



25
109

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**OPERACION DE UNA TURBINA GEOTERMICA BAJO
CONDICIONES VARIABLES DEL CAMPO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:

Raúl Alberto Sánchez Velasco

MEXICO, D. F.

1982



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

I N D I C E

CAPITULO I	INTRODUCCION.
CAPITULO II	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.
CAPITULO III	ECUACIONES FUNDAMENTALES.
CAPITULO IV	DETERMINACION DE LA GEOMETRIA Y CINEMATICA DE LA TURBINA IDEAL.
CAPITULO V	OPERACION DE LA TURBINA IDEAL - EN CONDICIONES DISTINTAS A LAS DE DISEÑO.
CAPITULO VI	RESULTADOS. a) Rendimiento por escalón. b) Pérdidas en el escape. c) Potencia generada. d) Comportamiento al eliminar el primer escalón. e) Rendimiento con un condensa-- dor en el escape.
CAPITULO VII	CONCLUSIONES.

CAPITULO I.- INTRODUCCION.

En la República Mexicana, en los últimos años, se le ha dado gran importancia a la exploración geotérmica con fines de generación de --- electricidad.

En la actualidad se están perforando pozos (de hasta 2500 m.) en Los Azufres, Araró y San Agustín del Mafz en el Estado de Michoacán, - La Primavera en Jalisco y Los Humeros y Derrumbadas en el lfmite de -- los Estados de Puebla y Veracruz.

Esto ha llevado a desarrollar una política de evaluación de yacimientos que tenga por finalidad detectar lo antes posible el potencial de un campo geotérmico con el fin de comenzar cuanto antes las unida--

des grandes-definitivas-para generación, sin correr riesgos intolerables.

Parte esencial de dicha política ha sido la adquisición de plantas portátiles de generación. Con estas plantas de 5 MW cada una, se podrá extraer vapor de un pozo, estratégicamente localizado en un campo, para poder medir el abatimiento de presión en los demás pozos circunvecinos y en el propio productor de manera que se puedan obtener -- los parámetros principales del yacimiento!

Lo importante de esta prueba es que mientras se realiza, se genera energía eléctrica.

La experiencia y los cálculos realizados hasta la fecha demuestran que la adquisición de plantas móviles (de 5 MW) como una herramienta para la evaluación efectiva de los campos geotérmicos, es no sólo de bajo costo sino que son una inversión comercialmente productiva.²

Al examinar la razón por lo cual una planta portátil, de descarga atmosférica y por tanto de baja eficiencia, puede ser una forma económica de generación de electricidad, es fácil notar que la economía radica en que el costo del pozo geotérmico no es imputable al costo de generación de las plantas móviles. Dicho costo pertenece a las plantas definitivas.

Aceptando el comentario anterior para la realización del análisis de costo, la inversión inicial para una planta de 5 MW resulta ser un orden de magnitud inferior al de una planta definitiva.

Lo anterior ha llevado a que la Comisión Federal de Electricidad adquiriera en 1981 cinco turbogeneradores de 5 MW a contrapresión para ser usados como elementos de exploración y de generación.

En esta tesis se examina el comportamiento que tendrán estas tur-

binas bajo circunstancias adversas en el yacimiento; es decir, cómo -- operarían si la presión del yacimiento fuese muy inferior o mucho mayor que la presión de diseño de las turbinas.

En el siguiente capítulo se hace el planteamiento formal del problema y se explican las variantes que serán estudiadas y su importancia asociada a la presión real de las cinco plantas que CFE acaba de adquirir en Japón.

En el capítulo III se hace un breve repaso de los principios básicos de Termodinámica que permitirán desarrollar, allí mismo, las ecuaciones fundamentales para calcular los parámetros de operación de las turbinas bajo condiciones de admisión diferentes.

Como todavía no se conoce en detalle la geometría de las toberas, paletas, ductos de admisión y descarga de estas turbinas fue necesario en el capítulo IV, calcular en forma ideal estas características.

El capítulo V es la parte medular de esta tesis. En él se calculan, con ayuda de la computadora, las características geométricas y dinámicas en cada corrida de paletas y en cada diafragma de toberas, bajo diferentes condiciones del vapor en la admisión y el escape.

En el capítulo VI se presentan los resultados en forma gráfica y se analizan los efectos de estos cambios sobre el rendimiento por escalón de la máquina, potencia total, funcionamiento al eliminar la primera corrida de toberas y paletas móviles a estas turbinas, así como su comportamiento si se le instala un condensador en el escape.

En el capítulo VII se plantea brevemente las conclusiones del estudio, teniendo siempre presente su aplicación al caso de las cinco -- unidades recientemente adquiridas.

Cabe destacar que las turbinas en cuestión son muy diferentes a -

(4)

las que normalmente se utilizan en la generación de electricidad mediante vapor. En este caso se trata de cinco corridas de paletas móviles de impulso, no existiendo ningún estado de reacción. Además para el control de la potencia de la turbina no existen segmentos independientes de toberas para variar el gasto sin alterar la presión. En este caso, mediante una válvula única de mariposa, el flujo es estrangulado antes de la caja de admisión a las toberas con la consiguiente caída de la presión de admisión.

CAPITULO II.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

A principios de 1981 la Comisión Federal de Electricidad adquirió en Japón, cinco unidades turbogeneradoras con una capacidad de 5 MW cada una y un consumo de 59.13 Ton/Hr, necesarios para generar esta potencia.

Estas turbinas serán instaladas a boca de pozo, en donde generarán de acuerdo a las características del pozo correspondiente.

Además en un futuro, estas plantas serán llevadas a otros campos geotérmicos de la República para realizar la misma función que desarrollarán en Los Azufres y que fué descrita en el capítulo anterior, en los cuales las curvas de presión contra gasto de los pozos serán muy -

diferentes a las del campo en cuestión; es de esperarse que algunos, - incluso a la presión de operación nominal, no alcancen a producir el - gasto necesario para generar los 5 Mw.

En esta tesis se desarrolla un proceso para calcular los parámetros de interés cuando la turbina opera a condiciones de trabajo fuera de las de diseño, tanto a presiones superiores como inferiores a la nominal.

Además en esta tesis se plantearon otras interrogantes que pueden llegar a ser de mucho interés como:

¿ Como funcionaría la turbina si se le eliminara el primer escalón ?

¿ Si se le instalara un condensador en la descarga se mejoraría la potencia de la máquina en los diferentes puntos de operación ?

¿ Se obtendrán beneficios, en términos de potencia, si se le realizan estos procesos ?

Se efectuaron los cálculos para observar el comportamiento y obtener en forma ideal, las curvas de operación de la turbina bajo estas condiciones de trabajo. El problema se enfocó, para ambas alternativas en la termodinámica del vapor al pasar por el escalón.

Para llegar a los resultados encontrados fue necesario conocer -- primero bien el funcionamiento de los pozos geotérmicos, en particular su diagrama presión contra gasto para diferentes presiones de separación y luego lo relativo a las turbinas -que no es trivial en este caso- especialmente a condiciones de operación fuera del punto de diseño.

Como punto de partida para resolver estos problemas se tomaron -- los diámetros de los rodets de álabes proporcionados por la compañía

fabricante de estas turbinas.

El problema fue resuelto bajo condiciones de flujo isoentrópico. Esta aproximación, necesaria para resolver la mayoría de las ecuaciones, no limita las conclusiones planteadas al final de este trabajo, ya que el análisis se realiza en términos de incrementos relativos tomando - - siempre como referencia la operación de la turbina ideal bajo condiciones nominales de trabajo.

Con fines ilustrativos para el planteamiento del problema, se utiliza la fig. II.1 en la cual se muestra el arreglo esquemático típico de la distribución de equipos en la plataforma de un pozo geotérmico -- productor de mezcla agua-vapor.

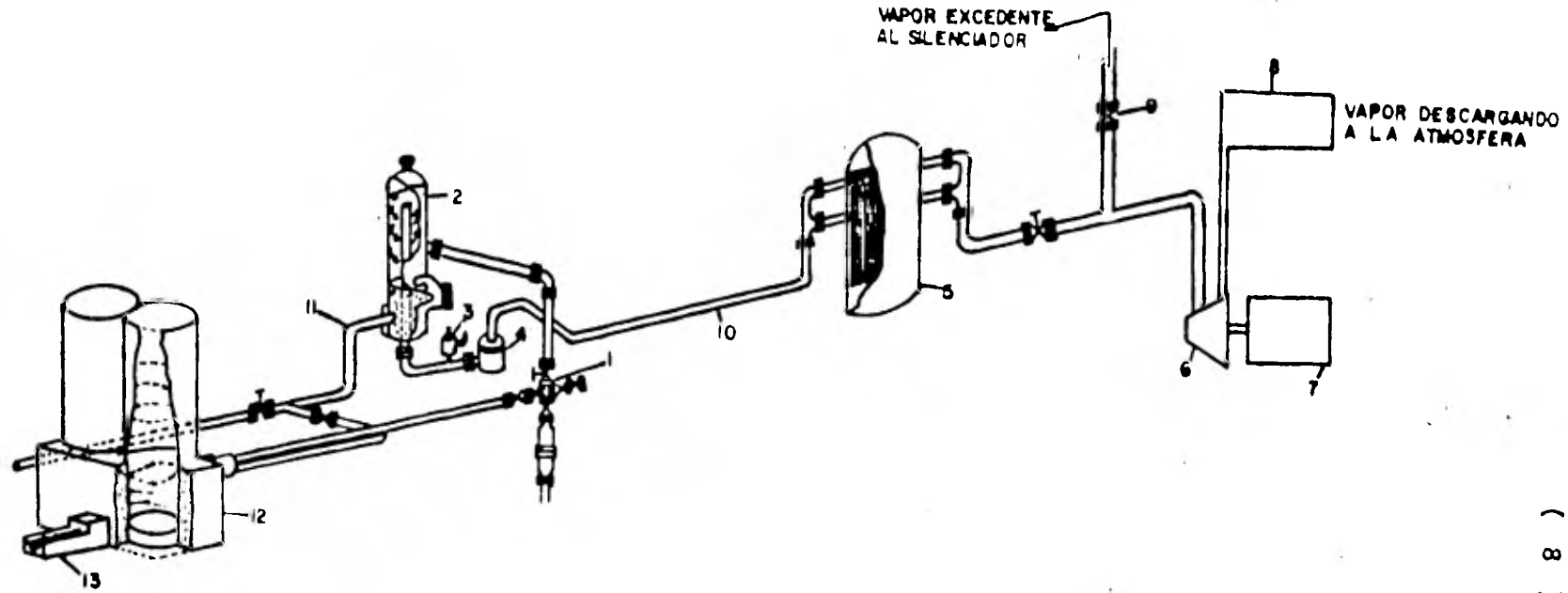
A continuación se da una breve descripción de la función que realizan los equipos instalados en la plataforma.

Separador Vertical Centrifugo.- Su función es separar el vapor del agua por medio de una fuerza centrífuga que adquiere el fluido por tener una incidencia tangencial al cuerpo del separador y además, debido a la diferencia de densidades de cada una de las sustancias.

Válvula Esférica.- Esta válvula funciona únicamente como dispositivo de seguridad de la turbina, al evitar el paso de cualquier bloque de agua que pueda causarle daños graves al turbogenerador.

Deshumidificador.- Este equipo elimina la humedad que aún lleva el vapor al cambiar constantemente de dirección al fluido, provocando con esto la adhesión de las partículas de agua a las láminas deflectoras, - en donde son recolectadas y drenadas del deshumidificador.

Silenciador Fijo.- Realiza la doble función de aminorar el ruido - que produce el fluido geotérmico, así como el evitar que el agua contaminante se vaya al ambiente sin control, causando problemas a la ecología.



- 1-ARBOL DE VALVULAS.
- 2-SEPARADOR VERTICAL CENTRIFUGO.
- 3-VALVULA DE SEGURIDAD.
- 4-VALVULA ESFERICA.
- 5-DESHUMIDIFICADOR.
- 6-TURBINA.
- 7-GENERADOR.

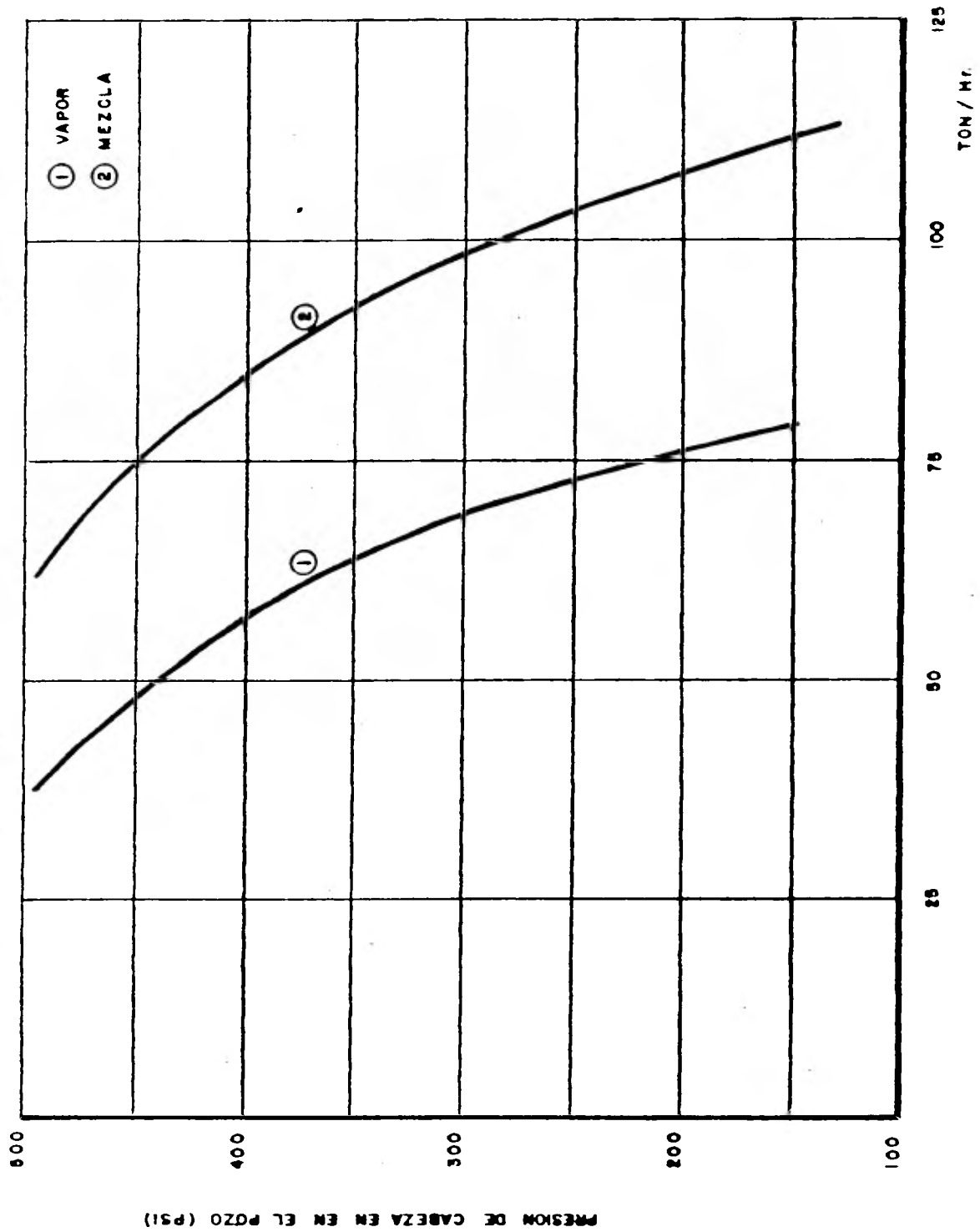
- 8-SILENCIADOR DE LA TURBINA.
- 9-VALVULA DE CONTROL DEL VAPOR. DE EXCEDENCIA.
- 10-LINEA DE VAPOR SEPARADO.
- 11-LINEA DE AGUA SEPARADA.
- 12-SILENCIADOR FIJO.
- 13-CANAL DE DRENAJE.

Fig. II. 1.- Arreglo típico de equipo en la plataforma de un pozo geotérmico.

(9)

En la figura II.2 se muestra una curva caracterfstica de produc--
ción de un pozo geotérmico.

FIG. 2.- CURVA CARACTERISTICA DEL POZO A-13 DEL CAMPO GEOTERMICO LOS AZUFRES



CAPITULO III.- ECUACIONES FUNDAMENTALES.

Los siguientes son los parámetros conocidos durante la operación de la turbina.

p_1 - Presión de admisión.

v_1 - Volumen específico a la presión de admisión.

v_1 - Velocidad absoluta de entrada al primer juego de toberas.

Q - Flujo másico de vapor.

A_2 - Area de salida en cada juego de toberas.

Balance de energía aplicado entre la entrada y la salida de una tobera ideal.

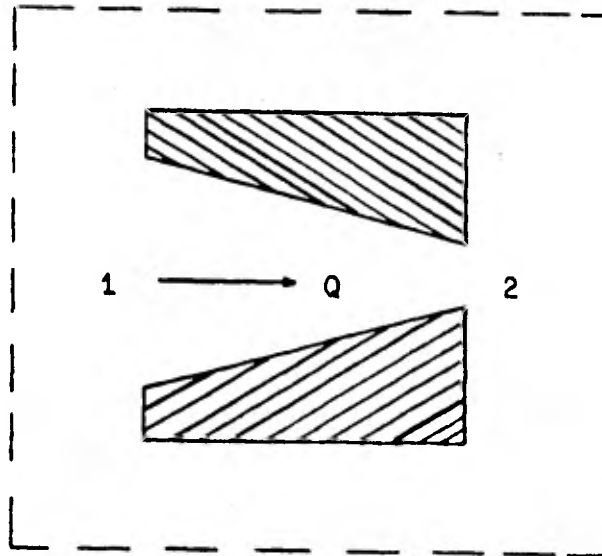


Fig. III.1.- Representación esquemática de una tobera ideal por la cual pasa un gasto Q .

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2} \quad \text{III.1}$$

Dado que las entalpías no se conocen, se tratará de expresar esta ecuación en términos del volumen específico.

Ecuación de estado.

Si se considera una expansión isoentrópica, la presión y el volumen específico se pueden relacionar mediante

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k = \text{cte.} \quad \text{III.2}$$

donde k es la razón de calores específicos a presión y volumen constante y se puede considerar como $k = 1.135$.

