina viento aparente o relativo, su notación "W".

Ahora bien, el viento creado por el movimiento de desplazamiento de las palas varia a lo largo de la misma, en todos sus puntos, pero proporcionalmente a su distancia al eje de rotación, por otra parte esta velocidad es proporcional a la velocidad de rotación.

Al igual que en el caso anterior, la resultante de las fuerzas aplicadas a este elemento de pala es perpendicular a la pala y puede descomponerse en dos fuerzas L y D.

L = Fuerza de sustentación, perpendicular a la dirección del viento relativo.

D = Fuerza de arrastre, de sentido igual al del viento aparente.

#### Las palas del aeromotor

Las palas son una parte muy importante del aeromotor. De su naturaleza dependen el buen funcionamiento y la duración de la vida de la máquina, así como su rendimiento.

Hay muchos elementos que caracterizan estas palas:



- longitud
- anchura
- perfil
- materiales
- número

Entre estos elementos, algunos se determinan por la hipótesis del cálculo potencia y par. Por orden de importancia son: longitud, perfil y anchura.

Los otros se eligen en función de criterios tales como: costo, resistencia a las condiciones climáticas de trabajo, etc.

#### La longitud de las paletas

El diámetro de las paletas están en función de la potencia deseada. La determinación de éste fija también la frecuencia de rotación máxima, que la hélice no deberá pasar, para evitar las tensiones en las puntas de las paletas, debida a la fuerza centrífuga. Es esencial tener en cuenta la fatiga de las paletas y los riesgos de vibraciones, sobre todo para las paletas muy largas.

Se deberá tomar en cuenta la relación entre la velocidad en la punta de la pala ( $U$ ) y la del viento natural o real  $v$ . Esta relación determina, en efecto, el rendimiento de la hélice en relación

al límite de Betz, según el tipo de máquina.

### El perfil

Se elige en función del par deseado, cada perfil proporciona para el ángulo óptimo un par, cuando ya se ha elegido el perfil y la velocidad de giro, para la velocidad nominal del viento.

Sin embargo, la mayoría de los aeromotores de más de 100 Kw tiene las pañas alabeadas.

A cada perfil se le ha asociado generalmente el nombre del laboratorio y un mínimo de referencias, Ref. ( 6 ).

### Anchura (longitud de la cuerda del perfil)

La anchura de las pañas no interviene en la potencia del aeromotor, que es función de la superficie barrida.

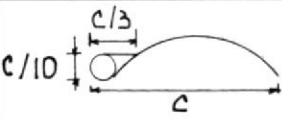

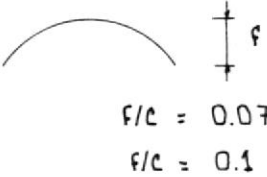
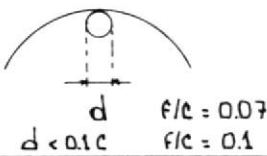
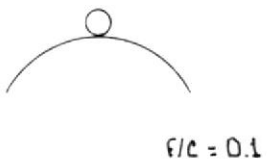
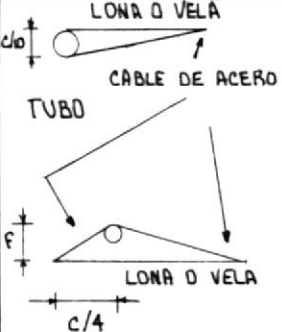
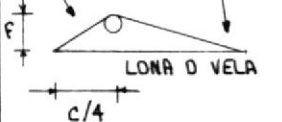
La anchura interviene en el par de arranque, que será mayor cuando más ancho sea la paña, pero para obtener velocidades de rotación elevadas se prefieren las palas finas y ligeras. El resultado será un compromiso entre los dos factores.

### Materiales

No es la propia aerodinámica en donde está la di-

TABLA VI Ref (15).

CARACTERISTICAS DE DISEÑO DE DIVERSOS TIPOS DE ALABES.

NOMBRE DEL PERFIL	DESCRIPCION GEOMETRICA	$(C_d/C_l)$	$\alpha_0$	$C_l$
MASTIL Y VELA		0.1	5	0.8
PLACA DE ACERO PLANA		0.1	4	0.4
PLACA DE ACERO ARQUEADA		0.02 0.02	4 3	0.9 1.25
PLACA DE ACERO ARQUEADA CON UN TUBO EN EL LADO CONCAVO		0.05 0.05	5 4	0.9 1.1
PLACA DE ACERO ARQUEADA CON UN TUBO EN EL LADO CONVEXO		0.2	14	1.25
VELA DE NAVEGACION		0.5	2	1.0
VELA DE NAVEGACION DE DOS FASES		0.1	4	1.0

ficultad, sino en la construcción y la resistencia de los materiales de la pala.

El material utilizado para las palas debe responder a los aeromotores modernos a frecuencias elevadas de rotación y a otras exigencias, a veces contradictorias:

- ligero
- perfectamente homogéneos para facilitar la producción en serie
- resistencias a la fatiga mecánica
- resistencia a la erosión y corrosión
- de uso y producción sencillos
- costo bajo, para que el aeromotor se pueda vender.

#### Dispositivos de orientación

Los aeromotores de eje horizontal necesitan una orientación permanente de la máquina en una dirección paralela a la del viento, para disminuir los esfuerzos y la pérdida de potencia.

Existen muchos dispositivos de orientación elegidos generalmente de acuerdo con la potencia del aeromotor, son parte del buen funcionamiento de la instalación eólica.

Los aeromotores de eje horizontal están sometidos

a fuertes esfuerzos durante los cambios bruscos de orientación originados por los cambios de velocidad y dirección del viento. Estos esfuerzos son mayores cuanto mayor sean las aceleraciones que se producen en un cambio de dirección.

Los cambios de dirección y las variaciones de frecuencia de rotación provocados por las ráfagas son el origen de vibraciones nefastas para el buen funcionamiento del aeromotor.

El sistema de orientación deberá cumplir con la condición necesaria de mantener el rotor cara al viento sin provocar grandes cambios de dirección del rotor, cuando se produzcan cambios rápidos en la dirección del viento.

Para los aeromotores de pequeña y mediana potencia, cuya hélice está situada cara al viento, el dispositivo de orientación es una cola, construida generalmente por una superficie plana (placa metálica ó de madera) situada en el extremo de un soporte unido al cuerpo del aeromotor.

Esta superficie se determina experimentalmente situando la máquina prototipo en un lugar donde la corriente de aire este perturbada y buscando la superficie óptima de la cola.



BIBLIOTECA

Cuando la cola se sitúa en el eje del aeromotor, la longitud de soporte juega una función importante, puesto que cuanto más largo sea menos se situará en la zona de turbulencia del aeromotor, originada por el giro de la hélice.

#### Número de palas

Los aeromotores con par de arranque elevado, son los de hélices multipalas conocidos por todo el mundo para el bombeo de agua y cuyo par de arranque es proporcional al número de palas y al diámetro. Su rendimiento respecto al límite de Betz es pequeño, puesto que la velocidad de la punta de la pala está limitada, su diámetro máximo es de 8 metros. Las maquinarias que se construían antes eran generalmente tripalas, pero en la actualidad suelen ser bipalas, aunque sean de pequeña o gran potencia.

#### **5.4. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO**

El número de álabes  $B$  afecta el coeficiente de potencia. Los molinos que tienen relaciones de velocidades muy bajas emplean un gran número de álabes ver tabla VII. En este caso la influencia de  $B$  sobre  $C_p$  es muy grande.

La elección de un gran número de álabes " $B$ " para una elevada relación de velocidades " $\lambda_0$ " conducirá

a álabes muy pequeños y delgados, los cuales originarán problemas en su fabricación y una influencia negativa sobre las propiedades de sustentación y de resistencia de estos.

---



---

TABLA VII Ref(15).

SELECCION DEL NUMERO DE ALABES DE UN MOLINO DE EJE HORIZONTAL.

---



---

$\lambda_0$	B
1	6 - 20
2	4 - 12
3	3 - 6
4	2 - 4
5 - 8	2 - 3
8 - 15	1 - 2

Un segundo factor que afecta el coeficiente de potencia es la resistencia aerodinámica a través de la relación  $C_d/C_l$ . Esta relación tendrá influencia en el tamaño del rotor y aún más en la relación de velocidades de diseño.

En la tabla VI se observa una lista de varios tipos de perfiles con la correspondiente relación  $C_d/C_l$ . De acuerdo a esta tabla, los valores de

$C_d/C_1$  oscilan entre 0.1 y 0.01.

Si la relación  $C_d/C_1$  es muy alta, se restringe el valor del diseño. Para una baja relación de velocidades el aumento del número de paletas compensa la pérdida de potencia debido a la resistencia.

