

881217
17
207

UNIVERSIDAD ANAHUAC

ESCUELA DE INGENIERIA



VINCE IN BONO MALUM

**CONVENIENCIA ECONOMICA DE LA CONVERSION A CICLO
COMBINADO GAS-VAPOR DE UNA PLANTA ELECTRICA
TURBOGAS EN CICLO ABIERTO**

T E S I S

que para obtener el título de

LICENCIATURA EN INGENIERIA

MECANICA ELECTRICA

P R E S E N T A N

JOSE H. QUEZADA CANO

ENRIQUE F. QUEZADA CANO

HUGO TORRES ESPAÑA

TOMAS MARTINEZ HERNANDEZ

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

MEXICO, D.F.

1993



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INTRODUCCION

- 1.0 PRINCIPIOS TERMODINAMICOS**
- 1.1 PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA**
- 1.2 CICLOS DE VAPOR**
- 1.3 CICLOS DE TURBOGAS**
- 1.4 OTROS SISTEMAS**

- 2.0 ANALISIS DEL PROBLEMA ESPECIFICO**
- 2.1 DESCRIPCION DEL SISTEMA ACTUAL**
- 2.2 ALTERNATIVAS DE SOLUCION**
- 2.3 VENTAJAS DE LA CONVERSION A CICLO COMBINADO
SOBRE LAS OTRAS ALTERNATIVAS**

- 3.0 DESCRIPCION DEL SISTEMA**
- 3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA Y CARACTERISTICAS
BASICAS**

- 4.0 BALANCE TERMICO DEL SISTEMA**
- 4.1 PARAMETROS DE OPERACION**
- 4.2 SECUENCIA DE CALCULOS**

- 5.0 EVALUACION ECONOMICA**
- 5.1 DEFINICIONES**
- 5.2 ANALISIS ECONOMICO FINANCIERO**

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION.

Debido a la necesidad de impulsar los sistemas económicos que rigen al hombre desarrollado, se ha elegido el camino de la industrialización, dándole en consecuencia un lugar de primerísima importancia a la electricidad. Esta energía futurista, potencia eficiente y manejable, no concuerda definitivamente con los métodos primitivos que se emplean para generarla. Hasta estos días no conocemos otro procedimiento más que el que consiste en transformar la energía cinética a través de un transductor magnético al que llamamos generador, el cual si es prácticamente eficiente al 100%, pero las fuentes de movimiento siguen siendo sumamente ineficientes en sus diversas transformaciones de energías. Para las regiones como México, que no cuentan con recursos hidráulicos cuyos movimientos de agua mueven directamente los generadores, es un problema de lo más ordinario tener que recurrir a la quema de recursos naturales no renovables para obtener calor para accionar máquinas térmicas que con eficiencias pobres del 35% como máximo, mueven los generadores. De aquí que podamos sentir claramente que al ritmo que crece la demanda eléctrica en un futuro muy cercano, la humanidad ya no deberá contar con combustibles irrenovables de ninguna especie.

Poniendo especial atención al caso de energía para México, tomaremos en cuenta que es una nación poco desarrollada industrialmente, pero que promete desbordarse en crecimiento tanto demográfico como industrial. Actualmente su capacidad instalada de producción eléctrica asciende a los 25,000 MW, siendo el 30% nada más hidráulica, y el resto térmico quemando en su gran mayoría combustibles fósiles. El concepto de la utilización de combustibles nucleares está tendiente a la baja debido al alto riesgo y desequilibrio natural que provoca, y el método geotérmico resulta hoy en día exageradamente caro, al necesitarse máquinas muy robustas y de materiales muy sofisticados para que resistan la abrasión del vapor de baja presión y contaminado que se obtiene del magma para impulsarlas, aún así el mantenimiento es de costo muy elevado en comparación con el sistema que utiliza caldera, por lo que ya podríamos asumir que las dos únicas fuentes probables con que cuenta el hombre para producir tales cantidades de electricidad son: máquinas hidráulicas y máquinas térmicas alimentadas del calor de combustibles, teniendo en cuenta que el fuego sería la máxima reacción generadora de calor que acepta la naturaleza.

El género más importante de combustibles existentes en la tierra son los fósiles; a este renglón pertenecen el carbón mineral, el petróleo y derivados y el gas natural y cuyo inventario cuenta actualmente con 800,000 millones de barriles de petróleo, reserva probada que alcanzaria para 45 años aproximadamente al régimen de consumo actual que asciende a 48 millones de barriles diarios. Además de otros combustibles de la misma especie tales como carbón mineral y gas natural que se consumen a razón de 23 millones de barriles y 37 millones de barriles diarios equivalentes a petróleo respectivamente. siendo que otras fuentes tales como la hidroeléctrica y la nuclear proveen a la humanidad solamente un abasto de 8.6 y 5.8 millones de barriles diarios equivalentes a petróleo respectivamente, lo que nos deja bien clara la idea de que si el hombre no descubre el procedimiento de transformar la energía de la materia directamente en eléctrica manejable, en un futuro muy inmediato debe de irse pensando en la renuncia al modernismo como forma de organizar a la sociedad actual "civilizada", por lo que en este periodo de tiempo nos vemos obligados a extremar las eficiencias de nuestras máquinas térmicas para alargar al máximo la vida de la limitada reserva de combustibles con que contamos.