La entalpía que se define como $dh = c_p dT$ para el caso de un gas perfecto donde $T = pv/R$ se puede expresar como

$$h = \frac{k}{k-1} pv + a \quad \text{III.3}$$

donde $a = \text{cte.}$

De ec. III.2

$$p_2 = \text{cte.} v_2^{-k} \quad \text{III.4}$$

Reemplazando ec. III.4 en la ec. III.3 para luego evaluarla en el punto 2, se tiene.

$$h_2 = \frac{k}{k-1} \text{cte.} v_2^{-k} v_2 + a$$
$$h_2 = \frac{k}{k-1} \text{cte.} v_2^{(1-k)} + a \quad \text{III.5}$$

Procediendo de manera similar para el punto 1

$$h_1 = \frac{k}{k-1} \text{cte.} v_1^{(1-k)} + a \quad \text{III.6}$$

(14)

La ecuación de continuidad entre el punto 1 y 2 da

$$\frac{v_1 A_1}{v_1} = \frac{v_2 A_2}{v_2}$$

$$v_2 = \frac{v_1 Q}{A_2} \quad \text{III.7}$$

Sustituyendo ecs. III.5, III.6 y III.7 en ec. III.1 se tiene

$$\frac{k}{k-1} \text{cte. } v_1^{(1-k)} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{k}{k-1} \text{cte. } v_2^{(1-k)} + \frac{v_2^2}{2}$$

por tanto

$$F(v_2) = \left(\frac{k}{k-1} \text{cte. } v_1^{(1-k)} + \frac{v_1^2}{2} \right) - \left(\frac{k}{k-1} \text{cte. } v_2^{(1-k)} + \frac{v_2^2}{2} \right) \quad \text{III.8}$$

Esta ecuación describe el comportamiento del flujo al pasar por la tobera, en función del volumen específico a la salida de ésta. Para resolverla se procede por aproximaciones sucesivas, utilizando el método de Newton - Raphson que dice

$$v_{i+1} = v_i - \frac{F(v_i)}{F'(v_i)} \quad \text{III.9}$$

Derivando la ec. III.8 para v_2

$$F'(v_2) = \frac{-k}{k-1} (1-k) \text{cte. } v_2^{-k} - 2 \left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 \frac{v_2}{2}$$

$$F'(v_2) = \frac{k}{k-1} (k-1) \text{cte. } v_2^{-k} - \left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 v_2$$

$$F'(v_2) = k \text{cte. } v_2^{-k} - \left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 v_2 \quad \text{III.10}$$

Al resolver estas ecuaciones para todos los escalones, la presión de salida del último escalón debe ser igual a la atmosférica. Para el caso analizado se impuso como presión de escape $p_g = 1.1$ bar, lo que corresponde aproximadamente al caso de turbina ideal. Durante las iteraciones se variaba el gasto másico hasta obtener la presión de 1.1 bar.

Como era de esperarse, cuando el número de Mach en la salida de la tobera era mayor que 1.0 el método no convergía. Esta limitación no es solo reflejo de las ecuaciones planteadas que no tienen solución -- cuando en número de Mach es mayor que la unidad, sino que corresponden a la situación real física donde en una tobera convergente, cuando Mach = 1 aunque se disminuya la presión de aguas abajo no aumenta la velocidad.

Una vez conocido el volumen específico a la salida de la tobera, se calcula la velocidad en este punto

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} v_2 \quad \text{III.11}$$

Esta velocidad será la misma que la velocidad de entrada a la corrida de álabes.

Para calcular la velocidad de salida de los álabes, que será igual a la velocidad de entrada a la siguiente corrida de toberas, se utiliza el triángulo de velocidades haciendo las siguientes suposiciones.

- a) El ángulo de ataque de la tobera (α) es de 20° .
- b) En el álabe no existe fricción; por lo cual, las velocidades - relativas a la entrada y la salida son iguales.
- c) Por construcción, el ángulo β de maquinado de las paletas, a la entrada es el mismo en la salida. Este ángulo es el mismo para todos los demás álaves.

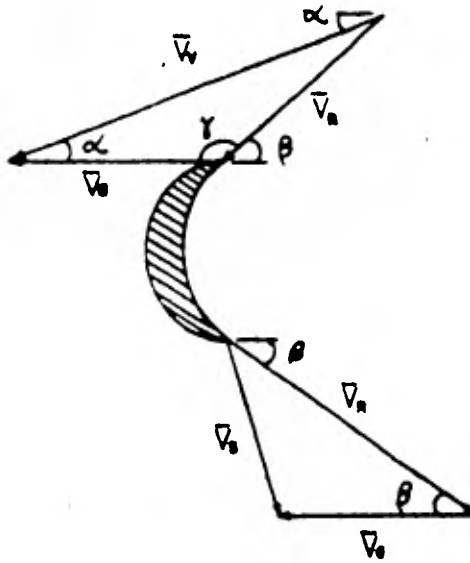


Fig. III. 3- Triangulos de velocidades en la entrada y la salida de un álabe en el cual la velocidad relativa permanece constante.

Aplicando la ley de los cosenos para el triangulo de velocidades a la entrada

$$V_R^2 = V_v^2 + V_a^2 - 2 V_v V_a \cos \alpha \quad \text{III.12}$$

$$\gamma = \cos^{-1} \left(\frac{V_a^2 + V_R^2 - V_v^2}{2 V_a V_R} \right) \quad \text{III.13}$$

$$\beta = 180 - \gamma \quad \text{III.14}$$

$$V_s^2 = V_R^2 + V_a^2 - 2 V_R V_a \cos \beta \quad \text{III.15}$$

donde:

v_v - Velocidad absoluta del vapor en m/s.

v_a - Velocidad del álabe en m/s.

V_R - Velocidad relativa del vapor con respecto al álabe en m/s.

v_s - Velocidad absoluta de salida del vapor en el álabe en m/s.

La ec. III.15 se aplica para las cinco corridas de paletas móviles. Notese que para cada caso se utiliza la velocidad v_v que proviene de la tobera aguas arriba, al final del quinto cálculo se verifica que la velocidad de salida v_s sea compatible con el gasto y el volumen específico correspondiente al sector de escape de la turbina.

En cada escalón se calcula el Número de Mach (M) de la siguiente manera.

$$M = \frac{v_v}{(k p v)^{1/2}} \quad \text{III.16}$$

donde:

k - Constante isoentrópica del gas.

p - Presión del vapor en Pascales.

v - Volumen específico a esta presión en m^3/Kg .

Para calcular la potencia entregada por cada escalón, se parte de que ésta es la diferencia de energía cinética entre la entrada y la sa

(18)

lida del álabe multiplicada por el gasto.

$$W = Q \left(\frac{V_v^2 - V_s^2}{2} \right) \quad \text{III.17}$$

donde:

- w - Potencia entregada por el escalón de la turbina.
- v_v - Velocidad absoluta del vapor al entrar al álabe.
- v_s - Velocidad absoluta del vapor al abandonar el álabe.
- Q - Gasto másico manejado por la turbina.

De Fig. III.2

$$V_v^2 = V_R^2 + V_a^2 - 2 V_R V_a \cos (180 - \beta) \quad \text{III.18}$$

$$V_s^2 = V_R^2 + V_a^2 - 2 V_R V_a \cos \beta \quad \text{III.19}$$

Sustituyendo las ecs. III.18 y III.19 en la ec. III.17

$$W = \frac{Q}{2} (V_R^2 + V_a^2 - 2 V_R V_a \cos (180 - \beta) - (V_R^2 + V_a^2 - 2 V_R V_a \cos \beta))$$

Simplificando términos y dado que

$$\cos (180 - \beta) = \cos 180 \cos \beta + \text{sen } 180 \text{ sen } \beta$$

$$\cos 180 = - 1 \quad \text{sen } 180 = 0$$

$$\cos (180 - \beta) = - \cos \beta \quad \text{III.20}$$

$$W = \frac{Q}{2} (4 V_R V_a \cos \beta)$$

Por tanto

$$W = 2 Q V_R V_a \cos \beta \quad \text{III.21}$$

Esta ecuación define la potencia realizada por la turbina, en función de la velocidad relativa y la velocidad del álabe.

El calculo de las pérdidas de escape se realiza en función de la velocidad de salida del vapor de la quinta corona de paletas.

$$W_{\text{escape}} = Q \left(\frac{V_s^2}{2} \right) \quad \text{III.22}$$

CAPITULO IV.- DETERMINACION DE LA GEOMETRIA Y CINEMATICA DE LA TURBINA IDEAL.

De datos de fabricante se conocen los diámetros medios de cada escalón que son los siguientes:

Escalón No. 1	$D_m = 944$ mm.
Escalón No. 2	$D_m = 976$ mm.
Escalón No. 3	$D_m = 1024$ mm.
Escalón No. 4	$D_m = 1088$ mm.
Escalón No. 5	$D_m = 1154$ mm.

Además que la presión de diseño es de 8 bar, el gasto es de 59.13 Ton/Hr, las toberas son del tipo convergente y la turbina trabaja directamente acoplada al generador que debe girar a 3600 rpm.

Para calcular la velocidad periférica media de cada escalón se utiliza

$$v_m = \frac{\pi \text{ rpm } D_m}{60} \quad \text{IV.1}$$

Escalón No. 1 $v_m = 178 \text{ m/s.}$

Escalón No. 2 $v_m = 184 \text{ m/s.}$

Escalón No. 3 $v_m = 193 \text{ m/s.}$

Escalón No. 4 $v_m = 205 \text{ m/s.}$

Escalón No. 5 $v_m = 217 \text{ m/s.}$

Con esta información y suponiendo que en el diseño de las toberas se ha tratado de obtener el máximo rendimiento de cada escalón, se procede a calcular la geometría de cada tobera.

En el proceso de cálculo se emplea la ecuación de conservación de la energía

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2} = h_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

Para el primer escalón se supone $v_1 = 0$ y además que la potencia-entregada por la turbina es máxima; por lo cual, la relación de la velocidad del vapor entre la velocidad del álabe es igual a 2.

Conociendo la velocidad del álabe y conociendo también la velocidad del vapor v_2 , la única incógnita será la h_2

Despejando de la ec. III.1 a la h_2

$$h_2 = h_1 + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

(22)

Si h_1 está en Kj/Kg la diferencia de velocidades se tendrá que dividir por 1000 para que las unidades sean congruentes.

$$h_2 = h_1 + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2000} \quad \text{IV.2}$$

Conociendo h_2 se procede a calcular el volumen específico y determinar el área de salida en la tobera utilizando la ec. de continuidad.

$$A_2 = \frac{Q v_2}{v_2} \quad \text{IV.3}$$

De esta forma ha quedado determinada el área de salida de las toberas. Ahora para calcular el área de entrada se procede como sigue.

Al calcular la velocidad de salida de los álabes se utilizan las ecuaciones III.12, III.13, III.14 y III.15 y dado que el volumen específico permanece constante al paso por el álabe, al área de entrada de la siguiente corrida de toberas será:

$$A_1 = \frac{Q v_2}{v_1} \quad \text{IV.4}$$

Este proceso es repetitivo para cada escalón. Para dejar resuelto el problema del cálculo de las áreas falta deducir la ecuación que describe el comportamiento del volumen específico en función de la variación en la entalpía. Además se deducirá la ecuación de la presión en función del volumen específico.

En el capítulo III se indicaba que para un proceso de expansión -- del vapor saturado en forma adiabática, la presión y el volumen se pueden relacionar mediante

$$p v^k = \text{cte.}$$

y que la entalpfa se podfa representar por

$$h = \frac{k}{k - 1} p v + \text{cte.}$$

Para verificar que efectivamente se puede realizar la aproximación anterior (suponer que el vapor se comporta como gas perfecto) se confeccionó la Tabla A con valores obtenidos directamente de las tablas de vapor⁵. En ella se indica el error que se comete a diferentes presiones, al utilizar las formulas aproximadas.

TABLA A.

PARA $P = 8$ Bars Vapor Saturado
 $S = \text{cte.}$

Presión (Bars)	Volumen Específico (m ³ /Kg)	Entalpfa (KJ/Kg)	Error de Aproximación	
			$P - v$	$v - h$
8	0.2403	2767.50	0.17	2.00
7	0.2701	2742.02	0.09	1.17
6	0.3091	2713.21	0.01	0.35
5	0.3627	2679.67	0.09	0.50
4	0.4411	2639.78	0.20	1.20
3	0.5688	2589.96	0.11	1.59
2	0.8115	2522.52	0.32	1.77
1	1.4983	2414.39	0.04	0.21
0.7	2.0564	2362.06	0.23	2.23

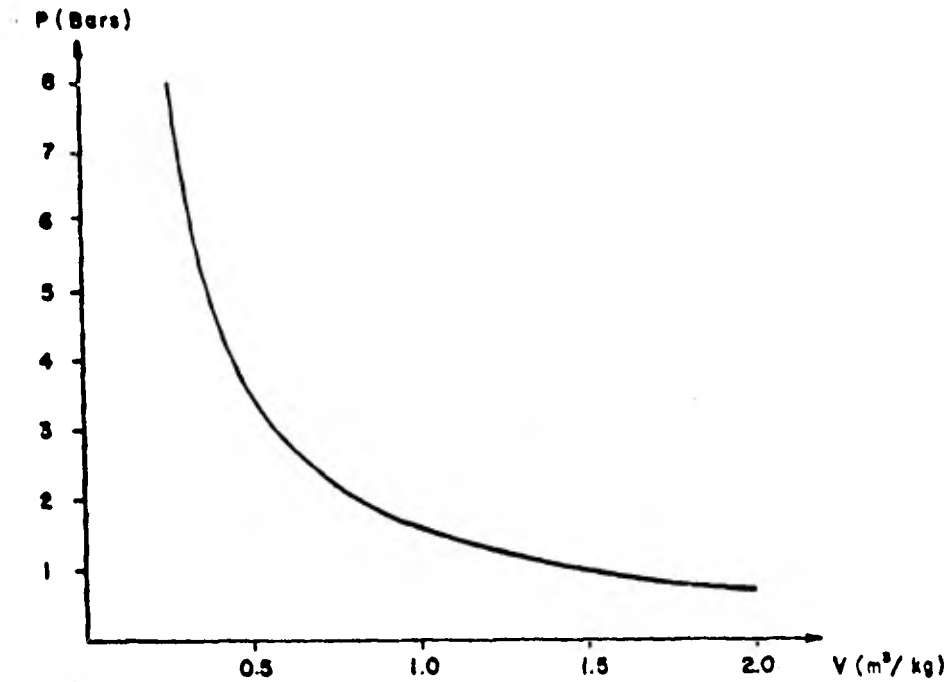


FIG. IV. 1. -Variación de la presión con el volumen específico a entropía constante.

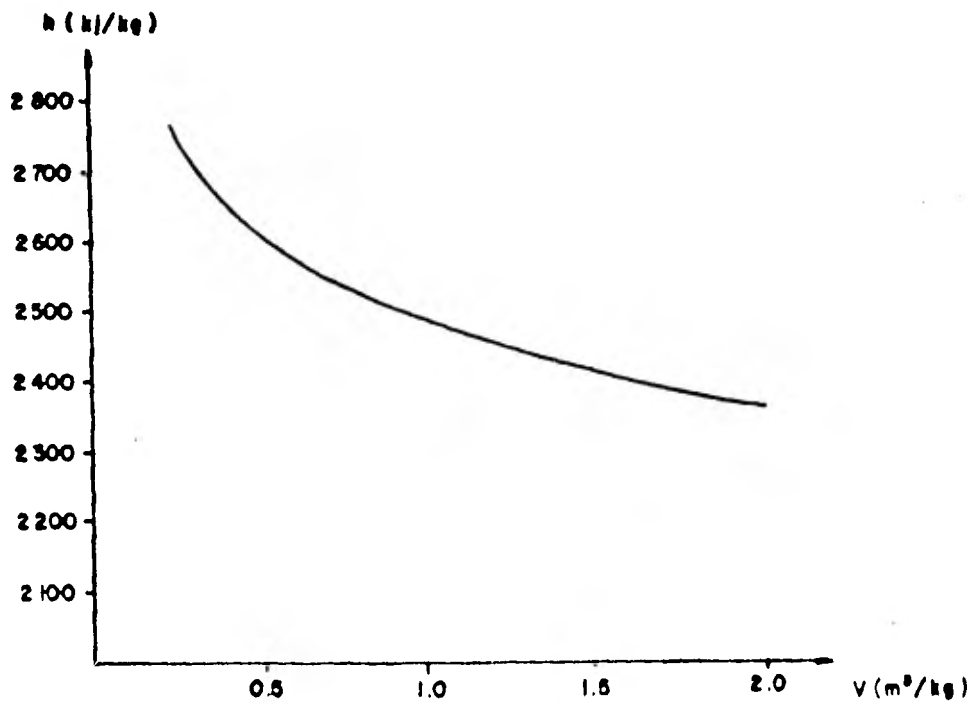


FIG. IV. 2. -Variación de la entalpía con el volumen específico a entropía constante.

Como se puede ver en las curvas IV.1 y IV.2, se deduce que estas son de la forma $x = a y^b$

a) Para $p - v$

$$6 = a (0.3091)^b \quad \text{IV.5}$$

$$3 = a (0.5688)^b \quad \text{IV.6}$$

Resolviendo estas ecuaciones en forma simultanea

$$2 = \left(\frac{0.3091}{0.5688} \right)^b$$

$$b = - 1.136$$

$$a = 1.583$$

Se aproxima para esta curva $b = - k = -1.135$

$$p = 1.583 v^{-1.135} \quad \text{IV.7}$$

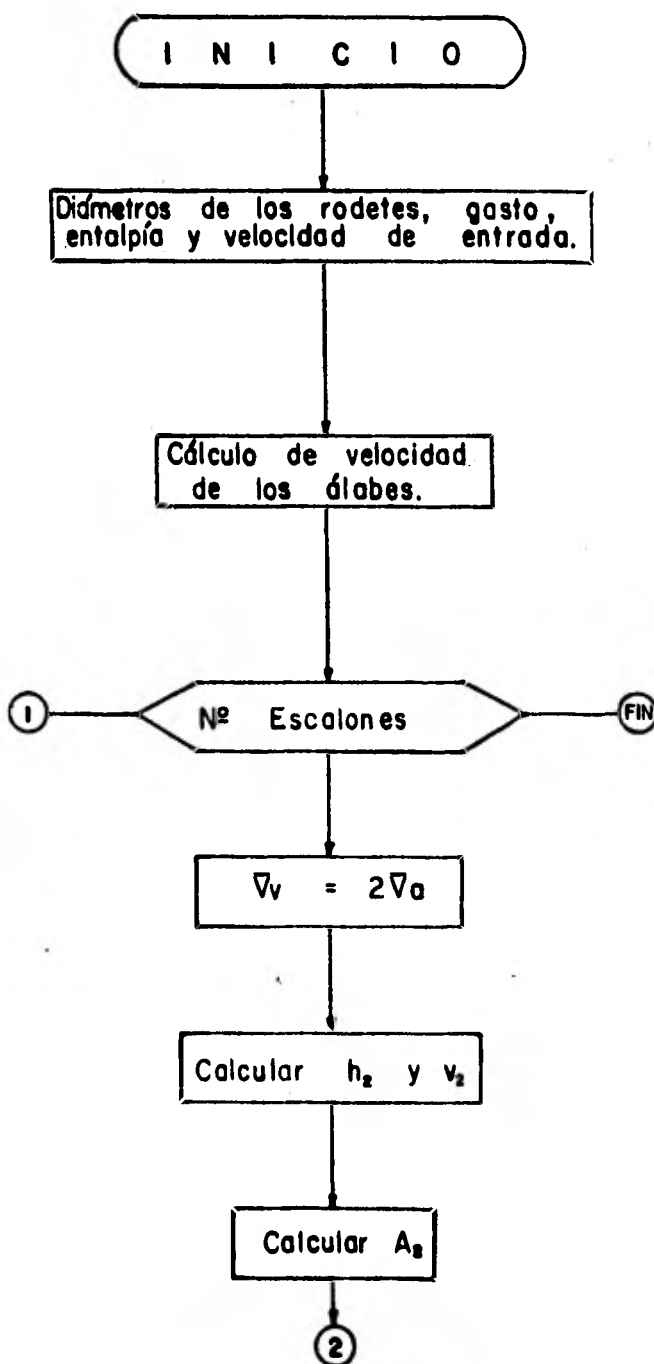
b) Para $v - h$ se procede de la misma forma

$$v = 0.943 E46 h^{-13.539} \quad \text{IV.8}$$

Como se observa en la Tabla A, el error que se tiene al aproximar por este método es pequeño, por lo que se consideran válidas estas curvas obtenidas.