Para un rango de velocidades de diseño comprendidas entre  $1 \leq \lambda_o \leq 10$  el máximo coeficiente de potencia teóricamente obtenible varía desde 0.35 hasta 0.5.

Debido a observaciones de la geometría ideal y pérdida en el cubo por ejemplo, estos máximos varían entre 0.3 y 0.4. Este resultado indica que la elección de la relación de velocidades de diseño  $\lambda_o$  afecta fuertemente la potencia de salida. Existen sin embargo otros dos factores que limitan la elección de la relación de velocidades de diseño. Uno es el carácter de la carga. Si ella es una bomba de pistón, o alguna otra carga de rotación lenta que requiera un alto par de arranque, la velocidad de diseño del rotor usualmente será elegida baja; esto permite al diseñador usar perfiles simples velas o placas de acero. Si la carga es de rotación rápida como es el caso de un aerogenerador o bomba centrífuga, entonces es conveniente seleccionar una velocidad de diseño alta, prefiri-

riendose perfiles que posean una baja relación  $\bar{C}_d/\bar{C}_1$ .

El segundo factor es el de la tecnología local a emplear. Generalmente este factor restringe la posibilidad de manufacturar álabes con perfiles que tengan relaciones  $\bar{C}_d/\bar{C}_1$  bajas. Aún en el caso de una alta velocidad de diseño, perfiles simples como las placas de acero pueden dar muy buenos resultados.

El diseño del rotor podemos hacerlo para una velocidad de viento  $v$  y demanda de potencia  $P$ , haciendo caso omiso de los problemas relacionados con el par de arranque y la frecuencia angular de carga. Seleccionando en la tabla VI un perfil en los términos de la mínima relación  $\bar{C}_d/\bar{C}_1$  esperada, podemos elegir una relación de velocidad  $\lambda_0$  de diseño Ref(15).

Con la tabla VII se elige el número de álabes, recurriendo al apéndice A podemos encontrar el coeficiente de potencia  $C_{pmax}$  que puede ser esperado.

Para el diseño de palas necesitamos los siguientes datos:

- radio del rotor  $R$  (m)
- número de álabes  $B$  (-)
- relación de velocidades de diseño del extremo

del álabe  $\lambda_0$  (-)

- dato del perfil  $\bar{c}_{10}$  (-)

- ángulo de ataque correspondiente  $\alpha_0$  (-)

Una vez que estos datos sean conocidos, resulta muy fácil calcular la geometría del álabe, Ref (15) por ejemplo la cuerda  $c$ , el ángulo  $\alpha_0$  y el ángulo entre la cuerda y el plano de rotación  $\beta$  ver fig (5.22).

Solamente hacen falta tres fórmulas sencillas y un gráfico.

$$\lambda_r = \lambda_0 * \frac{r}{R} \quad (5.20)$$

$$c = \frac{8\pi * r}{\bar{B} * \bar{c}_1} (1 - \cos \vartheta) \quad (5.21)$$

$$\beta = \vartheta - \alpha_0 \quad (5.22)$$

y el gráfico  $\lambda_r - \vartheta$ . Apéndice (B).

#### Procedimiento de diseño

Dividir el álabe de radio  $r$  en un número de partes de igual longitud. En esta forma encontramos las secciones transversales del álabe. Cada sección transversal está a una distancia  $r$  del centro del rotor y tiene una relación de velocidad local  $\lambda_r$  de acuerdo a la ecuación (5.20).

En el apéndice B encontramos el correspondiente ángulo  $\theta$  ver fig (5.22) para cada sección transversal, es el ángulo que forma la velocidad relativa  $\vec{w}$  respecto al plano de rotación a la distancia  $r$ . Ahora calculemos la cuerda con la ecuación (5.21). Para facilitar la tarea se agrega la diferencia  $(1 - \cos \theta)$ , es el gráfico del apéndice B. El ángulo de la placa en correspondencia con el radio  $r$  se encuentra con la ecuación (5.22).

#### Valores de diseño

Se tuvieron ciertas restricciones para seleccionar y dimensionar el aparato las cuales fueron, que debería ser sensible a pequeñas velocidades de viento, ya que la velocidad promedio en la costa está entre 2 y 3 metros por segundo, necesitamos un elevado torque, siendo esto lo que se va a aprovechar para mover la mayor cantidad de agua posible, además la construcción debe ser lo más sencilla y de el menor costo de inversión, otro factor es el tamaño de la pileta a usar, esta fue de 3.5\*3.5\*1.2 metros.

Para poder lograr los requerimientos anteriores se escogió  $\lambda_0 = 1$ .


Se seleccionó el tipo de álabe con el cuál se iba a trabajar, de la tabla VI el que proporciona los

mejores resultados, es decir que proporcione la mínima relación de  $C_d/C_l$ , la cual fue la placa de acero arquada con  $f/c=0.1$ .

El tamaño del rotor fue de 1.2 m. de diámetro, y para la construcción del mismo se utilizaron los materiales disponibles en el mercado y de uso común.

Con el valor de  $\lambda_0=1$  se seleccionó el número de álabes recurriendo a la tabla VII se escogieron 12 álabes.

TABLA VIII. SECCIONES TRANSVERSALES DEL ALABE DEL MOLINO.



NODE LA SECCION TRANSVERSAL.	R (m)	$\lambda_r$	$\theta$	$\alpha_0$	$\beta$	c(m)
1	0.03	0.05	58.13	3	55.13	0.02378
2	0.06	0.10	56.26	3	53.26	0.04480
3	0.09	0.15	54.38	3	51.38	0.06333
4	0.12	0.20	52.51	3	49.51	0.07895
5	0.15	0.25	50.64	3	47.64	0.07895
6	0.18	0.30	48.97	3	45.97	0.09194
7	0.21	0.35	47.3	3	44.3	0.10396
8	0.24	0.40	45.63	3	42.63	0.11386
9	0.27	0.45	43.96	3	40.96	0.12164
10	0.30	0.50	42.30	3	39.30	0.12728
11	0.33	0.55	40.92	3	37.92	0.13080
12	0.36	0.60	39.54	3	36.54	0.13557
13	0.39	0.65	38.20	3	35.20	0.13884
14	0.42	0.70	36.80	3	33.80	0.14058
15	0.45	0.75	35.42	3	32.42	0.14081
16	0.48	0.80	34.34	3	31.34	0.13950
17	0.51	0.85	33.26	3	30.26	0.14060
18	0.54	0.90	32.20	3	29.20	0.14607
19	0.57	0.95	31.10	3	28.10	0.13920
20	0.60	1.00	30.00	3	27.00	0.13468

BIBLIOTECA

## 5.5. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE CAMPO Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Terminada la construcción del aerador, realizada en el taller de Conversión de energía de la ESPOL, fig (5.23), se procedió a su balanceamiento.

Se realizaron pruebas: de sensibilidad con respecto al viento; es decir que girara a pesar de existir pequeñas velocidades de viento, de flotabilidad, siendo necesario regular las posiciones para diferentes longitudes sumergidas de paletas, de orientación, probandose los cambios de posición del aerador con respecto a los cambios de dirección del viento, de su maniabilidad es decir su fácil manejo, figs (5.24 y 5.25), pruebas realizadas en la piscina de la ESPOL.

Al principio se penso en realizar los analisis de OD y de DBD, es decir oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno, en los laboratorios del Instituto Química y de la Facultad de Ingeniería Marítima de la ESPOL, pero debido a los elevados costos del primero y a la imposibilidad de realizar el segundo por tener los equipos comprometidos con anterioridad. Se tuvo que recurrir a la compra de un Kit de oxigenación para realizar uno mismo los análisis de las muestras de agua para el OD o



Fig.Nº5.23

CONSTRUCCION DEL AERADOR



Fig.Nº5.24

MONTAJE DEL AERADOR EN LA PISCINA  
DE LA ESPOL.



Fig.Nº5.25

PRUEBAS DE: ORIENTACION Y VARIACIONES DE LAS LONGITUDES DE PALA SUMERGIDA (ESPOL).



Fig.Nº5.26

LLENADO DE LA CISTERNA (SAUCES).



Fig.Nº5.27

PRUEBAS DEL AERADOR EN LOS SAUCES.



Fig.Nº5.28

PALETA SUMERGIDA AGITACION DEL  
AGUA (SAUCES).

oxígeno disuelto. Se construyó una pileta de 3.5 \* 3.5\*1.2 metros más que todo por los requerimientos de espacio, ya que la misma se la colocó en el centro de las 4 lagunas de oxidación, es decir de aguas servidas, porque presentaba facilidades para el bombeo de estas hacia la cisterna, luego se obtuvo el préstamo de una bomba para realizar las operaciones de llenado de la cisterna fig (5.26).

Se colocó el aerador en la cisterna, procediendo a anclarlo en el centro, evitando así que chocara con las paredes de la misma, luego verificó si es que cumplía con su objetivo que era el de agitar el agua, figs (5.27 y 5.28). Se tomaron muestras de estas aguas a diferentes horas y con diferentes criterios para poder sacar así la mayor cantidad de conclusiones posibles.

#### **5.6. ANALISIS DE LOS RESULTADOS**

Se puede observar de la tabla IX, que sus valores de DD nos presentan los mejores resultados, estos son cuando la longitud sumergida de la pala fué de 0.05 metros no solo en lo que respecta a una elevación constante de estos a las diferentes horas del día durante los tres días de muestreo, sino que lo más importante que nos hacen notar es que trabajando el aerador durante el día y la noche,

al día siguiente el nivel de oxígeno no es crítico sino que tiene un nivel significativo, lo cual posibilitaría que existiera vida en dichas aguas, ya se ha hecho notar en capítulos anteriores que es en las primeras horas de la mañana donde se produce el descenso brusco de oxígeno, sobre todo en las aguas servidas apéndice (C).

En la tabla X cuando la longitud sumergida de la pala fue de 0.03 metros, se obtienen resultados ascendentes a las diferentes horas del día pero no son tan notorios como en el caso anterior, y el nivel de OD de las primeras horas no es elevado apéndice (C).

En la tabla XI se tomaron las pruebas con una longitud sumergida de pala de 0.05 metros, los valores se obtuvieron para diferentes horas, dándonos cuenta que el primer valor para las 8:20 era bastante elevado pero esto se debe a que se procedió al bombeo minutos antes de realizar la prueba siendo esta agitación la que causo este elevado valor de OD, luego se mantiene sin mayores variaciones durante las casi 4 horas siguientes debido al efecto del aerador, siendo más elevado en las horas de la tarde, en estas pruebas se retiró el aerador a las 16:00 horas, y notamos que hubo un descenso en los valores de OD en las primeras ho-

ras del día siguiente, el cual no fue hasta niveles críticos para luego con el transcurso de las horas llegar a niveles más altos, apéndice (C).

Con los valores de la tabla XII se trató de conocer las variaciones de OD en la misma cisterna pero sin colocar el aerador, como se esperaba los valores de las primeras horas de la mañana fueron bajos ( 1.4, 0.4, 0.4 ) valores que no son muy útiles ni para las lagunas de oxidación, ni mucho menos para los criaderos de peces, conformen avanzan las horas los niveles de OD llegan hasta la supersaturación del agua desde las 12 hasta las 16 horas, lo cual es negativo para los criaderos, pues esto ocasionaría enfermedades en los peces, apéndice (C).

Con los valores de las tablas XIII y XIV se trata de comparar con la misma agua pero en diferentes días, las variaciones con respecto a diferentes longitudes de pala sumergida siendo estas de 0.03 y 0.05 metros, se tomaron muestras a diferentes horas, y notamos que lo mejores resultados se obtuvieron con el aerador trabajando a una longitud de 0.05 metros y otra cosa importante de hacer notar es que las variaciones con respecto a 15 minutos después de ocultarse el sol son grandes lo que nos da una idea de los valores nocturnos.

Con respecto a los valores de las tablas XIII y XIV estas muestras fueron tomadas cuando el agua presentaba presencia de grasa, lo cual imposibilitaba que los rayos solares cumplieran con su cometido, afectando enormemente el proceso de oxidación (oxigenación), los valores de OD son pequeños pero sin el aerador no tendrían ni eso ya que con la agitación continua se destruye parcialmente la capa de grasa, aunque esta se agrupa de nuevo y dificulta el proceso, apéndice (C).

Es muy importante hacer notar que estos trabajos se realizaron con aguas servidas o negras, en las cuales hay abundancia de todo tipo de algas, grandes cantidades de sales, desechos orgánicos así como de grasa, lo cual dificulta el poder tener una relación exacta de el volumen posible a aerar ni la cantidad de oxígeno suministrado al agua, a través de este trabajo se logro demostrar que se puede aplicar esto a cualquier tipo de agua, ya que se trabajo con la más crítica y la que presentaba las peores condiciones para su oxigenación, también es importante recordar que el contenido de saturación de oxígeno en las aguas servidas es del 95% del de las aguas limpias .

TABLA IX.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TESIS "OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO ENERGIA EOLICA".

DIA (FECHA)	MARTES 1 DE DICIEMBRE 87			MIERCOLES 2 DE DICIEMBRE 87			JUEVES 3 DE DICIEMBRE 87
	8.20	12.00	16.00	8.20	12.00	16.00	8.20
TEMPERATURA DEL AGUA °C	24.50	25.20	26.20	23.00	24.40	26.00	23.00
DD SATURACION mg/litro	7.77	7.69	7.56	7.96	7.78	7.59	7.96
VOLUMEN PROMEDIO DE LA PILETA (m <sup>3</sup> )	8.00						
LONGITUD SUMERGIDA DE LA PALA (m)	0.05						
DD MUESTRA mg/litro	0.80	6.20	9.00	6.00	10.20	13.20	4.60
EFICIENCIA DE OXIGENACION % DE SATURACION	10.30	80.63	119.00	75.38	131.11	173.91	57.79

## OBSERVACIONES:

Variaciones del DD del agua de la cisterna con el aerador trabajando durante el día y la noche con una longitud de paleta sumergida de 0.05m, se bombeó el día anterior.

TABLA X.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TESIS "OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO ENERGIA EOLICA".

DIA (FECHA)	JUEVES 26 DE NOVIEMBRE 87			VIERNES 27 DE NOVIEMBRE 87			SABADO 28 DE NOVIEMBRE 87
	HORA	8.20	12.00	16.00	8.20	12.00	16.00
TEMPERATURA DEL AGUA °C	25.50	26.50	28.00	23.50	25.00	28.00	24.00
DD SATURACION mg/litro	7.65	7.52	7.36	7.90	7.70	7.36	7.83
VOLUMEN PROMEDIO DE LA PILETA (m <sup>3</sup> )	8.00						
LONGITUD SUMERGIDA DE LA PALA (m)	0.03						
DD MUESTRA mg/litro	0.80	4.20	4.55	0.50	2.30	3.40	0.80
EFICIENCIA DE OXIGENACION % DE SATURACION	10.46	55.85	61.82	6.33	29.87	46.20	10.22

## OBSERVACIONES:

Variaciones del DD del agua de la cisterna ,con el aerador trabajando durante el día y la noche con una longitud sumergida de paleta de 0.03m, se bombeó el día anterior.

TABLA XI.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TESIS "OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO ENERGIA EOLICA".

DIA (FECHA)	LUNES 14 DE DICIEMBRE 87			MARTES 15 DE DICIEMBRE 87		
	HORA	8.20	12.00	16.00	8.20	12.00
TEMPERATURA EL AGUA °C	27.00	28.40	26.00	25.80	27.00	28.20
OD SATURACION mg/litro	7.46	7.32	7.59	7.60	7.46	7.33
VOLUMEN PROMEDIO DE LA PILETA (m <sup>3</sup> )	8.00					
LONGITUD SUMERGIDA DE LA PALA (m)	0.05					
OD MUESTRA mg/litro	7.20	6.70	11.80	3.00	7.00	9.00
EFICIENCIA DE OXIGENACION % DE SATURACION	96.51	91.53	155.47	39.47	93.83	122.71

## OBSERVACIONES:

Variaciones del OD del agua de la cisterna con el aerador trabajando solamente el día con una longitud sumergida de paleta de 0.05m, se bombeó el mismo día de la prueba, siendo esta la razón de que el primer valor sea elevado.

TABLA XII.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TESIS "OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO ENERGIA EOLICA".

DIA (FECHA)	JUEVES 26 DE NOVIEMBRE 87			VIERNES 27 DE NOVIEMBRE 87			SABADO 28 DE NOVIEMBRE 87
	HORA	8.20	12.00	16.00	8.20	12.00	16.00
TEMPERATURA DEL AGUA °C	24.80	33.00	31.20	25.20	32.50	31.20	24.60
OD SATURACION mg/litro	7.73	6.86	7.03	7.69	6.90	7.03	7.76
VOLUMEN PROMEDIO DE LA PILETA (m <sup>3</sup> )	8.00						
LONGITUD SUMERGIDA DE LA PALA (m)	SIN TRABAJAR EL AERADOR						
OD MUESTRA mg/litro	1.40	14.00	15.20	0.40	9.00	8.10	0.40
EFICIENCIA DE OXIGENACION % DE SATURACION	18.11	204.08	216.21	5.20	130.43	115.22	5.15

## OBSERVACIONES:

Variaciones de OD en el agua de la cisterna, sin trabajar el aerador, se bombeó el día anterior

TABLA XIII.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TESIS "OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO ENERGIA EOLICA".