En las páginas siguientes se muestran el diagrama de flujo, programa de computadora en lenguaje Basic y los resultados obtenidos para la determinación de la geometría de la turbina.

Diagrama de flujo para calcular la geometría de la turbina.



(28)

②

Con $\alpha = 20^\circ$ calcular \bar{V}_s de los
dábels.

Calcular A_1 del siguiente escalón.

Imprimir resultados del escalón.

①


```

10 CLEAR
20 READ D(1),D(2),D(3),D(4),D(5)
30 !
40 ! condiciones iniciales
50 !
60 V1(1)=0 @ H1(1)=3787.5 @ A1(1)=0
70 !
80 ! calculo de los Parametros
   del escalon
90 !
100 FOR I=1 TO 5
110 V2(I)=2*3600*PI*D(I)/60
120 H2(I)=H1(I)+V2(I)^2-V1(I)^2
   /2000
130 B(I)=9.43E45*H2(I)^-13.539
140 A2(I)=0.361E10/V2(I)
150 !
160 ! calculo de la velocidad
   de salida del alabe
170 !
180 R=SQR(V2(I)^2+(PI*3600*D(I)/
   60)^2-2*PI*3600*D(I)/60*V2(I)
   *COS(DTR(20)))
190 G=ACS((R^2+(PI*3600*D(I)/60)
   ^2-V2(I)^2)/(2*R*PI*3600*D(I)
   /60))
200 K=180-RTD(G)
210 V1(I+1)=SQR((PI*3600*D(I)/60)
   ^2+R^2-2*R*PI*3600*D(I)/60*
   COS(DTR(K)))
220 A1(I+1)=0.361E10/V1(I+1)
230 !
240 ! impresion de resultados
250 !
260 PRINT "ESCALON":I
270 PRINT "A1=";A1(I);"(m2)"
280 PRINT "A2=";A2(I);"(m2)"
290 PRINT "V1=";V1(I);"(m/s)"
300 PRINT "V2=";V2(I);"(m/s)"
310 PRINT "H2=";H2(I);"(KJ/Kg)"
320 PRINT "Vesp=";B(I);"(m3/Kg)"
330 PRINT "BETA=";K;"Grados"
340 PRINT "" @ PRINT ""
350 H1(I+1)=H2(I)
360 NEXT I
370 DATA 944.976,1024.1088,1
   154.5813
380 END

```

```

ESCALON 1
A1= 0 (m2)
A2= 1.48728848928E-3 (m2)
V1= 0 (m/s)
V2= 755.979615798 (m/s)
H2= 3704.17484953 (KJ/Kg)
Vesp= 322250018963 (m3/Kg)
BETA= 37.877987142 Grados

```

```

ESCALON 2
A1= 4.38247652629E-2 (m2)
A2= 1.94670015056E-2 (m2)
V1= 123.595693496 (m/s)
V2= 367.943331588 (m/s)
H2= 2644.12164963 (KJ/Kg)
Vesp= 436760529068 (m3/Kg)
BETA= 37.877987144 Grados

```

```

ESCALON 3
A1= 5.61393783019E-2 (m2)
A2= 2.62146451134E-2 (m2)
V1= 127.785378926 (m/s)
V2= 386.038905272 (m/s)
H2= 2577.77318286 (KJ/Kg)
Vesp= 616126206526 (m3/Kg)
BETA= 37.877987145 Grados

```

```

ESCALON 4
A1= 7.54820625532E-2 (m2)
A2= 3.68244160155E-2 (m2)
V1= 134.069904821 (m/s)
V2= 410.166336852 (m/s)
H2= 2502.84234061 (KJ/Kg)
Vesp= 919582089732 (m3/Kg)
BETA= 37.877987145 Grados

```

```

ESCALON 5
A1= 1.06031680002 (m2)
A2= 5.52698801258E-2 (m2)
V1= 142.449273873 (m/s)
V2= 435.047750658 (m/s)
H2= 2418.15496574 (KJ/Kg)
Vesp= 1.46392919503 (m3/Kg)
BETA= 37.877987145 Grados

```

CAPITULO V.- OPERACION DE LA TURBINA IDEAL EN CONDICIONES DISTINTAS A LAS DE DISEÑO.

Al sacar a la turbina de sus condiciones de operación de diseño se hace necesario realizarle al proceso de cálculo algunas modificaciones- como:

- Variación de las condiciones de entrada del vapor a la turbina debido a la presión de admisión que se modifica.
- Obtención de curvas p-v y v-h para la presión de admisión a - entropía constante.

- Modificación del gasto manejado por la turbina.

La variación del volumen específico se obtiene directamente de las tablas de vapor.

Para la obtención de las curvas p-v y v-h se procede de la misma manera como se obtuvieron las ecs. IV.6 y IV.7 y se llegan a las siguientes ecuaciones para las diferentes presiones.

TABLA V.I

Presión	p - v	v - h
5	$p = 1.635 v^{-1.14}$	$v = 6.27E45 h^{-13.149}$
6	$p = 1.614 v^{-1.139}$	$v = 7.82E45 h^{-13.195}$
7	$p = 1.598 v^{-1.135}$	$v = 9.73E45 h^{-13.570}$
8	$p = 1.583 v^{-1.135}$	$v = 9.43E45 h^{-13.539}$

Para 9 bars de presión se utilizan las ecs. para una presión de 8 bars variando únicamente las condiciones de estancamiento para presión de 9 bars.

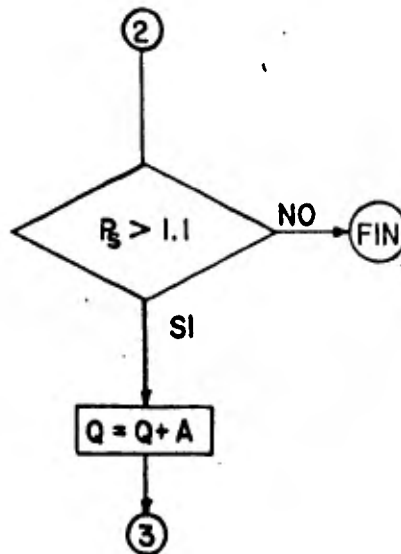
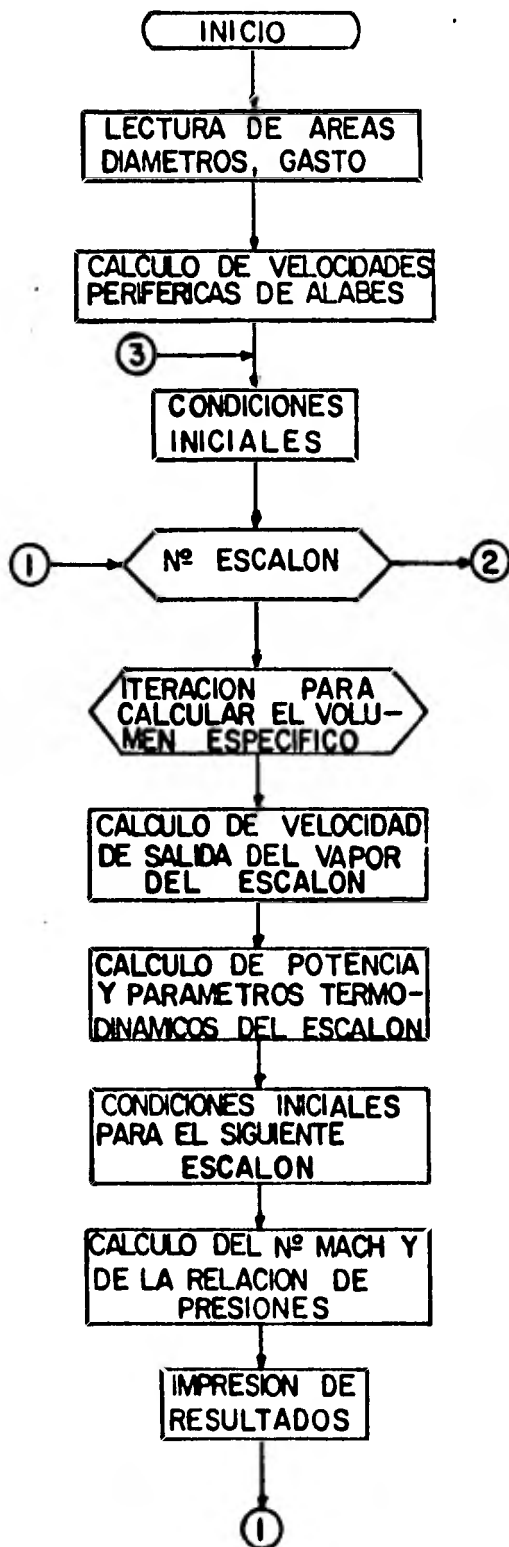
La variación del gasto manejado por la turbina se efectúa en forma iterativa hasta alcanzar el gasto que dé la presión de descarga deseada sin llegar a la velocidad crítica ($M = 1$) en ninguno de los escalones de la turbina.

El proceso de cálculo se efectúa de acuerdo a las ecuaciones fundamentales descritas en el Capítulo III y como se mencionó anteriormente este proceso es iterativo, tanto para el volumen específico como para el gasto.

Cabe hacer notar que el método es muy sensible al gasto de vapor, por lo que en ocasiones se presenta el resultado obtenido hasta con -- cuatro cifras decimales.

Las corridas de computadora se muestran únicamente para el gasto indicado, pues éstas son bastante grandes y no es el objetivo de este trabajo demostrar la convergencia del método; por lo tanto, sólo se -- presentan los resultados finales.

El diagrama de flujo para resolver el problema es el siguiente.



Listado del programa en lenguaje Basic y corrida típica para una presión de admisión de 9 bar.

```

10 CLEAR
20 |
30 | lectura de los datos
40 |
50 READ A2(1),A2(2),A2(3),A2(4)
   ,A2(5),D(1),D(2),D(3),D(4),D
   (5),Q
60 |
70 | calculo de las velocidades
   perifericas de los alabes
80 |
90 FOR I=1 TO 5
100 M(I)=3600*PI*D(I)/60
110 NEXT I
120 |
130 | condiciones iniciales para
   esta presion
140 |
150 B1(1)= 2403 @ V1(1)=0 @ W=0
160 |
170 | condicion inicial para em-
   pezar a iterar
180 |
190 B2(1)=B1(1)
200 PRINT "Q = ";Q;"(T/Hr)"
210 PRINT "" @ PRINT ""
220 |
230 | calculo de los parametros
   del escalon
240 |
250 FOR I=1 TO 5
260 |
270 | proceso de iteracion
280 |
290 P1(I)=1.583*B1(I)^-1.135
300 B2(I)=B2(1)
310 X1=1.135/.135*158300*B1(I)^-
   .135/1000+V1(I)^2/2000
320 X2=1.135/.135*158300*B2(I)^-
   .135/1000+(Q/3.6/A2(I))*B2(I)
   ^2/2000
330 IF ABS(X1-X2)<.000001 THEN 4
   30
340 DISP X1-X2
350 G=1.135/1000*158300*B2(I)^-1
   .135-(Q/3.6/A2(I))^2/1000*B2
   (I)
360 B2(I)=B2(I)-(X1-X2)/G
370 GOTO 300
380 |
390 | final del proceso iterati-
   vo para este escalon
400 |
410 | calculo de la velocidad de
   salida del vapor del rodete
   de alabes
420 |
430 V2(I)=Q/3.6*B2(I)/A2(I)
440 R=SQR(V2(I)^2+M(I)^2-2*V2(I)
   *M(I)*COS(DTR(20)))
450 V1(I+1)=SQR(R^2+M(I)^2-2*M(I)
   *R*COS(DTR(37.88)))
460 |
470 | calculo de la potencia y
   parametros termodinamicos de
   el escalon
480 |
490 W(I)=Q/3.6*M(I)*2*R*COS(DTR(
   37.88))/1000000
500 H1(I)=(B1(I)/9.43E45)^(-1/13
   .539)
510 H2(I)=(B2(I)/9.43E45)^(-1/13
   .539)
520 |
530 | condiciones iniciales para
   el siguiente escalon
540 |
550 P1(I+1)=1.583*B2(I)^-1.135
560 B1(I+1)=B2(I)
570 B2(I+1)=B2(I)
580 B=B2(I)
590 W=W+W(I)
600 |
610 | calculo del No. de Mach y
   de la relacion de presiones
620 |
630 N1=V2(I)/SQR(1.135*B*P1(I+1)
   *1000000)
640 Y=P1(I+1)/P1(I)
650 |
660 | impresion de resultados
670 |
680 PRINT "ESCALON";I @ PRINT ""
690 PRINT "P1=";P1(I);"(Bars)" @
   PRINT "P2=";P1(I+1);"(Bars)"
   "
700 PRINT "H1=";H1(I);"(KJ/Kg)"
   @ PRINT "H2=";H2(I);"(KJ/Kg)"
   @ PRINT "V1=";V1(I);"(m/s)"
   "
710 PRINT "V2=";V2(I);"(m/s)" @
   PRINT "W=";W(I);"(Mwatts)"
720 PRINT "Vesp=";B;"(m3/Kg)" @
   PRINT "R=";Y @ PRINT "No MA
   CH ";N1

```

```
730 PRINT " e PRINT "  
740 NEXT I  
750 !  
760 ! velocidad de salida  
770 !  
780 PRINT "Vs=";V1(I);"m/s"  
790 PRINT "  
800 !  
810 ! impresion de resultados fi  
nales  
820 !  
830 PRINT "POTENCIA TOTAL . ." ;W  
;"Muatts"  
840 PRINT " " @ PRINT "CEV . ." ;Q/  
W;"(Kg/Kw-Hr)"  
  
850 !  
860 ! si la presion de salida es  
mayor a 1.1 bar, se incremen  
ta el gasto y empieza nueva  
mente  
870 ! el proceso de iteracion  
880 !  
890 DATA 1.48710455505E-2,1.9499  
8427695E-2,2.62229337575E-2,  
3.68342938707E-2,5.525696768  
04E-2  
900 DATA .944, .976,1.024,1.088,1  
.154,59.2731,8  
910 END
```

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

P1 - PRESION A LA ENTRADA DE LA TOBERA
P2 - PRESION A LA SALIDA DE LA TOBERA
V1 - VELOCIDAD DEL VAPOR A LA ENTRADA DE LA TOBERA
V2 - VELOCIDAD DEL VAPOR A LA SALIDA DE LA TOBERA
Vs - VELOCIDAD DE SALIDA DEL VAPOR DE LA TURBINA
W - TRABAJO REALIZADO POR EL ESCALON DE LA TURBINA
R* - RELACION DE PRESSIONES ENTRE LA ENTRADA Y LA SALIDA DE LA TOBERA

Q... 66 3272 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 8.99894847712 (Bars)
P2= 6.35935650341 (Bars)
H1= 2784.98427362 (KJ/Kg)
H2= 2722.76872814 (KJ/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 363.872097549 (m/s)
W= 1.06551918862 (Muatts)
Vesp= 29369807159 (m3/Kg)
R*= .706677732357
No.MACH .790303108212

ESCALON 2

P1= 6.35935650341 (Bars)
P2= 4.54633235466 (Bars)
H1= 2722.76872814 (KJ/Kg)
H2= 2663.94877456 (KJ/Kg)
V1= 127.326520057 (m/s)
V2= 372.970943847 (m/s)
W= 1.12238643478 (Muatts)
Vesp= 394745280148 (m3/Kg)
R*= 714904464347
No.MACH .826395617228

ESCALON 3

P1= 4.54633235466 (Bars)
P2= 3.10972971526 (Bars)
H1= 2663.94877456 (KJ/Kg)
H2= 2598.91700499 (KJ/Kg)
V1= 130.093572104 (m/s)
V2= 387.565516337 (m/s)
W= 1.21534915921 (Muatts)
Vesp= .551616493712 (m3/Kg)
R*= 684008442997
No.MACH .878349289756

ESCALON 4

P1= 3.10972971526 (Bars)
P2= 1.99889183654 (Bars)
H1= 2598.91700499 (KJ/Kg)
H2= 2525.23762226 (KJ/Kg)
V1= 134.76644403 (m/s)
V2= 407.266164346 (m/s)
W= 1.34623639091 (Muatts)
Vesp= 814219531235 (m3/Kg)
R*= 642786357519
No.MACH .947578055483

(35)

ESCALON 5

P1= 1.99889183654 (Bars)
P2= 1.25028472685 (Bars)
H1= 3525.23762226 (KJ/Kg)
H2= 2449.29525171 (KJ/Kg)
V1= 141.201427739 (m/s)
V2= 410.47414348 (m/s)
W= 1.386485179 (Mwatts)
Vesp= 1.23107267196 (m³/Kg)
Rt= 625488935316
No: MACH... 982068013898

Us= 141.738802151 m/s

POTENCIA TOTAL

6.13597635252 Mwatts

CEM 10.8095592599 (Kg/Kg-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 8 bar.