DIA (FECHA)	LUNES 23 DE NOVIEMBRE 87			
HDRA	9.20	16.00	18.15	18.30
TEMPERATURA DEL AGUA °C	24.60	27.00	26.70	26.60
OD SATURACION mg/litro	7.76	7.47	7.50	7.51
VOLUMEN PROMEDIO DE LA PILETA (m <sup>3</sup> )	8.00			
LONGITUD SUMERGIDA DE PALA (m)	0.03			
OD MUESTRA mg/litro	1.00	1.50	1.10	0.70
EFICIENCIA DE OXIGENACION % DE SATURACION	12.89	20.01	14.67	9.32

## OBSERVACIONES:

Variaciones de OD del agua de la cisterna con el aerador trabajando con una longitud de pala sumergida de 0.03m, se bombeó el día anterior, y las muestras se tomaron a diferentes horas.

Se notó la presencia de grasas en el agua.

TABLA XIV.

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TESIS "OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO ENERGIA EOLICA".

DIA (FECHA)	LUNES 23 DE NOVIEMBRE 87			
HORA	9.20	12.00	16.30	17.45
TEMPERATURA DEL AGUA °C	24.20	26.00	28.20	28.00
DD SATURACION mg/litro	7.81	7.59	7.33	7.36
VOLUMEN PROMEDIO DE LA PILETA (m <sup>3</sup> )	8.00			
LONGITUD SUMERGIDA DE PALA (m)	0.05			
DD MUESTRA mg/litro	1.30	2.80	3.70	3.00
EFICIENCIA DE OXIGENACION %DE SATURACION	16.64	36.89	50.48	40.76

## OBSERVACIONES:

Variaciones de DD del agua de la cisterna ,con el aerador trabajando durante el día con una longitud de paleta sumergida de 0.05m, se bombeó el día anterior y se tomaron las muestras a diferentes horas del día. Se notó la presencia de grasas en el agua.

## CAPITULO VI

### ANALISIS ECONOMICO

Como ya lo mencionamos anteriormente siendo la energía eólica gratuita, no es el rendimiento energético lo más importante, sino la inversión y los gastos de explotación.

El análisis económico que a continuación se hace tan sólo presenta los costos de producción de el aerador multipala, que demandó al VIS por concepto de materiales, adicionando un tiempo estimado de construcción, cuanto se le pagaría como mano de obra para la realización del mismo y por concepto de alquiler de taller. No se consideran los gastos concerniente a: investigación, cálculos, proyecciones, transportación de material, imprevistos, gastos administrativos, ni las ganancias que se obtendrían. Este presupuesto se ha elaborado en base a cotizaciones de materiales, consultados a proveedores nacionales, a la fecha de Diciembre de 1987.

El costo global del aerador multipala de 1.2m de diáme-

tro que consiste de 12 paletas, estructura soporte, eje, rodamiento, cola de orientación, pintura, pernos, tuercas, soldadura, balsas, etc, fue ..... 15089.47 sucres.

La construcción del equipo demoró tres semanas porque se tuvo que realizar diferentes funciones como fueron: la de compra de los materiales, y en muchos casos las facilidades del taller no se prestaban, o no resultaban suficientes.

Ya con los conocimientos adquiridos, en la construcción del mismo y con todas las facilidades del caso, siguiendo el diseño, la construcción del mismo no pasará de 3 días.

Este tipo de aerador se lo puede construir en pequeños talleres y con personal ecuatoriano, ya que su construcción es sencilla y no requiere de una técnica muy depurada, tomemos en consideración que recurriendo a la producción en serie estos costos disminuirán apreciablemente.

Para tener un idea del costo de la mano de obra, se estima que el obrero para Diciembre de 1987 gana un sueldo de 1000 sucres diarios con lo que por los tres días serán ..... 3000.00 sucres.

Y por concepto de alquiler de taller... 3000.00 sucres

Precio total del aerador ..... 21089.47 sucres.

De acuerdo con los experimentos en la universidad de Auburn Ref( 4 ), ellos llegaron a la conclusión de que técnicas de aeración como son la aeración superficial tipo Spray, rociadores, y circular agua de bajo OD por medio de bombas, fueron menos eficiente que el aerador de paletas superficial, deduciendo que se mejora enormemente la aeración del agua con un mínimo de energía.

Para una producción intensiva de peces, camarones, ó en lagunas de oxidación, estas pueden ser aeradas continuamente ó básicamente en los períodos nocturnos para prevenir una baja concentración de oxígeno disuelto. Sin embargo esto es una práctica costosa y es frecuentemente no económica sobre las bases comerciales, normalmente la aeración solamente es empleada en estanques cuando la concentración de OD, disminuye tanto que son probables las muertes de los peces, y en lo referente a las lagunas de oxidación, en nuestro medio la aeración no es utilizada, pudiendo esta reducir el tiempo de retención de las aguas, y por tanto aumentar la capacidad de tratamiento, ya que por lo general estas no son suficientes, ó tienen mayor carga para la cual fueron diseñadas.

De los métodos de aeración emergente, el aerador de rueda de palas es el más efectivo en adicionar oxígeno en el agua, es de simple operación y de menor costo que el uso de bombas Ref(4). Los períodos más críticos de

OD, serán en la noche y en las primeras horas de la mañana, siendo estas en las cuales mejor funciona el aerador que utiliza energía eólica, ya que puede trabajar continuamente las 24 horas del día, y sin mayor mantenimiento, luego de haber sido instalado.

Los costos de inversión inicial en la compra del aerador se cubren rápidamente si se analiza el tiempo de funcionamiento y la vida útil del mismo estimada en 5 años, si consideramos que estamos supliendo el uso de bombas u otros métodos de aeración que utilizan energía eléctrica o combustible (diesel) para su funcionamiento, revisando que el Kw/h costaba 7.38 sucres, y el galón de diesel 65 sucres en Diciembre de 1987, si aplicamos esto a la industria camaronera nos damos cuenta que no existe una buena infraestructura eléctrica para servicio de las camaroneras, y en el precio del galón de diesel se debe aumentar un promedio de 10 sucres por galón por concepto de transporte, ya que estas se encuentran en sitios apartados, como dato tenemos que en las camaroneras se consume 1.24 galones de diesel/Hectárea al día ó un equivalente a 12 Kw h/ Hectárea al día Ref (9). Nos damos cuenta que suprimiendo el número de horas de bombeo, por consiguiente ahorrando combustible, tendríamos una buena utilidad.

Estó necesitaría un análisis más profundo que requeriría mucho más tiempo e investigación, quedando esta

puerta abierta a futuras investigaciones.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente trabajo de investigación se llegaron a las siguientes conclusiones, haciéndose más adelante las recomendaciones del caso.

- 1.- Se cumplieron con los objetivos propuesto antes de emprender este proyecto, los cuales fueron que se podía aprovechar la energía del viento para mover o impulsar un aerador superficial de paletas ,diseñado y construido con personal ecuatoriano , logrando comprobar su efectividad por medio de mediciones de OD, siendo por tanto demostrado que el aerador servía para los propósitos de diseño.
- 2.- Debemos tener en cuenta que la velocidad del viento representa un parámetro fundamental, ya que dependiendo de esta podremos predecir si tal o cual sitio presenta las condiciones necesarias para el aprovechamiento económico de este sistema de aeración.
- 3.- El objetivo de la aeración consiste ya sea en la

remoción de gases y otras sustancias volátiles del agua, o bien en su adición al agua, o ambas simultáneamente.

- 4.- Disminuye el bombeo, reduce el tiempo de utilización de las bombas, necesario para renovar el agua y por consiguiente oxigenarla, con lo cual se economiza en combustibles y en electricidad.
- 5.- Incorpora áreas muertas de las piscinas, logrando una mayor utilización de la misma, evitando la formación de los cortos circuitos, que son lugares donde no fluye el agua sino que se estanca y causa problemas de mortalidad en los peces, reduciendo la mortalidad en los peces, puede facilitar el incremento de la densidad de la población de los peces, logrando así una producción más alta, eficiente y con mejores resultados.
- 6.- Funcionamiento continuo, siendo el aerador sensible a pequeñas velocidades de viento su funcionamiento es continuo, y de mayor utilidad en las noches donde las velocidades del viento son mayores, coincidiendo con las horas de disminución de  $\bar{O}_2$  a niveles críticos.
- 7.- Gastos de operación y mantenimiento casi nulos, una vez anclado en un lugar previamente determinado, se puede prácticamente olvidar de él, trabajando cuando haya viento y orientándose solo tratando de aprovechar esta energía lo más posible.

- 8.- Bajísimo costo inicial, como lo hemos mencionado en el capítulo anterior, pagandose el mismo con la disminución de las horas de bombeo.
- 9.- Puede facilitar el incremento de la densidad de la población de los peces, logrando así una producción más alta, más eficiente y con mejores resultados.
- 10.- Aumentando la profundidad sumergida, la velocidad del rotor, el diámetro del rotor, así como haciendo adaptaciones en los extremos sumergidos de las paletas, incrementando la mezcla y la cantidad de gotas de agua lanzadas dentro del aire, aumentando por consiguiente la aeración.
- 11.- Frecuentemente la adquisición de los aeradores superficiales es la alternativa más económica y la más eficiente en lo que respecta a aeración.
- 12.- Las grasa reducen la difusión a través de la película de líquido y reducen la transferencia de  $O_2$ .
- 13.- EL AERADOR DE PALETAS ACELERA EL PROCESO DE ENTREGA DE OXIGENO A LA ATMOSFERA, CUANDO EN EL AGUA EXISTE SOBRE SATURACION DE OXIGENO, LO CUAL ES BENEFICIOSO PARA LOS CRIADEROS DE PECES, EVITANDO LA ENFERMEDAD DE LAS BURBUJAS.

#### RECOMENDACIONES

- 1.- La primera recomendación que puede hacerse para el mejor aprovechamiento del recurso eólico en ae-

radores de viento es: el escojamiento del sitio donde lo van a aplicar, esto debe ser hecho en lugares despejados para asegurar que la captación del rotor sea directa y de esta forma aprovechar de mejor forma el viento, estos lugares deben tener una velocidad promedio de 2.5 m/seg durante la mayor parte del año.

- 2.- Se deben construir aeradores de diámetros mayores al del prototipo que era de 1.20 m, pudiendo con esto poder sumergir más la pala y obtener mejores resultados de agitación.
- 3.- Las palas que en el prototipo son de acero galvanizado, se pueden hacer de aluminio, acero inoxidable o de fibra de vidrio, con lo cual prolongaríamos su vida útil.
- 4.- Los flotadores que son de balsa en el prototipo por la facilidad que presentó su manejo, se pueden hacer sin ningún inconveniente con cilindros metálicos huecos, recubiertos de pintura epóxica.
- 5.- El prototipo se lo realizó totalmente desarmable, por medio de partes empernadas, para poder desarmarlo fácilmente, pero para ayudar a la rapidez de la construcción, se debería realizar de menos partes móviles, rigidizando además la estructura.
- 6.- Fomentar las investigaciones dirigidas hacia el aprovechamiento de la energía eólica para la solución de los problemas de renovación y oxigenación

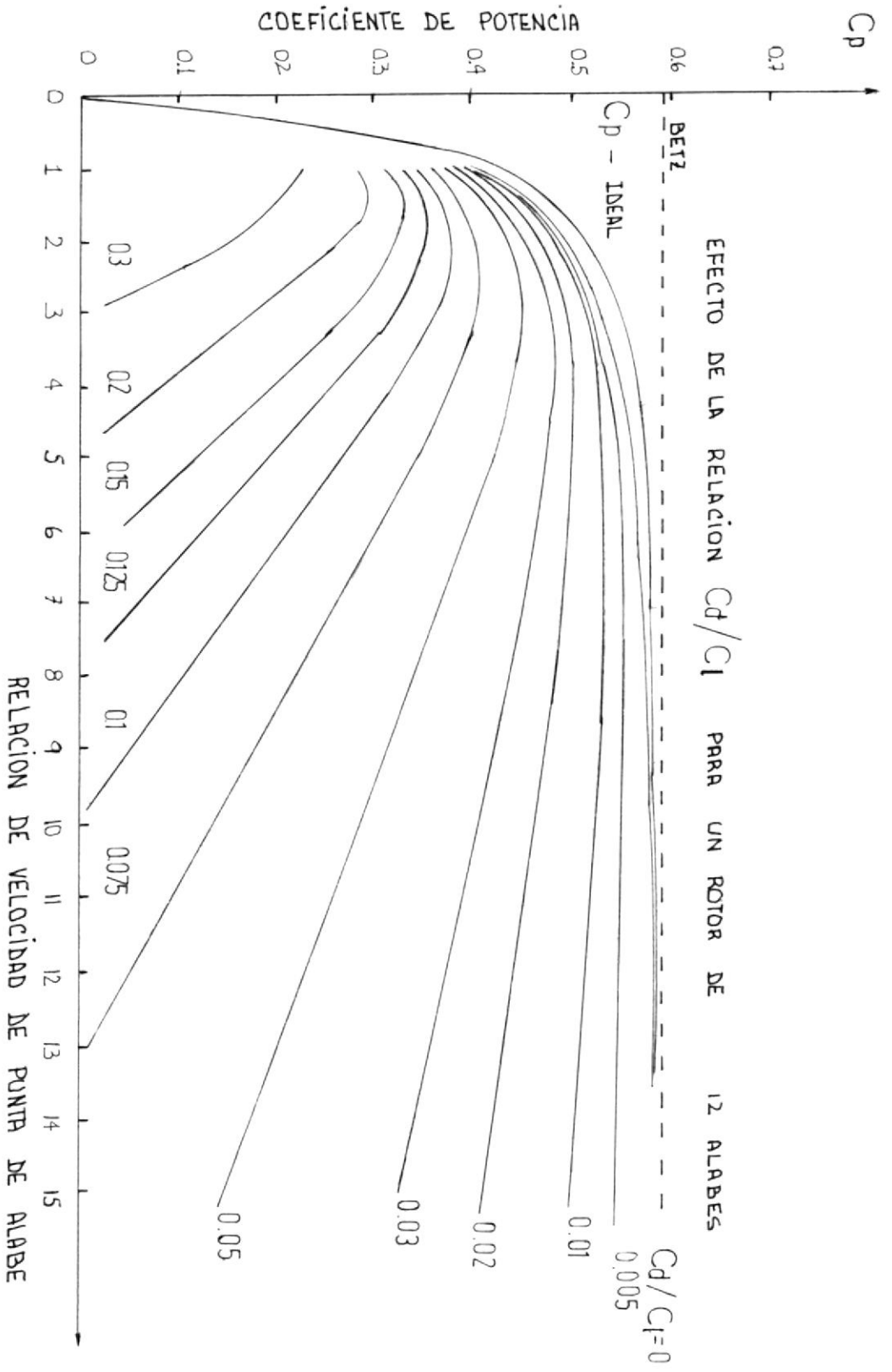
dei aqua.

- 7.- Que se busque la realización de un proyecto inter-facultades, que vincule a las facultades de Ingeniería: Mecánica, Naval y al Instituto de Química, ya que sería la mejor forma de conocer los alcances verdaderos del proyecto, siendo necesaria la participación de ellas en el préstamo de equipos y personal, necesarios para la realización de las pruebas de campo y de laboratorio.

A P E N D I C E S

APENDICE A

VALORES DEL COEFICIENTE DE POTENCIA ( $C_p$ ) EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DEL EXTREMO DEL ALABE ( $\omega$ ) PARA DISTINTOS NUMEROS DE ALABES (B) Y PARA DISTINTOS VALORES DE  $C_d/CL$