Q = 59.2731 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 7.98592790183 (Bars)
P2= 5.64475738517 (Bars)
H1= 2763.42394363 (Kj/Kg)
H2= 2701.72991926 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 361.181260297 (m/s)
W= .940216379081 (Mwatts)
Vesp= .32622074273 (m³/Kg)
Rk= .706838009879
No. MACH . . . 790039584655

ESCALON 2

P1= 5.64475738517 (Bars)
P2= 4.03526714879 (Bars)
H1= 2761.72991926 (Kj/Kg)
H2= 2643.35615001 (Kj/Kg)
V1= 126.043366074 (m/s)
V2= 370.228521315 (m/s)
W= .990469070037 (Mwatts)
Vesp= .438476097081 (m³/Kg)
Rk= .714869900235
No. MACH . . . 826157626321

ESCALON 3

P1= 4.03526714879 (Bars)
P2= 2.75997265166 (Bars)
H1= 2643.35615001 (Kj/Kg)
H2= 2578.81588676 (Kj/Kg)
V1= 128.823643639 (m/s)
V2= 384.738469341 (m/s)
W= 1.07262680094 (Mwatts)
Vesp= .612761894077 (m³/Kg)
Rk= .683962800302
No MACH . . . 878151439878

ESCALON 4

P1= 2.75997265166 (Bars)
P2= 1.77356030936 (Bars)
H1= 2578.81588676 (Kj/Kg)
H2= 2505.65926352 (Kj/Kg)
V1= 133.50251839 (m/s)
V2= 404.398335453 (m/s)
W= 1.18867896126 (Mwatts)
Vesp= .904704118124 (m³/Kg)
Rk= .642600682399
No. MACH . . . 947622064709

ESCALON 5

P1= 1.77356030936 (Bars)
P2= 1.09865357787 (Bars)
H1= 2505.65926352 (Kj/Kg)
H2= 2428.77492887 (Kj/Kg)
V1= 139.976702417 (m/s)
V2= 411.075439181 (m/s)
W= 1.24185354282 (Mwatts)
Vesp= 1.3796907689 (m³/Kg)
Rk= .619462203835
No. MACH . . . 991097745257

Vs= 141.912197621 m/s

POTENCIA TOTAL . . .
5.43384475419 Mwatts

CEV . . . 10.9881327644 (Kg/Ku-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 7 bar.

Q = 52.142 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 7.00201763193 (Bars)
 P2= 4.94749732081 (Bars)
 H1= 2762.4564315 (Kj/Kg)
 H2= 2639.49248171 (Kj/Kg)
 V1= 0 (m/s)
 V2= 360.391939025 (m/s)
 W= .924120578101 (Mwatts)
 Vesp= .370025273073 (m3/Kg)
 R* = .706581671290
 No.MACH = .790621572177

ESCALON 2

P1= 4.94749732081 (Bars)
 P2= 3.5355524614 (Bars)
 H1= 2639.49248171 (Kj/Kg)
 H2= 2639.94399238 (Kj/Kg)
 V1= 125.654704095 (m/s)
 V2= 369.247612916 (m/s)
 W= .867415408099 (Mwatts)
 Vesp= .49712273065 (m3/Kg)
 R* = .714614325616
 No.MACH = .826721651952

ESCALON 3

P1= 3.5355524614 (Bars)
 P2= 2.41804734996 (Bars)
 H1= 2639.94399238 (Kj/Kg)
 H2= 2574.19671798 (Kj/Kg)
 V1= 128.371095488 (m/s)
 V2= 383.400025095 (m/s)
 W= .937936464401 (Mwatts)
 Vesp= .694141852222 (m3/Kg)
 R1= .683923481934
 No.MACH = .878410848194

ESCALON 4

P1= 2.41804734996 (Bars)
 P2= 1.56034920268 (Bars)
 H1= 2574.19671798 (Kj/Kg)
 H2= 2500.41734536 (Kj/Kg)
 V1= 132.924708193 (m/s)
 V2= 401.101397145 (m/s)
 W= .8308930401 (Mwatts)
 Vesp= 1.02004971508 (m3/Kg)
 R1= .645293071993
 No.MACH = .94370155977

ESCALON 5

P1= 1.56034920268 (Bars)
 P2= 1.02562182704 (Bars)
 H1= 2500.41734536 (Kj/Kg)
 H2= 2431.72753422 (Kj/Kg)
 V1= 138.647919346 (m/s)
 V2= 396.594153598 (m/s)
 W= .978979570677 (Mwatts)
 Vesp= 1.47488156079 (m3/Kg)
 R1= .657302753306
 No.MACH = .933007534232

Vs= 135.989557775 (m/s)

POTENCIA TOTAL

4.63934507798 Mwatts

CEV 11.2398863632 (Kg-Kw-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 6 bar.

Q = 44.89 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00541819255 (Bars)
P2= 4.24567643454 (Bars)
H1= 2755.86686664 (KJ/Kg)
H2= 2693.00970093 (KJ/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 358.693095511 (m/s)
W= 703929721009 (Watts)
Vesp= 1427775986038 (m³/Kg)
Rt= 706974318592
No MACH = 790028914514

ESCALON 2

P1= 4.24567643454 (Bars)
P2= 3.03901512197 (Bars)
H1= 2693.00970093 (KJ/Kg)
H2= 2633.25717081 (KJ/Kg)
V1= 124.863517545 (m/s)
V2= 366.88163841 (m/s)
W= 738617998007 (Watts)
Vesp= 573733200056 (m³/Kg)
Rt= 715790552193
No MACH = 824720186123

ESCALON 3

P1= 3.03901512197 (Bars)
P2= 2.09494102288 (Bars)
H1= 2633.25717081 (KJ/Kg)
H2= 2584.33300993 (KJ/Kg)
V1= 127.317342177 (m/s)
V2= 378.199063532 (m/s)
W= 788728771042 (Watts)
Vesp= 795313091707 (m³/Kg)
Rt= 769449679625
No MACH = 89679632953

ESCALON 4

P1= 2.09494102288 (Bars)
P2= 1.40343759465 (Bars)
H1= 2584.33300993 (KJ/Kg)
H2= 2544.13665682 (KJ/Kg)
V1= 130.20310002 (m/s)
V2= 378.808853629 (m/s)
W= 79974378937 (Watts)
Vesp= 1.11600466398 (m³/Kg)
Rt= 679968348622
No MACH = 859903238513

ESCALON 5

P1= 1.40343359465 (Bars)
P2= 1.09314882904 (Bars)
H1= 2544.13665682 (KJ/Kg)
H2= 2499.93956601 (KJ/Kg)
V1= 131.524571948 (m/s)
V2= 320.285137462 (m/s)
W= 589651803614 (Watts)
Vesp= 1.31900026002 (m³/Kg)
Rt= 750949691877
No MACH = 766754658324

W= 178.077352491 (m³/s)

POTENCIA TOTAL

3.72057817312 (Watts)

W= 12.3985722317 (m³/hr)

Resultados para una presión de admisión de 5 bar.

Q = 37.59 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00631701382 (Bars)
P2= 3.54404298788 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2687.25756686 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 356.211510553 (m/s)
W= .582435401268 (Muatts)
Vesp= .507317248112 (m3/Kg)
Rt= .707914216798
No. MACH. . . . 788534526163

ESCALON 2

P1= 3.54404298788 (Bars)
P2= 2.5465287974 (Bars)
H1= 2687.25756686 (Kj/Kg)
H2= 2628.65018377 (Kj/Kg)
V1= 123.737919884 (m/s)
V2= 363.027677725 (m/s)
W= .60739662051 (Muatts)
Vesp= .677955240535 (m3/Kg)
Rt= .718537784702
No. MACH. . . . 820100354807

ESCALON 3

P1= 2.5465287974 (Bars)
P2= 1.78334497891 (Bars)
H1= 2628.65018377 (Kj/Kg)
H2= 2566.91567744 (Kj/Kg)
V1= 125.670832501 (m/s)
V2= 368.980085772 (m/s)
W= .632728594027 (Muatts)
Vesp= .926647120223 (m3/Kg)
Rt= .70030426545
No. MACH. . . . 851981422087

ESCALON 4

P1= 1.78334497891 (Bars)
P2= 1.28191554182 (Bars)
H1= 2566.91567744 (Kj/Kg)
H2= 2511.00015716 (Kj/Kg)
V1= 127.321776083 (m/s)
V2= 350.913627639 (m/s)
W= .584951817072 (Muatts)
Vesp= 1.23789200482 (m3/Kg)
Rt= .718826450844
No. MACH. . . . 82685854341

ESCALON 5

P1= 1.28191554182 (Bars)
P2= 1.05532593362 (Bars)
H1= 2511.00015716 (Kj/Kg)
H2= 2478.62833578 (Kj/Kg)
V1= 126.378644585 (m/s)
V2= 277.437066443 (m/s)
W= .373861005474 (Muatts)
Vesp= 1.46818812582 (m3/Kg)
Rt= .823241390866
No. MACH. . . . 661580039917

Us= 149.923103433 (m/s)

POTENCIA TOTAL
2.78137343835 Muatts

CEM. . . . 13.514905795 (Kg/Ku-Hr)

Los resultados obtenidos hasta ahora, muestran el funcionamiento de la turbina ideal al variar únicamente la presión y el gasto en la admisión.

Ahora se estudiará su comportamiento al eliminarle el primer escalón (álabes y toberas), proceso que se antoja conveniente, pues al eliminar la primera corrida, la turbina podrá manejar un gasto mayor y -- aumentará la potencia entregada, aunque al realizar esta modificación se le disminuirá la eficiencia.

Para estudiar el comportamiento de la turbina bajo estas condiciones de trabajo se parte del siguiente listado, el cual varía del anterior únicamente en la geometría del primer escalón, en el que ahora se le asignará un valor de cero a la velocidad del vapor inicial y una área bastante grande a la tobera para simular que las condiciones termodinámicas del vapor no cambian al pasar por el primer escalón.

Otra variante que puede realizarse a la turbina para aumentar la potencia generada consiste en instalar un condensador en el escape, -- para disminuir la presión en la descarga y tener un salto entálpico mayor para ser aprovechado.

La limitante que se tiene en este caso, es el número de Mach que se alcanza en el último escalón y que debe tender a la unidad, por lo cual se aumentará el gasto manejado hasta lograr estas condiciones de trabajo.

Se hace la observación de que la presión de descarga obtenida a condiciones nominales se considera como la atmosférica, por lo que -- cualquier presión menor a ésta será interpretada como vacío en el escape.

Los resultados obtenidos al efectuar estas variantes se listan a continuación.

Listado del programa en lenguaje Basic para calcular la variación termodinámica del vapor al pasar por los diferentes escalones de la -- turbina, cuando se le ha eliminado el primer escalón.

```

10 CLEAR
20 READ A2(1),A2(2),A2(3),A2(4)
  ,A2(5),M(1),M(2),M(3),M(4),M
  (5),Q
30 !
40 ! condiciones iniciales
50 !
60 B1(1)=.2483 @ V1(1)=0 @ W=0
70 B2(1)=B1(1)
80 PRINT "Q...":M;"(T/Hr)"
90 PRINT "" @ PRINT ""
100 FOR I=1 TO 5
110 !
120 ! empieza iteracion para cal
  cular el volumen especifico
  de este escalon
130 !
140 P1(I)=1.583*B1(I)^-1.135
150 B2(I)=B2(I)
160 X1=1.135/1.135+158300*B1(I)^-
  .135/1000+V1(I)^2/2000
170 X2=1.135/1.135+158300*B2(I)^-
  .135/1000+(Q/3.6/A2(I))*B2(I)
  ^2/2000
180 IF ABS(X1-X2)<.000001 THEN 2
  80
190 DISP X1-X2
200 G=1.135/1000+158300*B2(I)^-1
  .135-(Q/3.6/A2(I))^2/1000*B2
  (I)
210 B2(I)=B2(I)-(X1-X2)/G
220 GOTO 150
230 !
240 ! termina iteracion
250 !
260 ! calculo de las velocidades
  de entrada y salida del va
  por en el alabe
270 !
280 V2(I)=Q/3.6*B2(I)/A2(I)
290 R=SQR(V2(I)^2+M(I)^2-2*V2(I)
  *M(I)*COS(DTR(20)))
300 W(I)=Q/3.6*M(I)*2*R*COS(DTR(
  37.88))/1000000
310 V1(I+1)=SQR(R^2+M(I)^2-2*M(I)
  *R*COS(DTR(37.88)))
320 !
330 ! calculo de los parametros
  termodinamicos del escalon
340 !
350 H1(I)=(B1(I)/9.43E4)^(-1/13
  .539)
360 H2(I)=(B2(I)/9.43E4)^(-1/13
  .539)
370 P1(I+1)=1.583*B2(I)^-1.135
380 !
390 ! calculo de la potencia, No
  de Mach y relacion de presio
  nes
400 !
410 B=B2(I)
420 W(I)=Q/3.6*M(I)*2*R*COS(DTR(
  37.88))/1000000
430 Y=P1(I+1)/P1(I)
440 N2=V2(I)/SQR(1.135*B*P1(I+1)
  *1000000)
450 !
460 ! impresion de resultados
470 !
480 PRINT "ESCALON":I
490 PRINT "P1=";P1(I);"(Bars)" @
  PRINT "P2=";P1(I+1);"(Bars)"
  "
500 PRINT "H1=";H1(I);"(KJ/Kg)"
  @ PRINT "H2=";H2(I);"(KJ/Kg)"
  @ PRINT "V1=";V1(I);"(m/s)"
  "
510 PRINT "V2=";V2(I);"(m/s)" @
  PRINT "W=";W(I);"(Muatts)"
520 PRINT "Vesp=";B;"(m3/Kg)" @
  PRINT "R=";Y @ PRINT "No MA
  CH ";H2
530 PRINT "" @ PRINT ""
540 !
550 ! condiciones iniciales del
  siguiente escalon
560 !
570 B1(I+1)=B2(I)
580 B2(I+1)=B2(I)
590 W=W+W(I)
600 NEXT I
610 !
620 ! resultados finales
630 !
640 PRINT "POTENCIA TOTAL "W
  "Muatts"
650 PRINT "" @ PRINT "CEV "Y@
  W;"(Kg/Ku-Hr)"
660 DATA 140.710455585,1.9489842
  7695E-2,2.62229337575E-2,3.6
  8342938707E-2,5.52569676804E
  -2
670 DATA 0,184,193,205,217.8,78
  9063,8
680 END

```

Resultados para una presión de admisión de 8 bar.

Q = 78.9863 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 7.98592790183 (Bars)
P2= 7.98592790183 (Bars)
H1= 2763.42394363 (KJ/Kg)
H2= 2763.42394363 (KJ/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 3.54177889317E-2 (m/s)
W= 0 (Mwatts)
Vesp= .2403 (m3/Kg)
Rx= 1
No. MACH. = 7.58898923567E-5

ESCALON 2

P1= 7.98592790183 (Bars)
P2= 5.4650787673 (Bars)
H1= 2763.42394363 (KJ/Kg)
H2= 2696.04847103 (KJ/Kg)
V1= 3.54177889317E-2 (m/s)
V2= 377.283217129 (m/s)
W= 1.36146330279 (Mwatts)
Vesp= .335652137901 (m3/Kg)
Rx= .684338605918
No. MACH. = .826849816205

ESCALON 3

P1= 5.4650787673 (Bars)
P2= 3.73838029417 (Bars)
H1= 2696.04847103 (KJ/Kg)
H2= 2630.24317603 (KJ/Kg)
V1= 132.183407456 (m/s)
V2= 392.026178503 (m/s)
W= 1.47424034376 (Mwatts)
Vesp= .469015470709 (m3/Kg)
Rx= .684048749079
No. MACH. = .878783339538

ESCALON 4

P1= 3.73838029417 (Bars)
P2= 2.40256495402 (Bars)
H1= 2630.24317603 (KJ/Kg)
H2= 2555.6469776 (KJ/Kg)
V1= 136.842648729 (m/s)
V2= 412.016247847 (m/s)
W= 1.63361367292 (Mwatts)
Vesp= .69240072326 (m3/Kg)
Rx= .642675374083
No. MACH. = .948200296273

ESCALON 5

P1= 2.40256495402 (Bars)
P2= 1.4906692574 (Bars)
H1= 2555.6469776 (KJ/Kg)
H2= 2477.48544132 (KJ/Kg)
V1= 143.306302422 (m/s)
V2= 418.232126228 (m/s)
W= 1.7045249656 (Mwatts)
Vesp= 1.05437538821 (m3/Kg)
Rx= .620449097497
No. MACH. = .99021883236

POTENCIA TOTAL

6.17384228507 Mwatts

CEV = 12.7807443658 (Kg/Kw-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 7 bar.

Q... 69.41615 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 7.00201763193 (Bars)
P2= 7.00201763193 (Bars)
H1= 2762.4564315 (Kj/Kg)
H2= 2762.4564315 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 3.53591369527E-2 (m/s)
W= 0 (Muatts)
Vesp= .2727 (m3/Kg)
R*= 1
No. MACH... 7.59538087033E-5

ESCALON 2

P1= 4.78964703425 (Bars)
P2= 4.78964703425 (Bars)
H1= 2762.4564315 (Kj/Kg)
H2= 2693.68798234 (Kj/Kg)
V1= 3.53591369527E-2 (m/s)
V2= 376.472009413 (m/s)
W= 1.19337712377 (Muatts)
Vesp= 380720076905 (m3/Kg)
R*= 684038128154
No. MACH... 827523082461

ESCALON 3

P1= 4.78964703425 (Bars)
P2= 3.27467183289 (Bars)
H1= 2693.68798234 (Kj/Kg)
H2= 2626.54471509 (Kj/Kg)
V1= 131.782679826 (m/s)
V2= 391.014626633 (m/s)
W= 1.29126229945 (Muatts)
Vesp= 531760726412 (m3/Kg)
R*= 683697344645
No. MACH... 879534847203

ESCALON 4

P1= 3.27467183289 (Bars)
P2= 2.10323324767 (Bars)
H1= 2626.54471509 (Kj/Kg)
H2= 2550.47059396 (Kj/Kg)
V1= 136.362612186 (m/s)
V2= 410.757336932 (m/s)
W= 1.42965640271 (Muatts)
Vesp= .78465664329 (m3/Kg)
R*= .642272983371
No. MACH... 949082250757

ESCALON 5

P1= 2.10323324767 (Bars)
P2= 1.29985747808 (Bars)
H1= 2550.47059396 (Kj/Kg)
H2= 2470.28160118 (Kj/Kg)
V1= 142.737104832 (m/s)
V2= 417.925502551 (m/s)
W= 1.4976005837 (Muatts)
Vesp= 1.19764443223 (m3/Kg)
R*= 618028209434
No. MACH... 994235175513

Vs= 144.217393465 (m/s)

POTENCIA TOTAL

5.41189640963 Muatts

LEV 12 8265851276

Resultados para una presión de admisión de 6 bar.