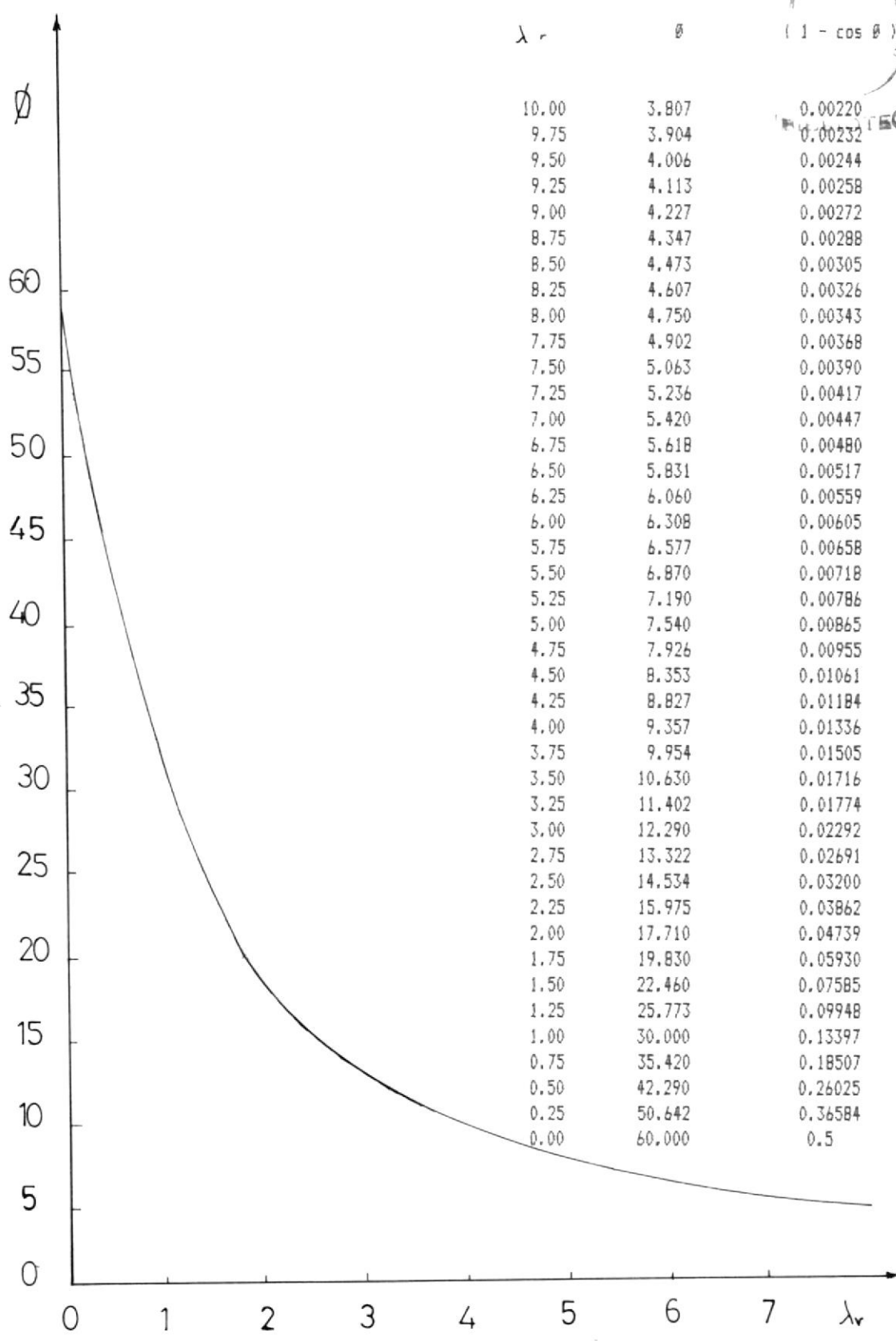




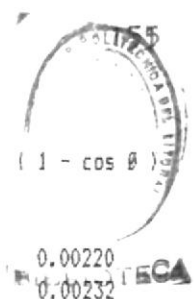


APENDICE B

VALORES DEL ANGULO  $\theta$  ( ANGULO ENTRE LA VELOCIDAD RELATIVA "w" RESPECTO AL PLAN DE ROTACION A UNA DISTANCIA R ).



$\lambda_r$	$\theta$	$(1 - \cos \theta)$
10.00	3.807	0.00220
9.75	3.904	0.00232
9.50	4.006	0.00244
9.25	4.113	0.00258
9.00	4.227	0.00272
8.75	4.347	0.00288
8.50	4.473	0.00305
8.25	4.607	0.00326
8.00	4.750	0.00343
7.75	4.902	0.00368
7.50	5.063	0.00390
7.25	5.236	0.00417
7.00	5.420	0.00447
6.75	5.618	0.00480
6.50	5.831	0.00517
6.25	6.060	0.00559
6.00	6.308	0.00605
5.75	6.577	0.00658
5.50	6.870	0.00718
5.25	7.190	0.00786
5.00	7.540	0.00865
4.75	7.926	0.00955
4.50	8.353	0.01061
4.25	8.827	0.01184
4.00	9.357	0.01336
3.75	9.954	0.01505
3.50	10.630	0.01716
3.25	11.402	0.01774
3.00	12.290	0.02292
2.75	13.322	0.02691
2.50	14.534	0.03200
2.25	15.975	0.03862
2.00	17.710	0.04739
1.75	19.830	0.05930
1.50	22.460	0.07585
1.25	25.773	0.09948
1.00	30.000	0.13397
0.75	35.420	0.18507
0.50	42.290	0.26025
0.25	50.642	0.36584
0.00	60.000	0.5



APENDICE C

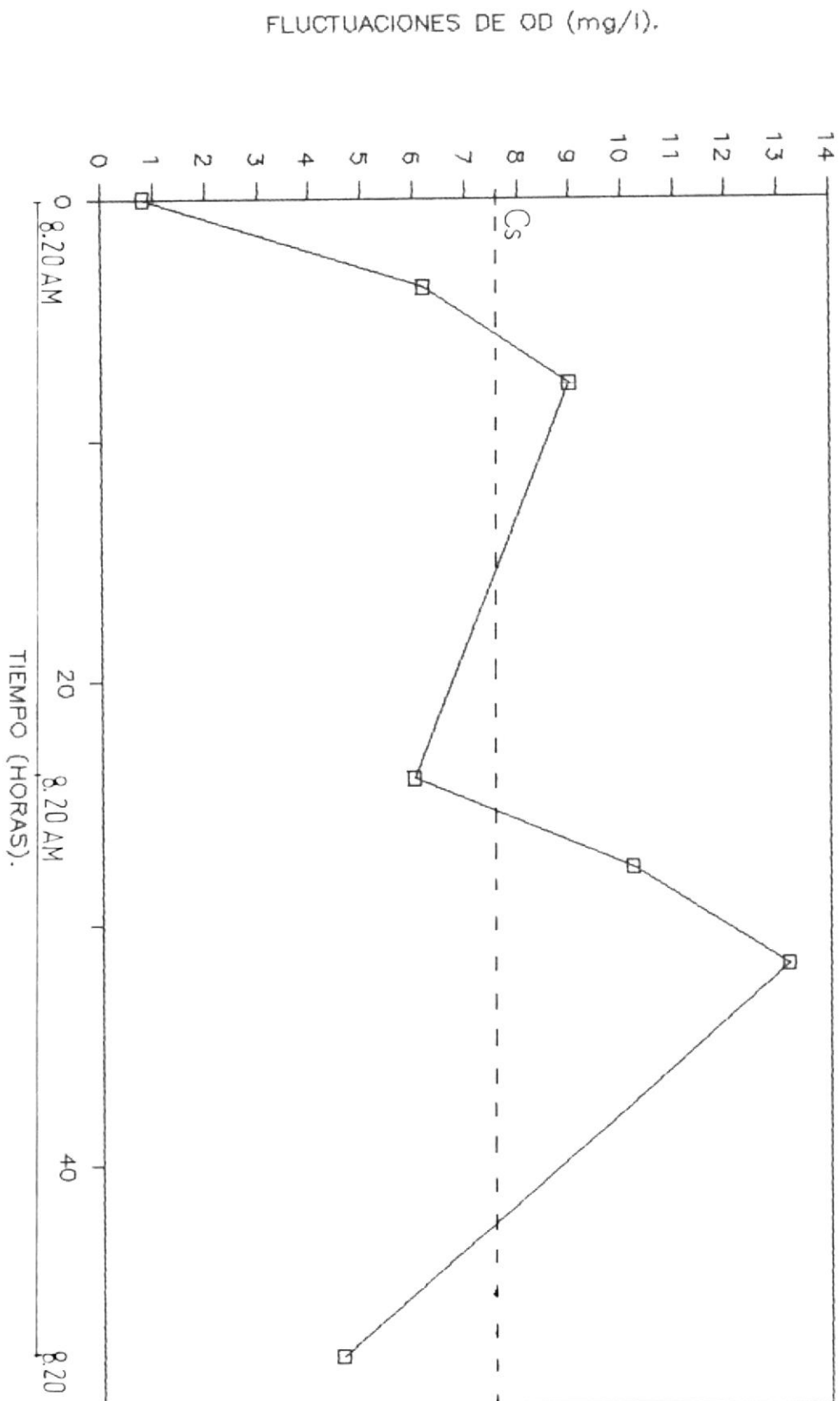
GRAFICOS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA TESIS  
OXIGENACION DE AGUA UTILIZANDO ENERGIA EOLICA.



BIBLIOTECA

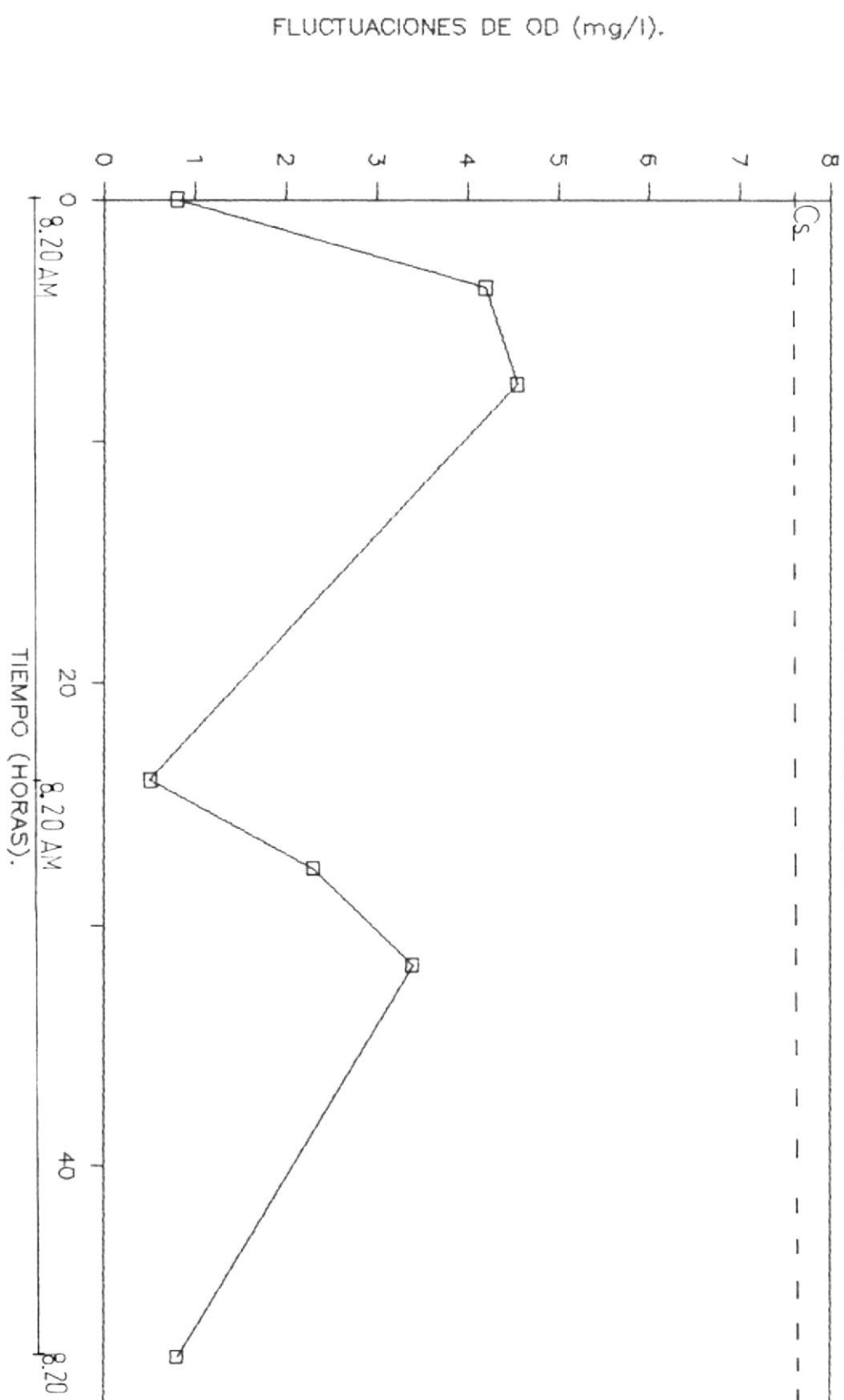
# RESULTADOS EXPERIMENTALES TABLA IX.

VARIACIONES DE OD.

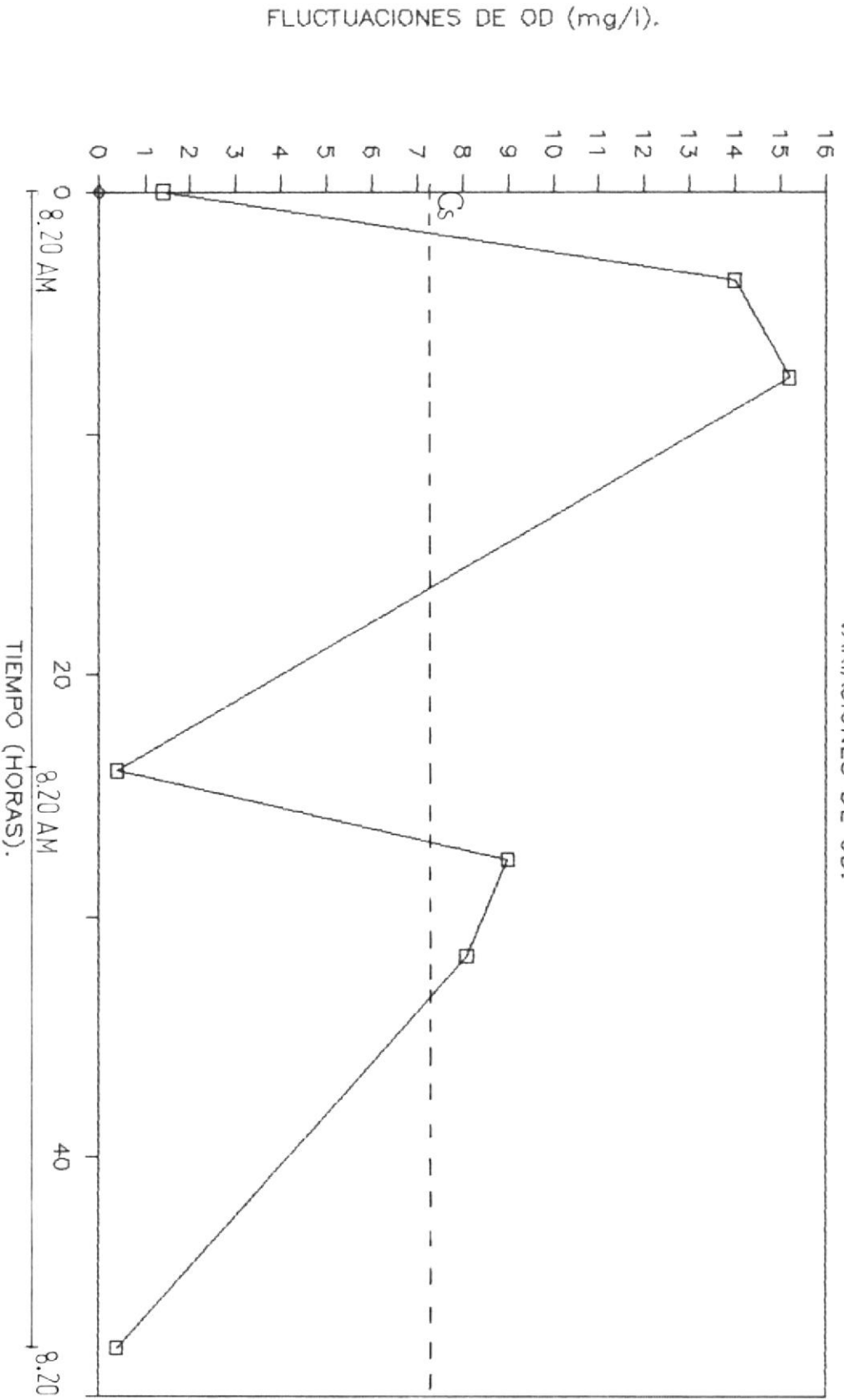


# RESULTADOS EXPERIMENTALES ESTABLA X.

VARIACIONES DE OD.