Q = 59 7812 (t/Hr)

ESCALON 1

P1= 6.00541819255 (Bars)
P2= 6.00541819255 (Bars)
H1= 2755.86686664 (Kj/Kg)
H2= 2755.86686664 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 3.52305957685E-2 (m/s)
W= 0 (Mwatts)
Vesp= .3155 (m3/Kg)
Rt= 1
No. MACH. . 7.597150803E-5

ESCALON 2

P1= 6.00541819255 (Bars)
P2= 4.10780717976 (Bars)
H1= 2755.86686664 (Kj/Kg)
H2= 2687.10093499 (Kj/Kg)
V1= 3.52305957685E-2 (m/s)
V2= 375.003787787 (m/s)
W= 1.02097286247 (Mwatts)
Vesp= .440356728191 (m3/Kg)
Rt= .684016840802
No. MACH. . 827618863338

ESCALON 3

P1= 4.10780717976 (Bars)
P2= 2.80797324004 (Bars)
H1= 2687.10093499 (Kj/Kg)
H2= 2619.93693871 (Kj/Kg)
V1= 131.066285239 (m/s)
V2= 389.439495963 (m/s)
W= 1.10443669655 (Mwatts)
Vesp= .614977383838 (m3/Kg)
Rt= .683569874914
No. MACH. . 879662359541

ESCALON 4

P1= 2.80797324004 (Bars)
P2= 1.80321824395 (Bars)
H1= 2619.93693871 (Kj/Kg)
H2= 2543.85699013 (Kj/Kg)
V1= 135.625822313 (m/s)
V2= 409.016146808 (m/s)
W= 1.22231566942 (Mwatts)
Vesp= .907257723459 (m3/Kg)
Rt= .642177859189
No. MACH. . 949189748242

ESCALON 5

P1= 1.80321824395 (Bars)
P2= 1.11801121085 (Bars)
H1= 2543.85699013 (Kj/Kg)
H2= 2464.21928938 (Kj/Kg)
V1= 141.963270421 (m/s)
V2= 414.832498059 (m/s)
W= 1.27307574585 (Mwatts)
Vesp= 1.38037693082 (m3/Kg)
Rt= .620008817347
No. MACH. . 991180879064

Vs= 143 150752656 (m/s)

POTENCIA TOTAL
4.62080097429 Mwatts

DEV 12 9374107071 (Kg/Ku-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 5 bar.

Q... 50.09 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00631701382 (Bars)
P2= 5.00631701382 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2749.90284898 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 3.50582892707E-2 (m/s)
W= 0 (Muatts)
Vesp= .3747 (m3/Kg)
Rt= 1
No. MACH... 7.59786844135E-5

ESCALON 2

P1= 5.00631701382 (Bars)
P2= 3.42545465409 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2681.16316356 (Kj/Kg)
V1= 3.50582892707E-2 (m/s)
V2= 372.960318304 (m/s)
W= .847580170802 (Muatts)
Vesp= .522691220568 (m3/Kg)
Rt= .684226477196
No. MACH... .827338018718

ESCALON 3

P1= 3.42545465409 (Bars)
P2= 2.34421316878 (Bars)
H1= 2681.16316356 (Kj/Kg)
H2= 2614.17349743 (Kj/Kg)
V1= 130.088546987 (m/s)
V2= 386.816214368 (m/s)
W= .914801506274 (Muatts)
Vesp= .72901659965 (m3/Kg)
Rt= .684350956443
No. MACH... .878293118996

ESCALON 4

P1= 2.34421316878 (Bars)
P2= 1.52425738767 (Bars)
H1= 2614.17349743 (Kj/Kg)
H2= 2540.17355771 (Kj/Kg)
V1= 134.420123520 (m/s)
V2= 401.712177047 (m/s)
W= .992930271967 (Muatts)
Vesp= 1.06345425775 (m3/Kg)
Rt= .65022132286
No. MACH... .936544686834

ESCALON 5

P1= 1.52425738767 (Bars)
P2= 1.04220320751 (Bars)
H1= 2540.17355771 (Kj/Kg)
H2= 2476.56017496 (Kj/Kg)
V1= 138.891681141 (m/s)
V2= 373.774015977 (m/s)
W= .884005578443 (Muatts)
Vesp= 1.4843918254 (m3/Kg)
Rt= .683744895016
No. MACH... .891993368949

Vs= 134.350168529 (m/s)

POTENCIA TOTAL

3.63931752749 Muatts

CEV 13.7635695763 (Kg/Ku-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 5 bar y una presión de escape de 1 bar, suponiendo con ésto que se ha instalado un condensador en la descarga que haga posible obtener esta presión en el escape de la turbina.

Q = 37.6 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00631701382 (Bars)
P2= 3.54229364839 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2687.16905797 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 356.46061872 (m/s)
W= 583286239351 (Mwatts)
Vesp= .507537009379 (m³/kg)
Rt= .707564790366
No. MACH . . . 789109891786

ESCALON 2

P1= 3.54229364839 (Bars)
P2= 2.54159638592 (Bars)
H1= 2687.16905797 (Kj/Kg)
H2= 2628.31021519 (Kj/Kg)
V1= 123.849274661 (m/s)
V2= 363.742342873 (m/s)
W= 609616849628 (Mwatts)
Vesp= .679109217574 (m³/kg)
Rt= 717500195692
No. MACH . . . 321012654329

ESCALON 3

P1= 2.54159638592 (Bars)
P2= 1.77015679595 (Bars)
H1= 2628.31021519 (Kj/Kg)
H2= 2565.64490754 (Kj/Kg)
V1= 125.969500113 (m/s)
V2= 371.489197357 (m/s)
W= 640434092107 (Mwatts)
Vesp= .932700314103 (m³/kg)
Rt= .696474391354
No. MACH . . . 850166048588

ESCALON 4

P1= 1.77015679595 (Bars)
P2= 1.25173465183 (Bars)
H1= 2565.64490754 (Kj/Kg)
H2= 2507.0122963 (Kj/Kg)
V1= 120.206872745 (m/s)
V2= 358.419962651 (m/s)
W= 608391124275 (Mwatts)
Vesp= 1.26403527767 (m³/kg)
Rt= .707132077053
No. MACH . . . 845782168243

ESCALON 5

P1= 1.25173465183 (Bars)
P2= 1.0100826802 (Bars)
H1= 2507.0122963 (Kj/Kg)
H2= 2471.39353539 (Kj/Kg)
V1= 127.180077219 (m/s)
V2= 288.385028443 (m/s)
W= 402416960166 (Mwatts)
Vesp= 1.52571850815 (m³/kg)
Rt= 806945327421
No. MACH . . . 689539436978

Vs= 146.511593602 (m/s)

POTENCIA TOTAL

2.84414526554 Mwatts

CEU . . . 13.2201404955 (Kg/Kg-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 5 bar y una presión de escape de 0.95 bar.

Q... 37.61 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00631701382 (Bars)
P2= 3.54053890887 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2687.08023487 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 356.710429417 (m/s)
W= .58413949703 (Mwatts)
Vesp= .507757653793 (m3/Kg)
R* = .707214285291
No. MACH... .789686932613

ESCALON 2

P1= 3.54053890887 (Bars)
P2= 2.5366142614 (Bars)
H1= 2687.08023487 (Kj/Kg)
H2= 2627.96619445 (Kj/Kg)
V1= 123.9613124 (m/s)
V2= 364.465858781 (m/s)
W= .611864446345 (Mwatts)
Vesp= .680279100982 (m3/Kg)
R* = .716448633016
No. MACH... .823546530575

ESCALON 3

P1= 2.5366142614 (Bars)
P2= 1.75636725202 (Bars)
H1= 2627.96619445 (Kj/Kg)
H2= 2564.30670778 (Kj/Kg)
V1= 126.274975132 (m/s)
V2= 374.145891961 (m/s)
W= .648598712516 (Mwatts)
Vesp= .939120728157 (m3/Kg)
R* = .692406125262
No. MACH... .864718343164

ESCALON 4

P1= 1.75636725202 (Bars)
P2= 1.21680529246 (Bars)
H1= 2564.30670778 (Kj/Kg)
H2= 2502.283415 (Kj/Kg)
V1= 129.186220774 (m/s)
V2= 367.52714417 (m/s)
W= .637023963501 (Mwatts)
Vesp= 1.2958088328 (m3/Kg)
R* = .692796618168
No. MACH... .8687813236

ESCALON 5

P1= 1.21680529246 (Bars)
P2= .955097360865 (Bars)
H1= 2502.283415 (Kj/Kg)
H2= 2462.18222329 (Kj/Kg)
V1= 128.655038435 (m/s)
V2= 302.97872099 (m/s)
W= .443058128295 (Mwatts)
Vesp= 1.60250112781 (m3/Kg)
R* = .784922096233
No. MACH... .726927674051

Us= 142.275414096 (m/s)

POTENCIA TOTAL ... 2.9246847477
Mwatts

CEV... 12.8595056372 (Kg/Ku-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 5 bar y una presión de escape de 0.88 bar.

Q = 37 62 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00631701382 (Bars)
P2= 3.53877872508 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2686.99109491 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 356.960948589 (m/s)
W= .584995192956 (Mwatts)
Vesp= .507979189112 (m3/Kg)
Rt= .706862692736
No. MACH.790265662871

ESCALON 2

P1= 3.53877872508 (Bars)
P2= 2.53158087656 (Bars)
H1= 2686.99109491 (Kj/Kg)
H2= 2627.61799317 (Kj/Kg)
V1= 124.07403801 (m/s)
V2= 365.1905102 (m/s)
W= .614140273473 (Mwatts)
Vesp= .681465409432 (m3/Kg)
Rt= .71538264278
No. MACH.925302679394

ESCALON 3

P1= 2.53158087656 (Bars)
P2= 1.74188105215 (Bars)
H1= 2627.61799317 (Kj/Kg)
H2= 2562.89029857 (Kj/Kg)
V1= 126.587474395 (m/s)
V2= 376.974139182 (m/s)
W= .657296651214 (Mwatts)
Vesp= .945968218187 (m3/Kg)
Rt= .688060598134
No. MACH.871698115514

ESCALON 4

P1= 1.74188105215 (Bars)
P2= 1.17371447651 (Bars)
H1= 2562.89029857 (Kj/Kg)
H2= 2496.27186953 (Kj/Kg)
V1= 130.275597285 (m/s)
V2= 379.437733148 (m/s)
W= .67474503008 (Mwatts)
Vesp= 1.33744698262 (m3/Kg)
Rt= .673820106753
No. MACH.898924191355

ESCALON 5

P1= 1.17371447651 (Bars)
P2= .880544986095 (Bars)
H1= 2496.27186953 (Kj/Kg)
H2= 2448.86884779 (Kj/Kg)
V1= 131.402135743 (m/s)
V2= 325.453595518 (m/s)
W= .509874855652 (Mwatts)
Vesp= 1.72091663244 (m3/Kg)
Rt= .750220776618
No. MACH.784757459991

Us= 137.054427124 (m/s)

POTENCIA TOTAL
3.04105290337 Mwatts

CEU.12.3707154053 (Kg/Ku-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 5 bar y una presión de escape de 0.81 bar.

Q... 37.626 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00531701382 (Bars)
P2= 3.53771998168 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2686.93745764 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 357.111602776 (m/s)
W= .595509789857 (Muatts)
Vesp= .508112541362 (m3/Kg)
Rt= 706651211243
No.MACH... 790613718207

ESCALON 2

P1= 3.53771998168 (Bars)
P2= 2.52853556487 (Bars)
H1= 2686.93745764 (Kj/Kg)
H2= 2627.40700966 (Kj/Kg)
V1= 124.142065673 (m/s)
V2= 365.642610446 (m/s)
W= .61551969704 (Muatts)
Vesp= .632185305871 (m3/Kg)
Rt= .714735925388
No.MACH... 826367363397

ESCALON 3

P1= 2.52853556487 (Bars)
P2= 1.73280481998 (Bars)
H1= 2627.40700966 (Kj/Kg)
H2= 2561.99724442 (Kj/Kg)
V1= 126.778440141 (m/s)
V2= 378.766041721 (m/s)
W= .662810425169 (Muatts)
Vesp= .950313202513 (m3/Kg)
Rt= 68529976167
No.MACH... 876122632725

ESCALON 4

P1= 1.73280481998 (Bars)
P2= 1.1399557111 (Bars)
H1= 2561.99724442 (Kj/Kg)
H2= 2491.4165532 (Kj/Kg)
V1= 130.99031691 (m/s)
V2= 389.338852094 (m/s)
W= .706304267543 (Muatts)
Vesp= 1.37212773337 (m3/Kg)
Rt= .657867347757
No.MACH... 924035279447

ESCALON 5

P1= 1.1399557111 (Bars)
P2= .810665689453 (Bars)
H1= 2491.4165532 (Kj/Kg)
H2= 2435.39787858 (Kj/Kg)
V1= 134.366914296 (m/s)
V2= 349.992001931 (m/s)
W= .586837512405 (Muatts)
Vesp= 1.85037442887 (m3/Kg)
Rt= .71113788155
No.MACH... 840221905296

Us= 134.007736843 (m/s)

POTENCIA TOTAL
3.15698169122 Muatts

CEV... 11.9183459646 (Kg/Ku-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 5 bar y una presión de escape de 0.7 bar.

Q... 37.63 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 5.00631701382 (Bars)
P2= 3.53701305056 (Bars)
H1= 2749.90284898 (Kj/Kg)
H2= 2686.90163529 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 357.212182408 (m/s)
W= 585853346489 (Mwatts)
Vesp= 508201623406 (m3/Kg)
Rt= .706510003421
No MACH.. 790846097319

ESCALON 2

P1= 3.53701305056 (Bars)
P2= 2.52649459952 (Bars)
H1= 2686.90163529 (Kj/Kg)
H2= 2627.26547592 (Kj/Kg)
V1= 124.187456536 (m/s)
V2= 365.940597482 (m/s)
W= .616445240858 (Mwatts)
Vesp= .682668690138 (m3/Kg)
Rt= .714301746532
No MACH.. .827081834772

ESCALON 3

P1= 2.52649459952 (Bars)
P2= 1.72657394344 (Bars)
H1= 2627.26547592 (Kj/Kg)
H2= 2561.38162771 (Kj/Kg)
V1= 120.967226316 (m/s)
V2= 380.005200509 (m/s)
W= .666624641901 (Mwatts)
Vesp= .95332086956 (m3/Kg)
Rt= .683387149835
No MACH.. .879183376504

ESCALON 4

P1= 1.72657394344 (Bars)
P2= 1.10932114559 (Bars)
H1= 2561.38162771 (Kj/Kg)
H2= 2486.89299828 (Kj/Kg)
V1= 131.495524975 (m/s)
V2= 398.796830804 (m/s)
W= .736593491921 (Mwatts)
Vesp= 1.4053106521 (m3/Kg)
Rt= .642498406558
No MACH.. .948066850291

ESCALON 5

P1= 1.10932114559 (Bars)
P2= .791702109596 (Bars)
H1= 2486.89299828 (Kj/Kg)
H2= 2412.05045754 (Kj/Kg)
V1= 137.746839309 (m/s)
V2= 397.278119936 (m/s)
W= .74218898896 (Mwatts)
Vesp= 2.10014837152 (m3/Kg)
Rt= .632550918528
No MACH.. .971393819754

Us= 138.13650493 (m/s)

POTENCIA TOTAL
3.34770571013 Mwatts

CEV 11.2405340428 (Kg/Kw-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 6 bar y una presión de escape de 1.0 bar.

Q... 44.895 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 6.00541819255 (Bars)
P2= 4.24478971181 (Bars)
H1= 2755.86686664 (Kj/Kg)
H2= 2692.97227867 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 358.798940068 (m/s)
W= .704257245018 (Mwatts)
Vesp= .427855440893 (m3/Kg)
R* = .706826664807
No. MACH... 796271791168

ESCALON 2

P1= 4.24473971181 (Bars)
P2= 3.03647707696 (Bars)
H1= 2692.97227867 (Kj/Kg)
H2= 2633.61075823 (Kj/Kg)
V1= 124.912279953 (m/s)
V2= 367.131754217 (m/s)
W= .739768056904 (Mwatts)
Vesp= .574154211039 (m3/Kg)
R* = .715342168426
No. MACH... 825459383054

ESCALON 3

P1= 3.03647707696 (Bars)
P2= 2.087508532 (Bars)
H1= 2633.61075823 (Kj/Kg)
H2= 2568.7577444 (Kj/Kg)
V1= 127.453623522 (m/s)
V2= 379.423307159 (m/s)
W= .793220113551 (Mwatts)
Vesp= .797828980933 (m3/Kg)
R* = .68747712533
No. MACH... 872684054778

ESCALON 4

P1= 2.087508532 (Bars)
P2= 1.3989998844 (Bars)
H1= 2568.7577444 (Kj/Kg)
H2= 2501.2564199 (Kj/Kg)
V1= 131.257177213 (m/s)
V2= 383.841753802 (m/s)
W= .821892685467 (Mwatts)
Vesp= 1.1337285634 (m3/Kg)
R* = .670176846204
No. MACH... 904671482825

ESCALON 5

P1= 1.3989998844 (Bars)
P2= 1.03798548418 (Bars)
H1= 2501.2564199 (Kj/Kg)
H2= 2452.07185134 (Kj/Kg)
V1= 132.646372978 (m/s)
V2= 332.525314581 (m/s)
W= .634482889704 (Mwatts)
Vesp= 1.47530514353 (m3/Kg)
R* = .741948227269
No. MACH... 790128830493

Vs= 135.855797814 (m/s)

POTENCIA TOTAL ...
3.69362978954 Mwatts

CEV... 12.1547102072 (Kg/Ku-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 6 bar y una presión de escape de 0.9 bar.

Q... 44 904 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 6 00541819255 (Bars)
P2= 4 24319068156 (Bars)
H1= 2755 86686604 (Kj/Kg)
H2= 2692 9047675 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 358 989499857 (m/s)
W= 705035299097 (Muatts)
Vesp= 42799699622 (m3/Kg)
R* = 706560430227
No. MACH 790709906968

ESCALON 2

P1= 4 24319068156 (Bars)
P2= 3 03188029479 (Bars)
H1= 2692 9047675 (Kj/Kg)
H2= 2633 34529191 (Kj/Kg)
V1= 125 000362893 (m/s)
V2= 367 754194454 (m/s)
W= 741855909858 (Muatts)
Vesp= 574919410184 (m3/Kg)
R* = 714528410871
No. MACH 826800195917

ESCALON 3

P1= 3 03188029479 (Bars)
P2= 2 07367588414 (Bars)
H1= 2633 34529191 (Kj/Kg)
H2= 2567 62165129 (Kj/Kg)
V1= 127 20221045 (m/s)
V2= 381 721018124 (m/s)
W= 801675786513 (Muatts)
Vesp= 802499596912 (m3/Kg)
R* = 683957043985
No. MACH 878325097929

ESCALON 4

P1= 2 07367588414 (Bars)
P2= 1 34095915021 (Bars)
H1= 2567 62165129 (Kj/Kg)
H2= 2494 21440693 (Kj/Kg)
V1= 132 209671659 (m/s)
V2= 390 479027967 (m/s)
W= 877730557981 (Muatts)
Vesp= 1 17669526046 (m3/Kg)
R* = 646659024268
No. MACH 941579978534

ESCALON 5

P1= 1 34095915021 (Bars)
P2= 0 93056343609 (Bars)
H1= 2494 21440693 (Kj/Kg)
H2= 2427 80240287 (Kj/Kg)
V1= 137 621464691 (m/s)
V2= 379 238353382 (m/s)
W= 813078640591 (Muatts)
Vesp= 1 6890259767 (m3/Kg)
R* = 666579845823
No. MACH 918590758691

Vs= 134 923037921 (m/s)

POTENCIA TOTAL

3 94027628414 Muatts

CEV 11 3961551835 (Kg/Kw-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 6 bar y una presión de escape de 0.82 bar.

Q... 44.9052 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 6.00541819255 (Bars)
P2= 4.24297719194 (Bars)
H1= 2755.86636664 (Kj/Kg)
H2= 2692.89575215 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 359.014952334 (m/s)
W= .705139167444 (Muatts)
Vesp= .428015903593 (m3/Kg)
R* = .70652485071
No.MACH... 790760396323

ESCALON 2

P1= 4.24297719194 (Bars)
P2= 3.03126460201 (Bars)
H1= 2692.89575215 (Kj/Kg)
H2= 2633.30970680 (Kj/Kg)
V1= 125.012137592 (m/s)
V2= 367.829603464 (m/s)
W= .742135822043 (Muatts)
Vesp= .57502993211 (m3/Kg)
R* = .714419254614
No.MACH... 826979981803

ESCALON 3

P1= 3.03126460201 (Bars)
P2= 2.07178387329 (Bars)
H1= 2633.30970680 (Kj/Kg)
H2= 2567.46570837 (Kj/Kg)
V1= 127.735678523 (m/s)
V2= 382.03726669 (m/s)
W= .802838796834 (Muatts)
Vesp= .803142989543 (m3/Kg)
R* = .683471799647
No.MACH... 879101736498

ESCALON 4

P1= 2.07178387329 (Bars)
P2= 1.33028102083 (Bars)
H1= 2567.46570837 (Kj/Kg)
H2= 2492.88792999 (Kj/Kg)
V1= 132.343133204 (m/s)
V2= 401.287552344 (m/s)
W= .888527435073 (Muatts)
Vesp= 1.18498786401 (m3/Kg)
R* = .642094495464
No.MACH... 948700454684

ESCALON 5

P1= 1.33028102083 (Bars)
P2= .824208004225 (Bars)
H1= 2492.88792999 (Kj/Kg)
H2= 2414.73323103 (Kj/Kg)
V1= 138.721995444 (m/s)
V2= 407.244556613 (m/s)
W= .925673900404 (Muatts)
Vesp= 1.804048473 (m3/Kg)
R* = 61957435408
No.MACH... 991322223192

Us= 140.762577529 (m/s)

POTENCIA TOTAL
4.06431512179 Muatts

CEV 11.0486511637 (Kg/Kg-Hr)

Resultados para una presión de admisión de 7 bar y una presión de escape de 1.0 bar.

Q = 52.1425 (T/Hr)

ESCALON 1

P1= 7.00201763193 (Bars)
P2= 4.94740793094 (Bars)
H1= 2762.4564315 (Kj/Kg)
H2= 2699.48924386 (Kj/Kg)
V1= 0 (m/s)
V2= 360.401116885 (m/s)
W= .824164105433 (Mwatts)
Vesp= .370051147956 (m3/Kg)
Rt= 706568904094
No. MACH = .790642572559

ESCALON 2

P1= 4.94740793094 (Bars)
P2= 3.5352950846 (Bars)
H1= 2699.48924386 (Kj/Kg)
H2= 2639.93123417 (Kj/Kg)
V1= 125.659023318 (m/s)
V2= 369.274775963 (m/s)
W= .867532550576 (Mwatts)
Vesp= .497154533289 (m3/Kg)
Rt= .714575214728
No. MACH = .826786117713

ESCALON 3

P1= 3.5352950846 (Bars)
P2= 2.41725711948 (Bars)
H1= 2639.93123417 (Kj/Kg)
H2= 2574.14086258 (Kj/Kg)
V1= 128.383379471 (m/s)
V2= 383.513039386 (m/s)
W= .938422030857 (Mwatts)
Vesp= .69434125366 (m3/Kg)
Rt= 683749746948
No. MACH = .878689022988

ESCALON 4

P1= 2.41725711948 (Bars)
P2= 1.5558831915 (Bars)
H1= 2574.14086258 (Kj/Kg)
H2= 2499.94161637 (Kj/Kg)
V1= 132.973752829 (m/s)
V2= 402.116784139 (m/s)
W= 1.03541506425 (Mwatts)
Vesp= 1.02262216177 (m3/Kg)
Rt= .643656472852
No. MACH = .946254973697

ESCALON 5

P1= 1.5558831915 (Bars)
P2= 1.0016292755 (Bars)
H1= 2499.94161637 (Kj/Kg)
H2= 2427.90931329 (Kj/Kg)
V1= 139.054201797 (m/s)
V2= 394.723564437 (m/s)
W= 1.01656925406 (Mwatts)
Vesp= 1.50588134581 (m3/Kg)
Rt= .643768941635
No. MACH = .953995314487

Vs= 137.559434175 (m/s)

POTENCIA TOTAL

4.68210385518 Mwatts

CEV = 11.1365534038 (Kg/Kw-Hr)

CAPITULO VI.- RESULTADOS.

Del análisis de los resultados que se presentan en forma gráfica, figs. VI.1 a VI.19 se desprende lo siguiente:

a) Rendimiento por escalón.

Del rendimiento obtenido por cada escalón de la turbina se observa que, al bajar la presión de entrada a la turbina, el gas to manejado disminuye y a pesar de que el volumen específico - aumenta, los números de Mach son generalmente todos más pequeños, es decir, el control no está por choque sónico en las toberas, sino por el salto entálpico total pequeño.

En la fig. VI.1 se observa cómo disminuye el No. de Mach a medida que la presión de admisión decrece. Esta misma tendencia se presenta con la relación de velocidades mostrada en la fig. VI.2.

Al observar el comportamiento del No. de Mach en la figura - - VI.1 resulta tentador proponer una reducción de áreas en las - primeras corridas de toberas, pues el número de Mach es menor a la unidad; sin embargo, estos escalones funcionan a la relación óptima de velocidades dada en la fig. VI.3 y no se ganaría nada con acelerar el flujo.

Una reducción de áreas en las toberas de los últimos escalones, al operar la turbina a bajas presiones de admisión incrementaría la potencia, aunque esta solución es muy complicada desde el punto de vista práctico.

b) Pérdidas de escape.

Como se observó en la fig. VI.2, la relación de velocidades en el último escalón varía notablemente al trabajar la turbina a presiones menores de la de diseño y dado que las pérdidas en el escape están en función de la velocidad del vapor a la salida de la turbina, resulta conveniente observar el comportamiento de esta velocidad cuando se opera bajo condiciones de trabajo diferentes a las nominales.

En la fig. VI.4, se muestra la variación de la velocidad del vapor en el escape a diferentes presiones de admisión observándose una reducción paulatina a medida que aumenta la presión - alcanzando su punto mínimo a una presión de 7 bars, al rebasar este valor se incrementa nuevamente la velocidad, permaneciendo constante para una presión de 9 bars debido a la limitante

que se tiene con el número de Mach y a las condiciones de trabajo impuestas para esta presión. Esta misma tendencia se manifiesta en la fig. VI.5 que muestra la variación de las pérdidas específicas de energía en el escape a diferentes presiones de admisión.

La fig. VI.6 muestra un aumento gradual de las pérdidas de potencia al aumentar la presión de admisión, siendo esto normal pues este aumento lleva asociado un incremento del gasto que origina una pérdida mayor de potencia en el escape.

c) Potencia generada.

La potencia ideal total, generada a diferentes presiones de admisión se muestra en la fig. VI.8. En la fig. VI.9 se ilustra la misma potencia expresada como un porcentaje de la potencia nominal. En la fig. VI.10 se observa como se incrementa el gasto a medida que la presión aumenta.

En estas gráficas, el incremento de potencia va asociado con el aumento de la presión de entrada y el gasto manejado; sin embargo, en la fig. VI.11 que muestra la variación del consumo específico del vapor a las diferentes presiones de trabajo. se observa la presión a la cual el consumo es mínimo y será ésta la presión de operación normal de la turbina. Dicho de otra forma, la eficiencia a bajas presiones es menor que la eficiencia a altas presiones, como se ve en la fig. VI.12, teniendo su punto óptimo a la presión de diseño como es de esperarse.

En la fig. VI.13 se muestra la variación que experimenta la potencia entregada por cada escalón de la turbina a las diferentes presiones de admisión, en donde se observa que a bajas presiones y debido a la disminución de la relación de velocidades

La potencia entregada por los últimos escalones decrece en comparación con los primeros. Al observar esto y con el objeto de incrementar la potencia entregada por la turbina cuando trabaja muy por debajo de las condiciones de diseño, se efectúan las modificaciones que se citan en los incisos siguientes y que se analizan a continuación.

d) Eliminando el primer escalón de la turbina.

Esta modificación se realiza con la finalidad de incrementar el gasto manejado por la turbina y que redunde en un aumento de potencia como se observa en la fig. VI.15, aunque esto lleva asociado una disminución en la eficiencia, observándose esta tendencia en el incremento que manifiesta el consumo específico de vapor en la fig. VI.16.

Otra consecuencia originada por esta modificación es el aumento en la velocidad del fluido al pasar por los diferentes escalones de la turbina, elevando el valor del número de Mach en los últimos escalones como se ve en la fig. VI.17.

La fig. VI.18 muestra la potencia entregada por los diferentes escalones de la turbina cuando se ha eliminado el primer escalón, notándose que a bajas presiones es significativo el incremento de potencia originado.

e) Instalando un condensador en la descarga de la turbina.

Esta variante se considera razonable, pues al disminuir la presión en la descarga se mejora la eficiencia de la turbina, al aprovechar mejor la energía disponible. En la fig. VI.1 se observa que esta solución es posible únicamente cuando se tienen

bajas presiones de admisión, pues a altas presiones la turbina trabaja a la relación óptima de velocidades y además tiene la limitante del número de Mach en los últimos escalones. La fig. VI.19 muestra la potencia total generada al variar la presión de descarga para diferentes presiones de admisión.

Es conveniente hacer notar que al instalar un condensador en el escape de la turbina, ésta no puede operar a altas presiones de admisión pues se presentarían problemas de erosión, sobre todo en la última corrida de álabes, originados por la humedad que llevaría el vapor en este último paso.

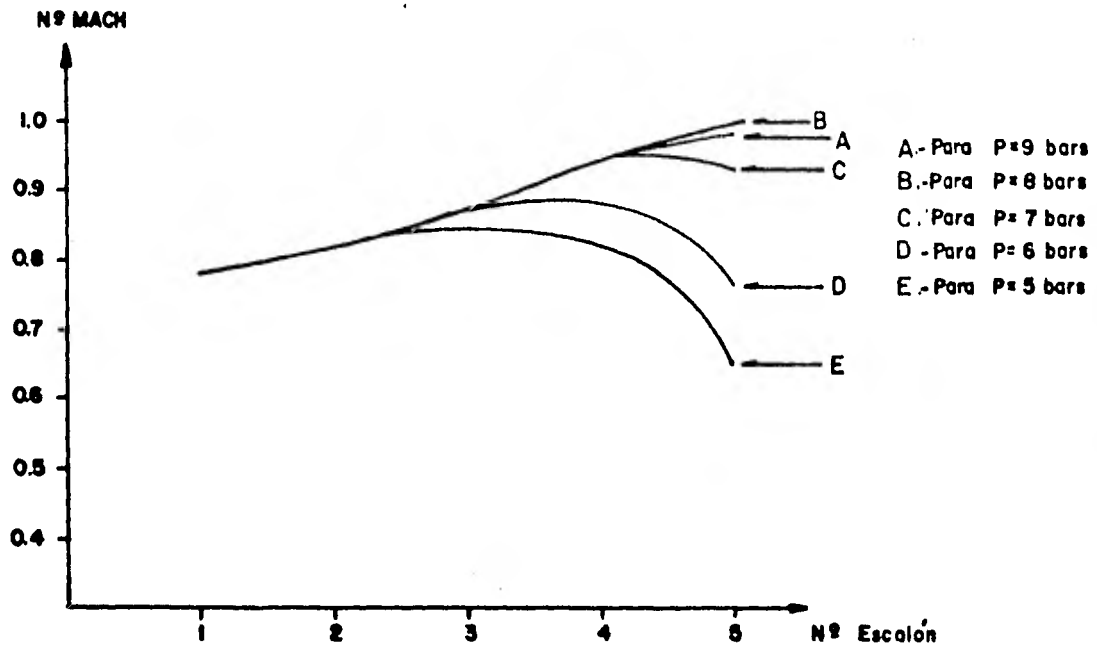


Fig. VI. 1.- Variación del Numero de Mach al pasar por los diferentes escalones de la turbina operando a distintas presiones de admisión

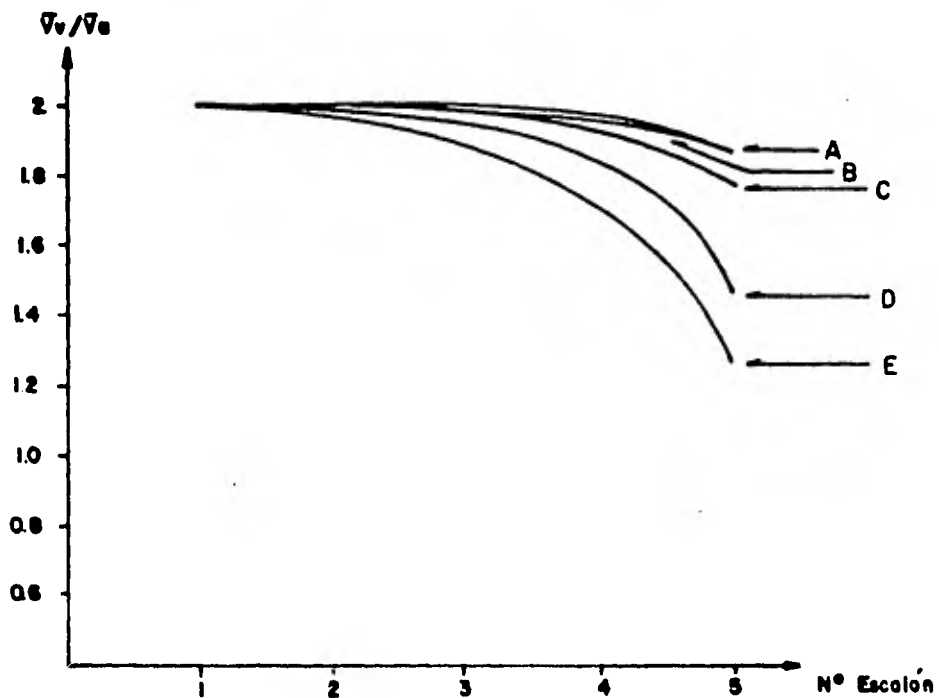


Fig. VI. 2.- Relación entre la velocidad absoluta del vapor (\bar{V}_v) y la velocidad periférica media del álabe (\bar{V}_o) en los escalones de la turbina para diferentes presiones de admisión.

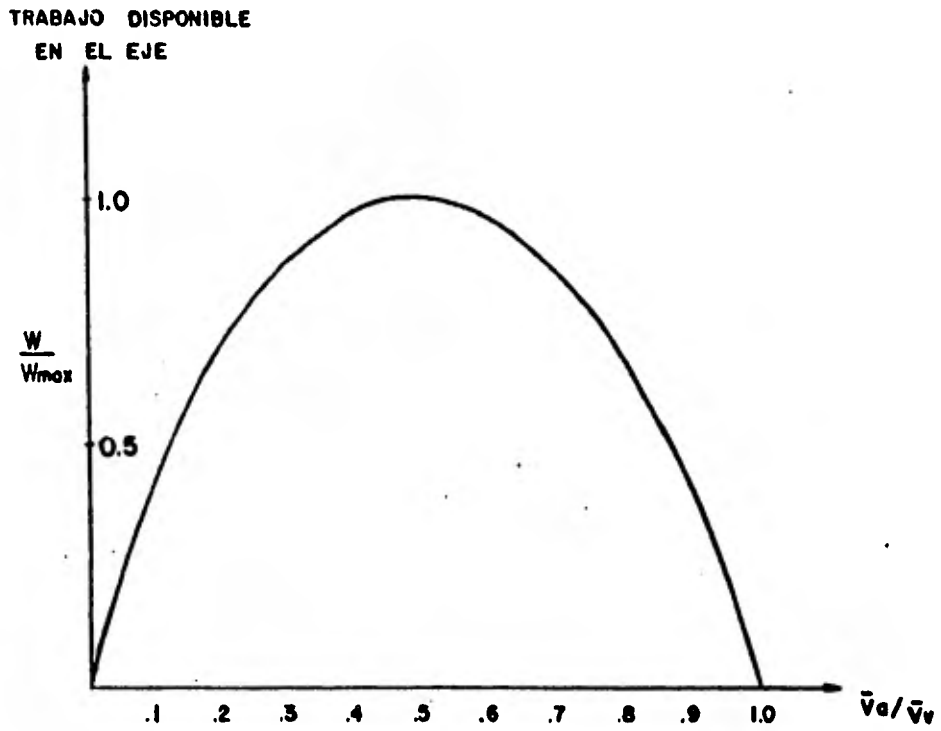


Fig. VI . 3.- Trabajo disponible en el eje al variar la relación de velocidad del dabo con respecto a la velocidad absoluta del vapor.