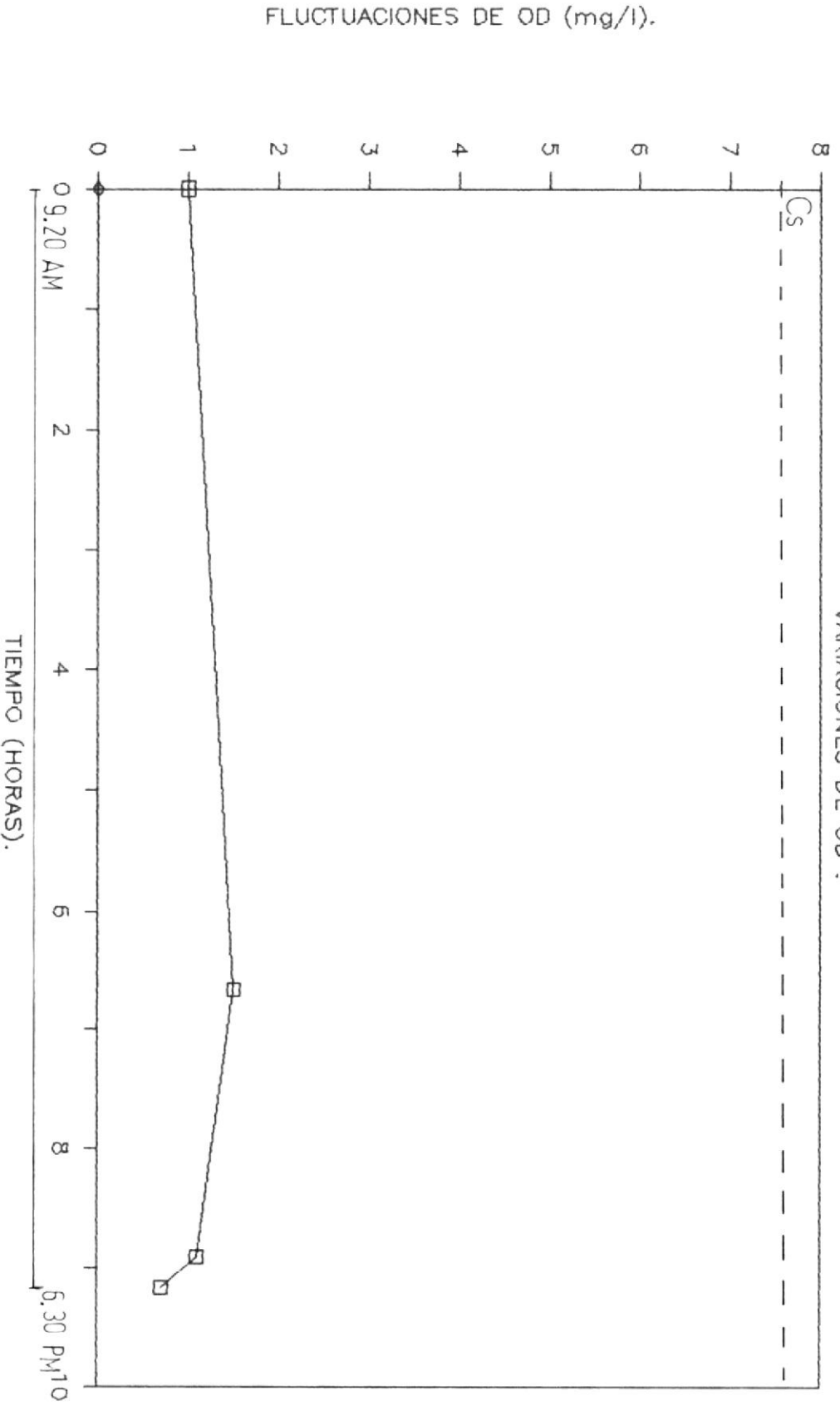


RESULTADOS EXPERIMENTALES TABLA XII.  
VARIACIONES DE OD.



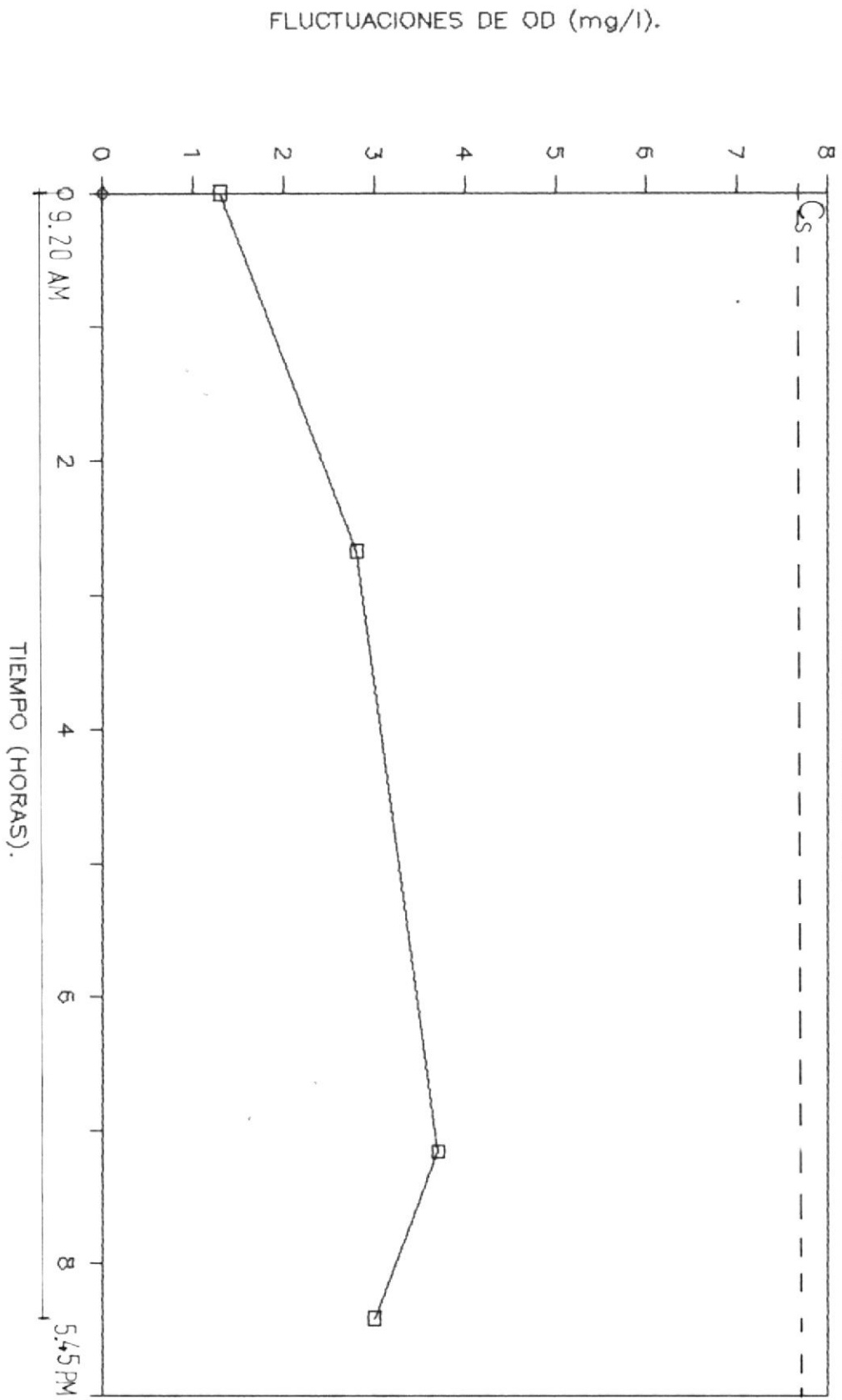
# RESULTADOS EXPERIMENTALES TABLA XIII.

VARIACIONES DE OD .



# RESULTADOS EXPERIMENTALES TABLA XIV.

VARIACIONES DE OD.



APENDICE D

FOTOS DEL AERADOR



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA



5



### BIBLIOGRAFIA

1. AWKINS, A. Aquarium systems, Academic Press Inc, London, 1981.
2. BROWN, E and GRATZKE, J. Fish Farming handbook, Avi publishing Inc, Westport Connecticut, 1980.
3. CATALAN, Jose. Química del agua, Blume, Madrid, 1985.
4. CLAUDE, E and CRAIG, S. Published. Emergency Aeration of the Fish Ponds, American Fisheries Society, Auburn Alabama, 1979.
5. COLL, Julio. Acuicultura - Marina Animal, Mundi prensa, Madrid, 1983.
6. CUNTY, Guy. Aeromotores y Aerogeneradores ( Guía de la energía eólica), Ediciones Marzo, Barcelona, España, 1980.

7. EPA. Environment protection agency. Operación mantenimiento de lagunas. mantenimiento de lagunas, 1984.
8. FAIR, GORDON and GEYER. Water Supply and Waste-Water Disposal, John Wiley and Sons, Japan, 1954.
9. INE. Instituto Nacional de energía. Geografía energética del Ecuador N°3. Servicio eléctrico a la empresas camaroneras de la provincia de el Oro, Quito. 1987.
10. JENKINS, David and FERGUSON, John. Química del agua, manual de laboratorio, Limusa S.A., México, 1983.
11. MARCEL and HUET. Tratado de psicicultura, Mundi prensa, Madrid, 1978.
12. MARKS. Manual del ingeniero mecánico, Mc Graw Hill, México, 1984.
13. MORA, Hidrovo, Tesis de grado. Utilización de energía eólica para la extracción de agua, ESPOL, Guayaquil, 1983.
14. NORDEL and ESKEL. Tratamientos de agua para la industria y otros usos, Continental S. A, México, 1968.
15. OLADE, Documento N°23, Organización latinoamericana de energía, Quito, Ecuador, 1981

16. RIOFRIO, Vicente. Apuntes sobre tratamiento del agua, ESPOL, Guayaquil, 1978.
17. SHIGLEY, Josep and MICHELL, Carry. Diseño en ingeniería mecánica, Mc Graw Hill, México, 1985.
18. UNDA, Francisco. Teoría y diseño de plantas de tratamiento de agua potable, Departamento de publicaciones de la Universidad Católica de Chile, Chile 1963.
19. WHEATON, A. Aquacultural engineering, John Wiley and Sons, New York, 1977.