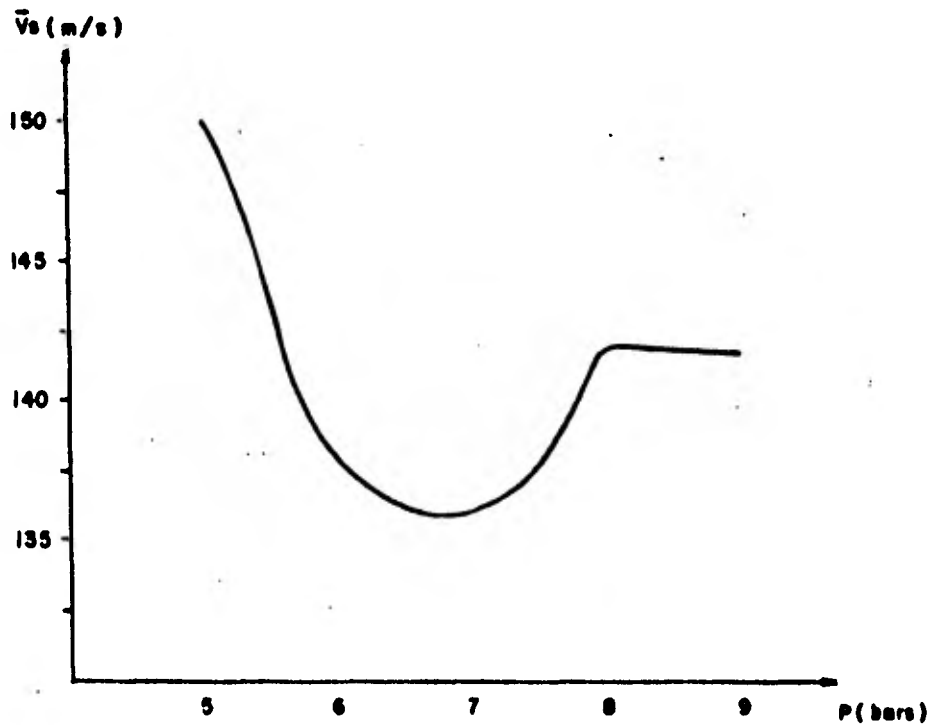


Fig. VI . 4.- Velocidad total de escape operando la turbina a diferentes presiones de admisión.

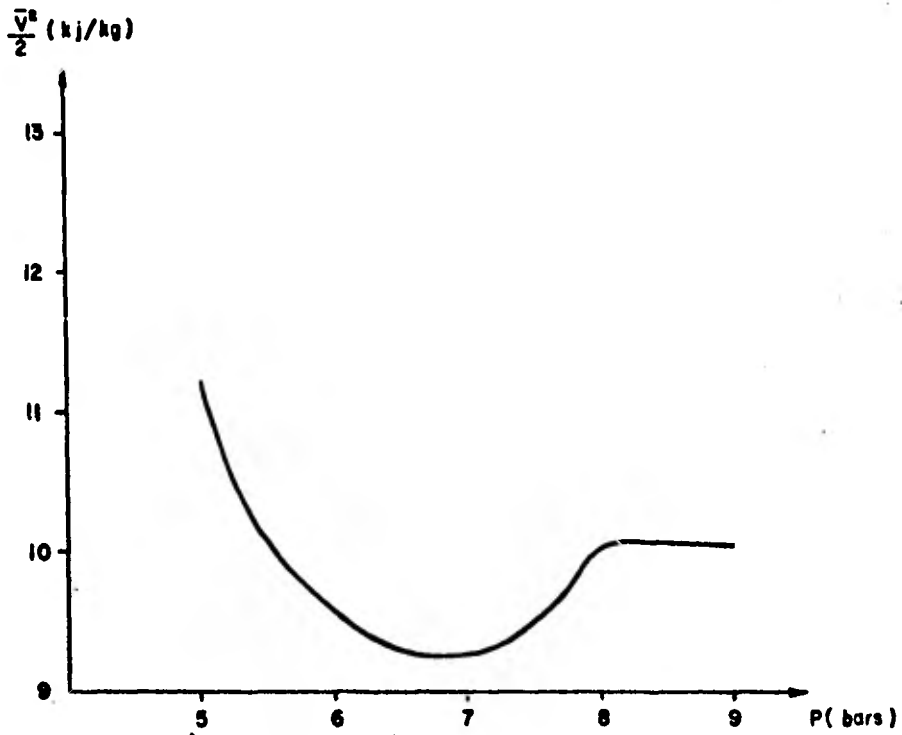


Fig. VI. 5- Pérdidas de energía en el escape, por unidad de distintas presiones en la admisión.

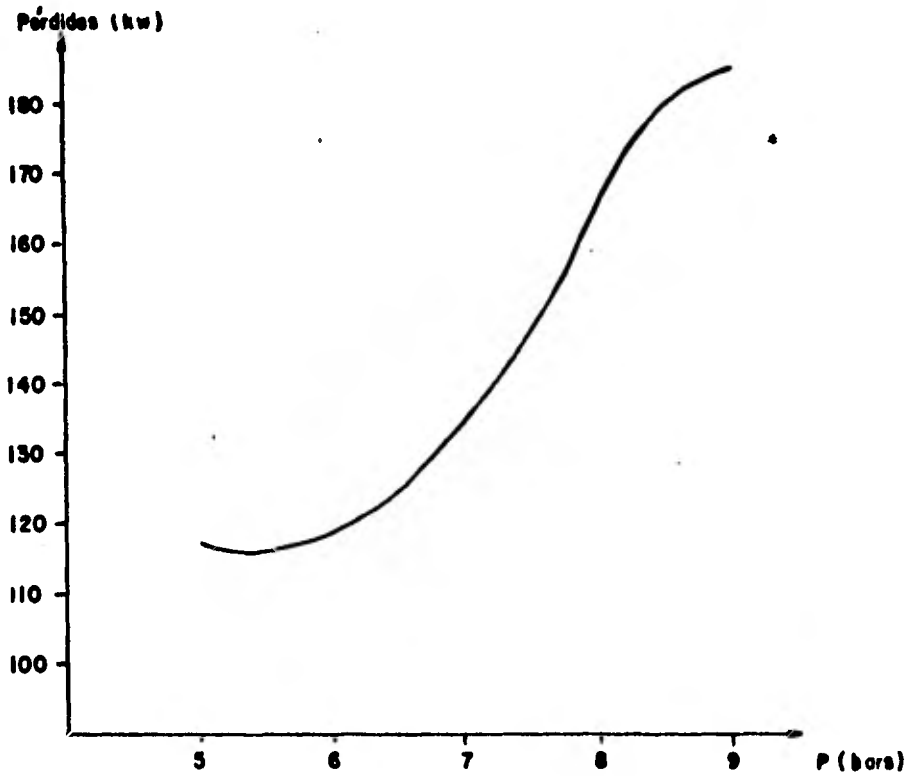


Fig. VI. 6- Pérdidas de potencia en la descarga de la turbina para diferentes presiones de admisión

PERDIDAS
% GENERACION

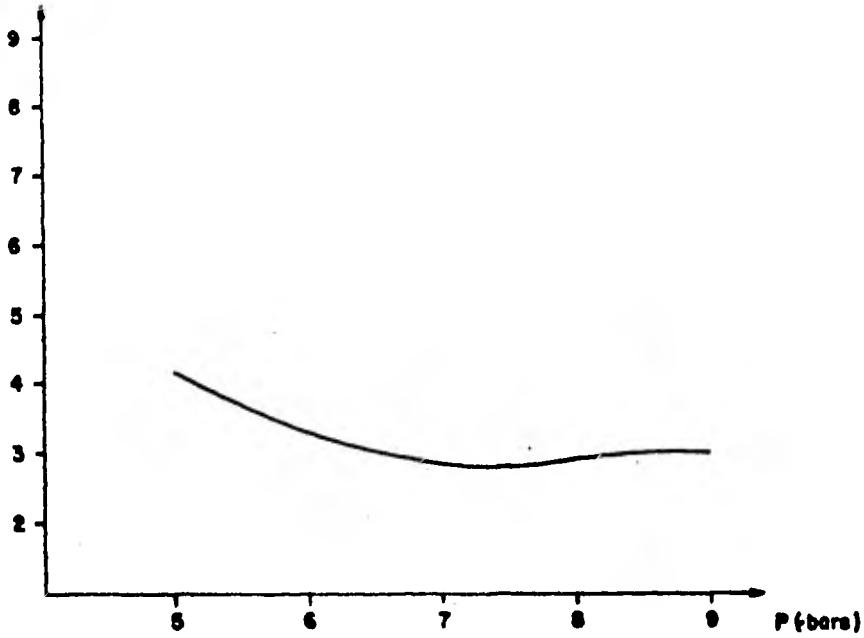


Fig. XI. 7.- Perdidas de potencia en el escape expresada como porcentaje de la generacion.

POTENCIA (MW)

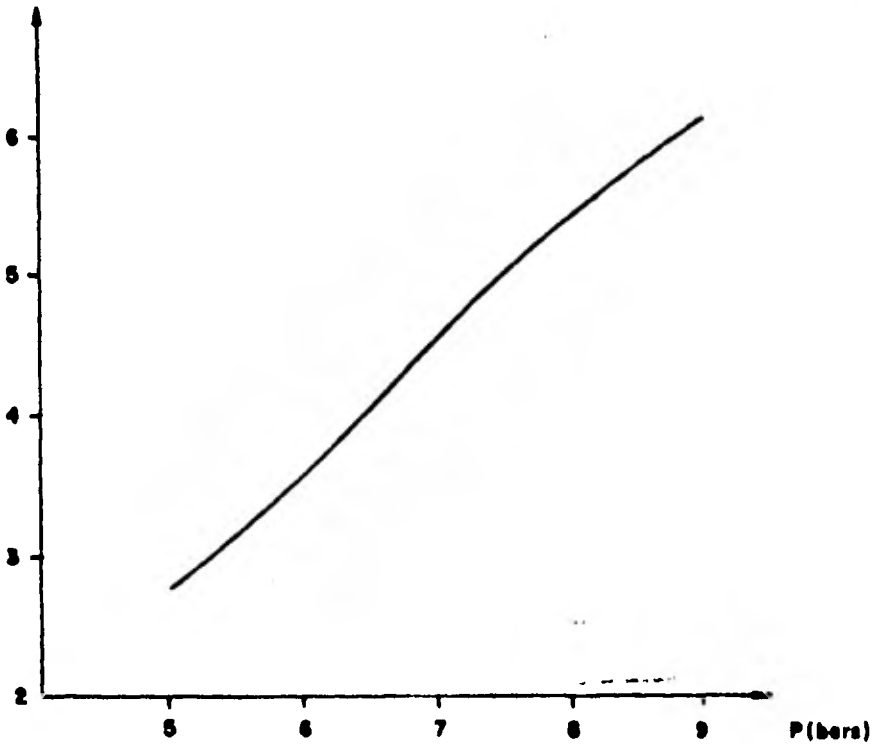


Fig. XI. 8.- Potencia total generada por la turbina ideal operando a diferentes condiciones de trabajo.

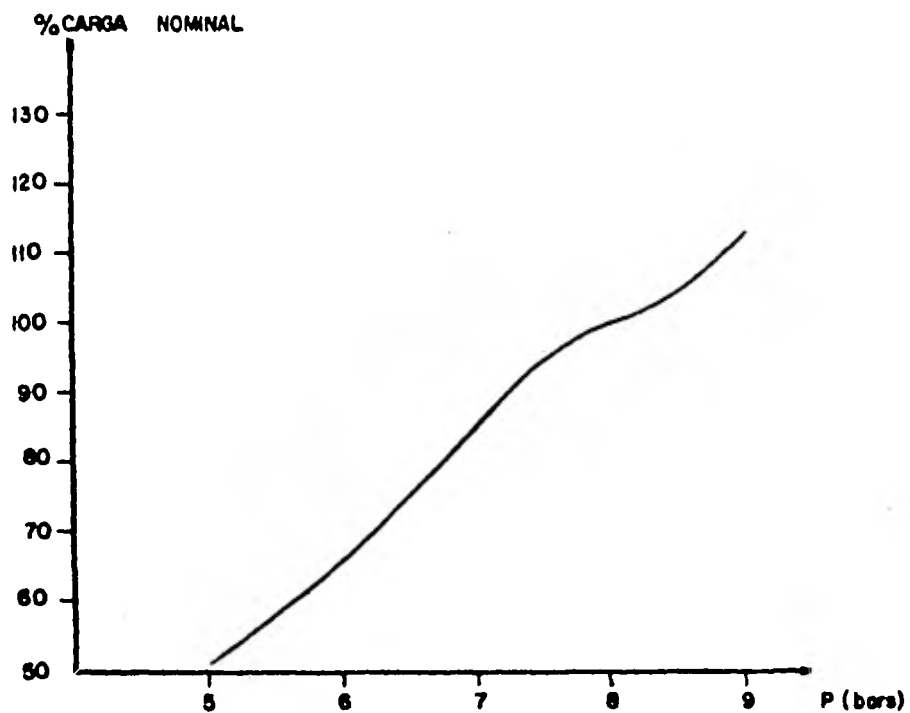


Fig. VI .9.- Variación en porcentaje de la carga nominal tomando como base la carga a 8 bars.

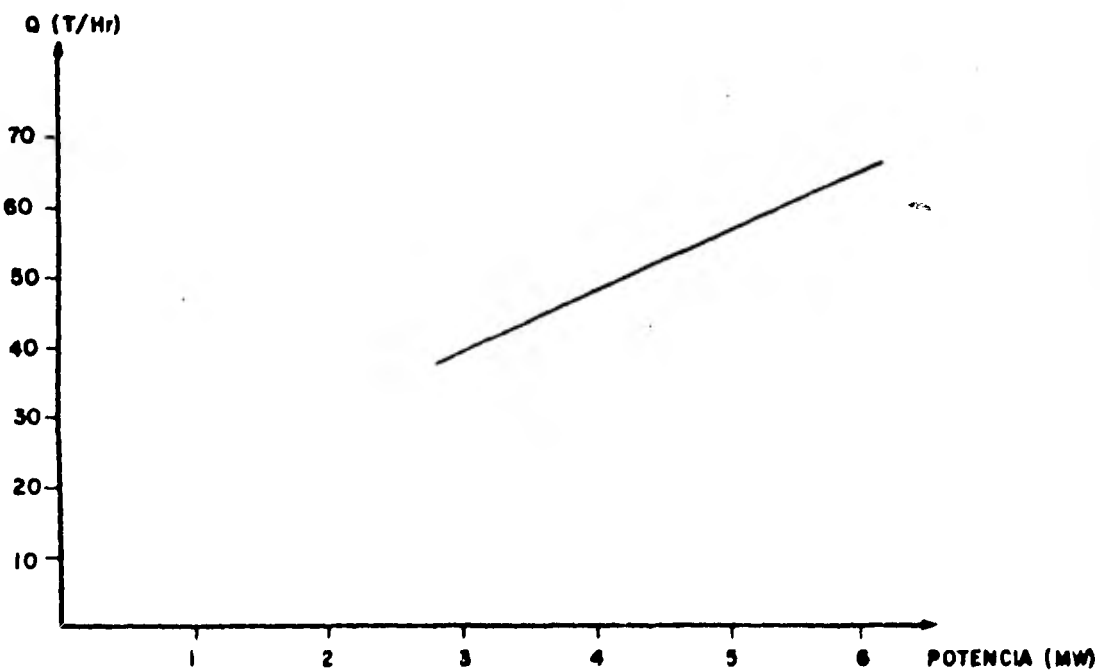


Fig. VI .10.- Variación del gasto manejado por la turbina a distintas presiones de operación

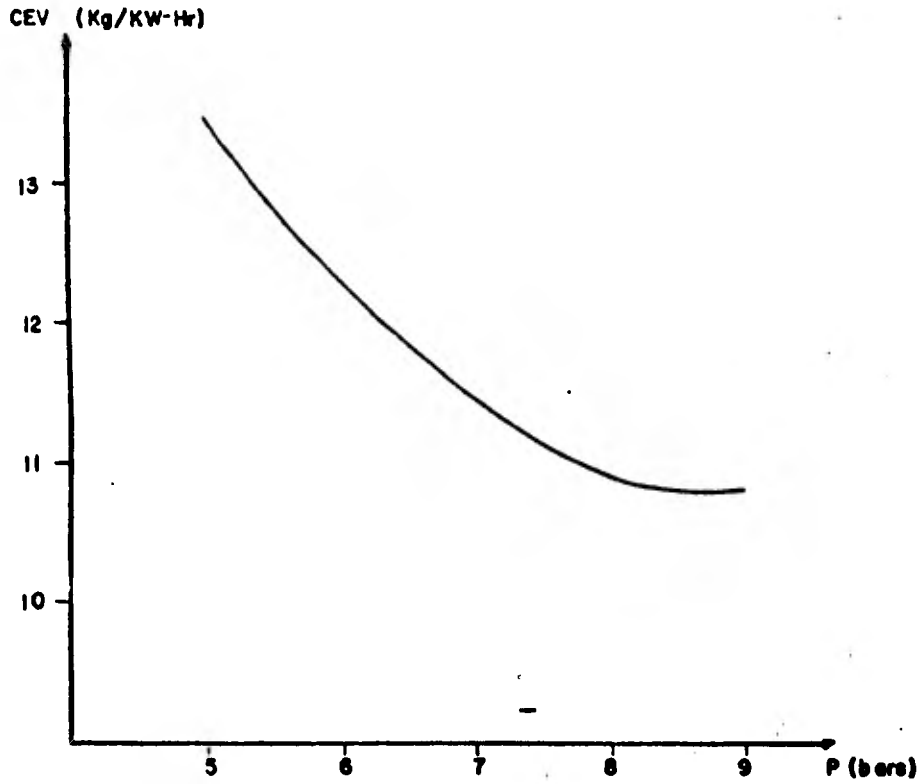


Fig.VI .11...Consumo específico de vapor a diferentes presiones de admisión.

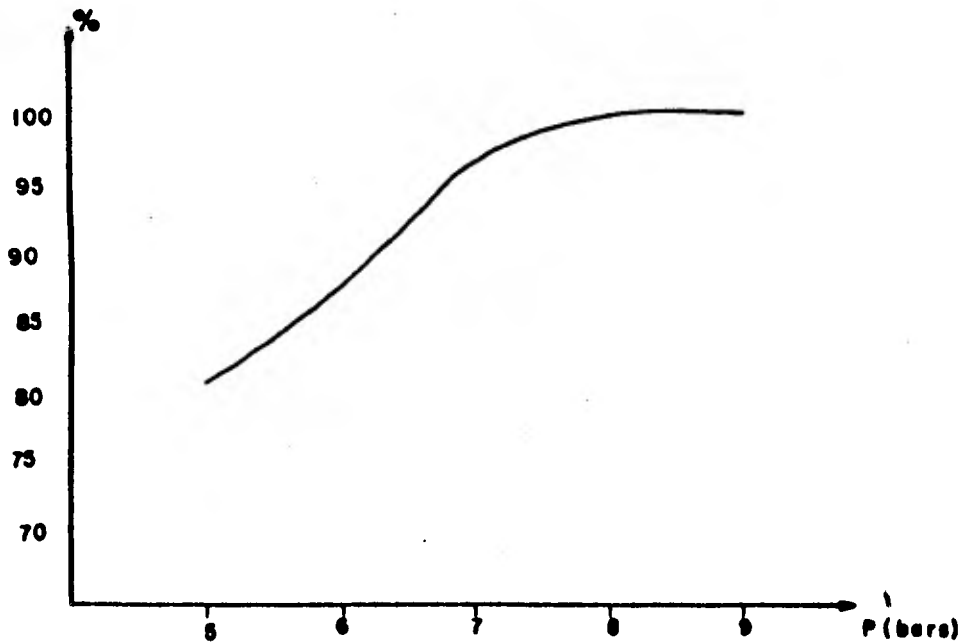


Fig.VI.12...Variación de la eficiencia de la turbina con la presión tomando como base de comparación 100% de eficiencia a 8 bars.

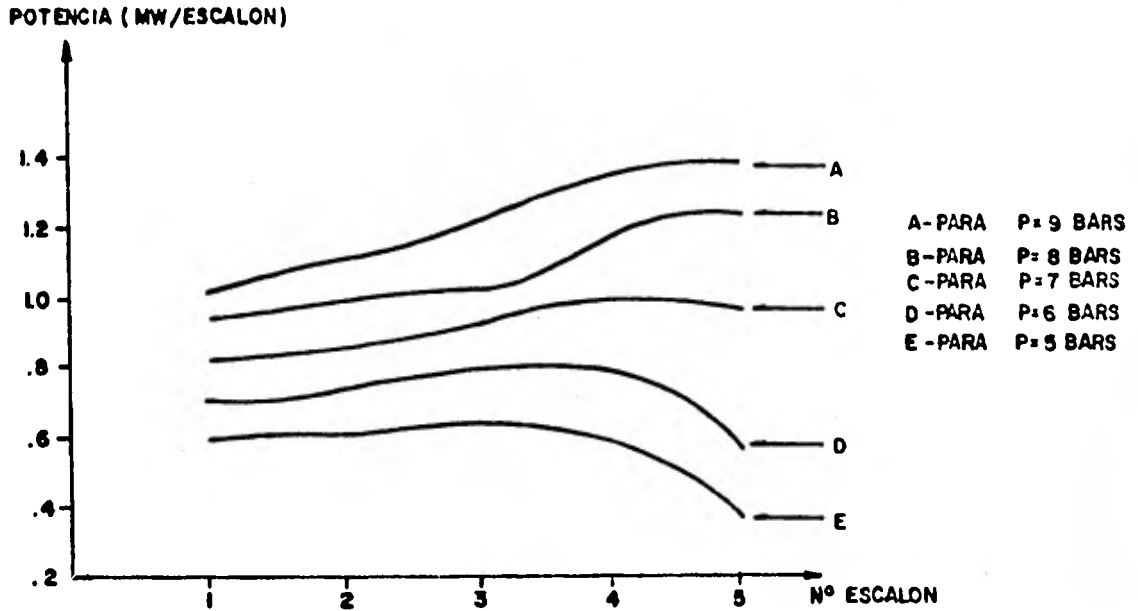


Fig. VI. 13.- Potencia generada por cada escalón de la turbina a las diferentes presiones de operación.

POTENCIA AL ELIMINAR EL PRIMER ESCALON DE LA TURBINA

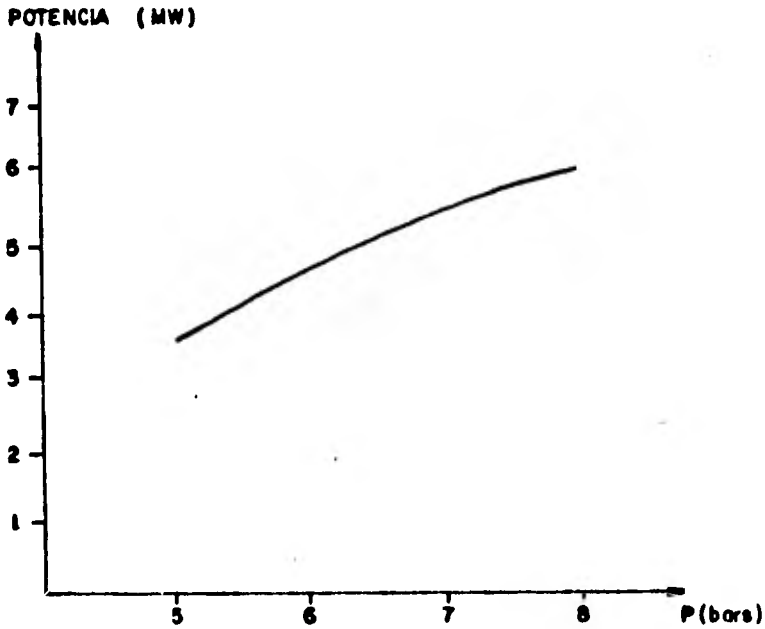


Fig. VI. 14.- Potencia total generada por la turbina a las distintas presiones al eliminar el primer escalón

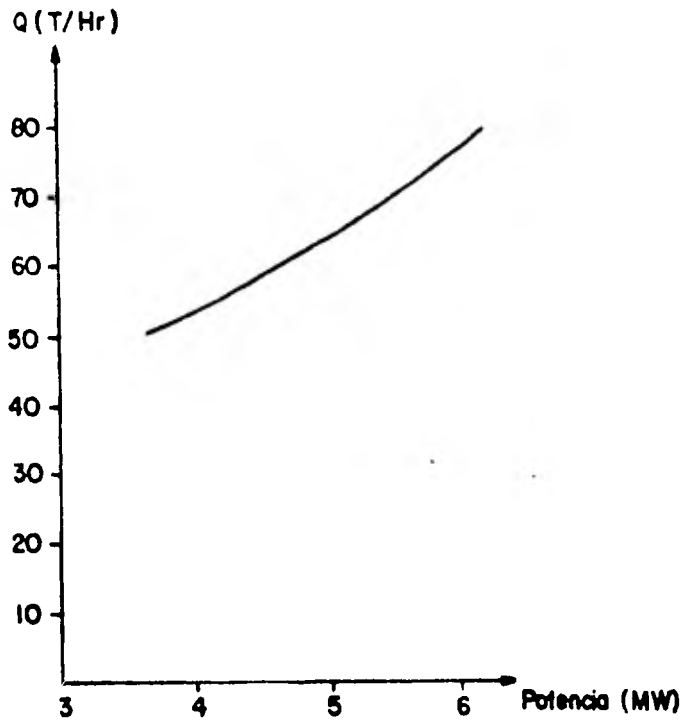


Fig. VII.15.- Consumo de vapor requerido por la turbina para diferentes capacidades de generación al eliminar el primer escalón, para presiones de admisión desde 8 a 5 bars.

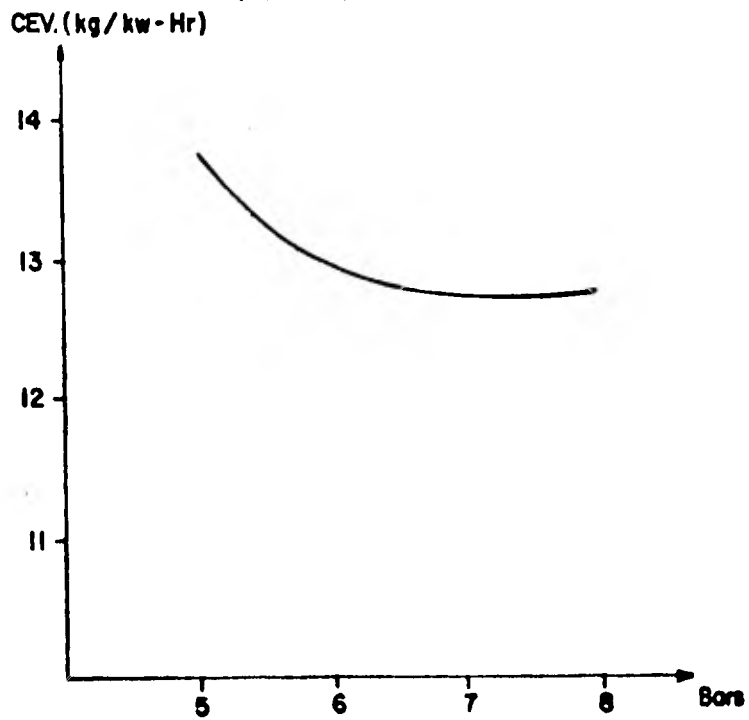


Fig. VII.16.- Consumo específico de vapor, a diferentes presiones de admisión cuando trabaja la turbina sin el primer escalón

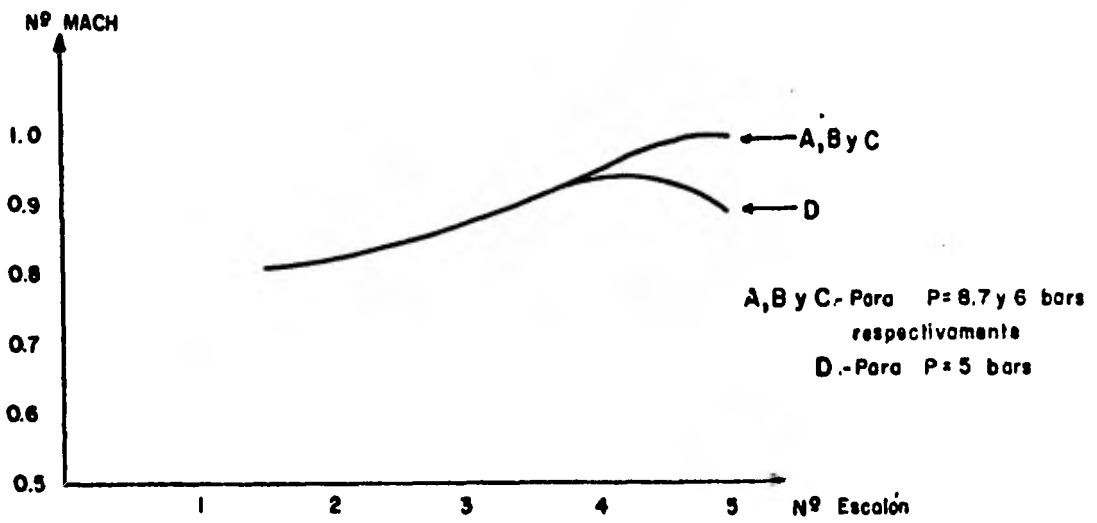


Fig. VI 17.-Variación del Número de Mach al pasar el vapor por los escalones de la turbina a diferentes presiones de admisión cuando se ha eliminado el primer escalón.

(70)

Potencia MW / escalón

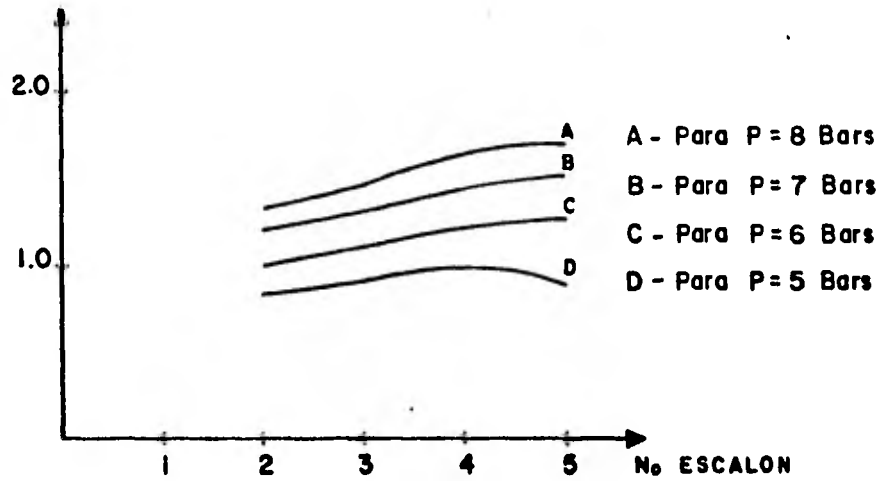


Fig.VI.18- Potencia generada por cada escalón de la turbina a diferentes presiones, cuando se ha eliminado la primera corrida de álabes y toberas

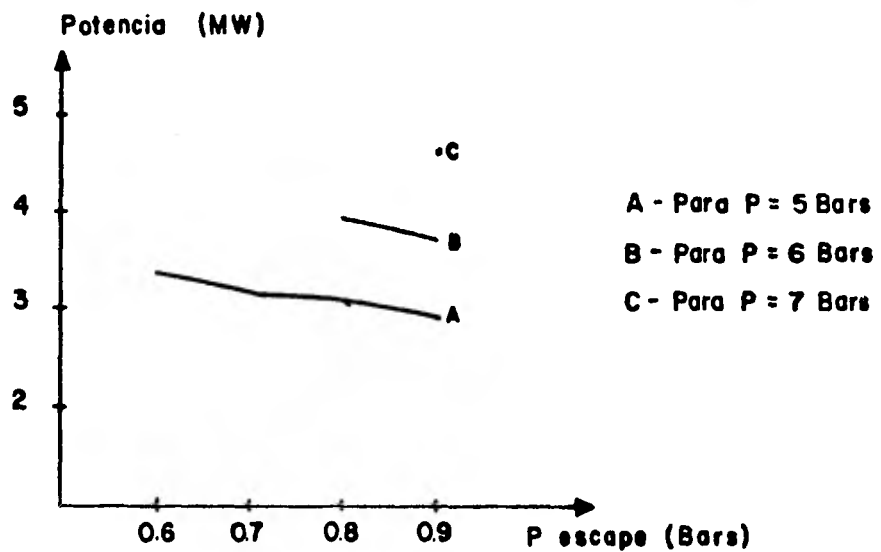


Fig.VI.19- Variación de la potencia generada al disminuir la presión de salida de la turbina, para diferentes presiones de admisión.

CAPITULO VII.- CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos en los capitulos anteriores se concluye lo siguiente:

El rango de presión para la operación de una turbina de 5 pasos - de impulso, de contrapresión y una capacidad de 5 Mw es de 5 a 9 bar.- El límite superior está fijado por el número de Mach en el último escalón y el límite inferior por la baja eficiencia que repercute en una pérdida de potencia.

La potencia óptima se obtiene, como es de esperarse, a la presión de diseño que es de 8 bar.

Al operar la turbina por periodos largos en un campo cuyas carac-

terísticas del yacimiento no alcancen a dar presiones superiores a los 6 bars, es posible reducir el área de la primera corrida de toberas -- obstruyendo algunas de ellas, aunque el incremento de potencia obtenido no es muy significativo.

Si se operan las turbinas indefinidamente en un campo con las características arriba descritas, es decir presiones inferiores a 6 bar, es conveniente eliminar la primera corrida de toberas y álabes para -- que se pueda manejar un gasto mayor que incremente la potencia entregada, aunque esto redunde en una disminución de la eficiencia de la turbina.

Instalar un condensador en el escape de la turbina no es recomendable cuando se opera cerca del punto óptimo de diseño, pues estas turbinas fueron diseñadas para descargar a la presión atmosférica.

A presiones entre 5 y 6 bar puede instalarse el condensador, aunque no se ganará mucho en términos de potencia. Además al instalar un condensador necesitaría ser un sistema enfriado por aire, pues uno enfriado por agua requeriría equipo como torre de enfriamiento y sistema de bombeo que sería muy costoso y eliminaría además la característica de turbina portátil.

Aún así, con un sistema enfriado por aire se tienen problemas de corrosión en el ventilador y en el cuerpo del condensador, debido al ambiente corrosivo imperante en los campos geotérmicos.

Cabe hacer notar que los resultados obtenidos en esta tesis pueden ser usados en forma cualitativa, debido a que se estudia la turbina en forma ideal, pues se desprecian las pérdidas por fricción generadas en el interior de la máquina. A pesar de ello, los cálculos dan una idea bastante acertada de la manera como se comporta una turbina de estas características operando bajo condiciones diferentes a las nominales.

REFERENCIAS.

- 1.- Hiriart G, "Description of the 5 Mw backpressure units to be installed at Los Azufres geothermal field", UNITAR Conference on the Future Small Energy Resources, USA 1981.
- 2.- Hiriart G, Alternativas de Desarrollo del Campo Geotérmico Los Azufres, México 1981.
- 3.- Shapiro A, The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow, USA 1976.
- 4.- Mitsubishi, Specification Portable Turbine Generator Los Azufres - Geothermal Field, Japón 1981.
- 5.- Schmidt E, Properties of Water and Steam in SI-Units, Alemania 1979

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Kirillin V, Sychev V, Scheindlin A, Engineering Thermodynamics, - Rusia 1976.
- 2.- Leighton E, Pitts D, Elements of Transport Phenomena, Japón 1972.
- 3.- Mataix C, Turbomáquinas Térmicas, Madrid 1973.
- 4.- Saarlás M, Steam and Gas Turbines for Marine Propulsion, Gran Bretaña 1978.
- 5.- Schegliáiev A, Turbinas de Vapor, Moscú 1973.
- 6.- Severns W, Energía mediante Vapor, Aire o Gas, Madrid 1976.
- 7.- Cotton K, "Analysis of changes in the performance characteristics of steam turbines", Journal of Engineering for Power, Abril 1971, - pags. 225 a 237.

- 8.- Craig H, Cox H, "Performance estimations of axial flow turbines",-
Thermodynamics and Fluid Mechanics Group, 1970 Vol. 185 pags. 407-
a 424.
- 9.- Indurskii M, "Optimization of the parameters of the last turbine -
stage with allownce for operation under variable conditions", - -
Thermal Engineering, 1979 Vol. 26 pags. 167 a 171.
- 10.- Kenneth J, "Optimization of heater design conditions in power - -
plant cycles", Journal of Engineering for Power, Julio 1979 pags.-
159 a 172.
- 11.- Spencer R, Cotton K, Cannon C, "A method for predicting the perfor
mance of steam turbines generators", Journal of Engineering for Po
wer, Octubre 1963 pags 249 a 301.