OBJETIVOS Y ALCANCES.

En base a los comentarios anteriores dedicaremos este trabajo al estudio de una entre tantas muchas situaciones donde se presentan grandes desperdicios de calor al generar energía eléctrica. Hay muchas industrias privadas en el mundo, cuyo giro principal no es la producción de electricidad, sin embargo generan para su consumo propio, sin importarles mucho el costo de los combustibles, ya que nunca figuran importantes en el costo final de sus productos. Desde otro punto de vista, estos combustibles mal aprovechados si influyen bastante en lo que respecta al consumo eléctrico a nivel nacional, por esto propondremos su mejor aprovechamiento mediante la modernización de los equipos que estas industrias tienen en operación, para permitir así brindar los excedentes a sectores donde son esencialmente necesarios para el desarrollo de un país.

1.0 PRINCIPIOS TERMODINAMICOS

1.1 Primera Ley de la termodinámica.

La primera ley de la termodinámica trata sobre el principio de conservación de la energía, estableciendo que dicha energía no se crea ni se destruye, solamente se transforma.

Tratándose para un sistema que opera en forma ciclica, la primera ley establece que la cantidad de calor suministrado por el medio en que se encuentra es proporcional a la cantidad de trabajo desarrollado por el sistema, y se representa de la siguiente forma:

$$\oint \delta Q = \int \delta W$$

Si el ciclo por el cual atraviesa el sistema no es concluido, el estado final del sistema será distinto del estado inicial, por lo que la cantidad de calor suministrado podrá ser mayor o menor que el trabajo efectuado por el sistema. Debido a lo anterior, existe un cambio de propiedades, ya que el sistema tiene una cantidad de energía distinta a la que se tenía en un principio; entonces la primera ley queda como sigue:

$$dE = \delta Q - \delta W$$

donde:

dE = cambio de energía en el sistema

δQ = cantidad de calor suministrado

δW = cantidad de trabajo realizado

la energía se divide en:

energía cinética,
energía potencial,
energía interna

En esta última se incluyen todas las otras formas de energía que están relacionadas con el estado termodinámico del sistema.

Por lo que la energía E queda de la siguiente manera:

$$E=U+EC+EP$$

U= energía interna
EC= energía cinética
EP= energía potencial

la primera ley para un sistema es:

$$Q - W = dU + dEC + dEP$$

Si sometemos el sistema a un proceso de presión constante, donde $EC = 0$
 $EP = 0$, de la primera ley se sabe que:

$${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$$

y si el trabajo W se define como:

$$\begin{aligned}{}_1W_2 &= \int p dV \\{}_1W_2 &= P \int dV = P(V_2 - V_1) \\{}_1Q_2 &= U_2 - U_1 + P_2 V_2 - P_1 V_1 = (U_2 + P_2 V_2) - (U_1 + P_1 V_1)\end{aligned}$$

Donde la transferencia de energía Q depende del cambio U + PV, y siendo esta última cantidad una propiedad termodinámica, que depende únicamente del estado del sistema, se le define como una nueva propiedad termodinámica llamada ENTALPIA (H):

$$H = U + PV$$

Debido a que la entalpia es una propiedad termodinámica que no se puede representar físicamente, ya que es una agrupación de propiedades que se presenta muy a menudo en análisis termodinámicos, como en el del sistema abierto.

Un sistema que opera en condiciones estables, es aquel en el que el flujo de masa y energía a través de sus límites, no cambia con el tiempo y donde la masa permanece constante dentro del sistema.

La siguiente figura nos representa un sistema abierto en estado estable.

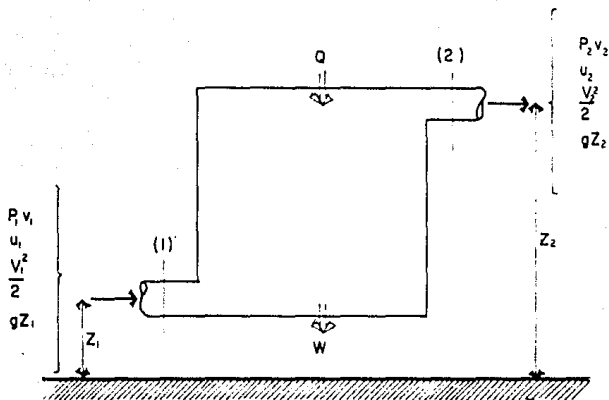


FIG. 1.1.1. ESQUEMA DE UN SISTEMA ABIERTO EN ESTADO ESTABLE.

La primera ley para un sistema abierto es:

$$mgZ_1 + \frac{mV_1^2}{2} + U_1 + P_1 V_1 + Q_2 = P_2 V_2 + U_2 + \frac{mV_2^2}{2} + mgZ_2$$

si $H = U + PV$, tenemos lo siguiente:

$$Q - W_s = H_2 - H_1 + \frac{m(V_2^2 - V_1^2)}{2} + mg(Z_2 - Z_1)$$

1.2 Segunda Ley de la Termodinámica

Como se vio en el punto anterior, la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se crea ni se destruye solamente se transforma, pero no establece ninguna limitación acerca de la conversión de algunas formas de energía en otras.

Con los axiomas de Clausius y de Kelvin-Planck, enunciaremos la 2a. ley de la termodinámica:

Axioma de Clausius: "Es imposible que el calor pase por sí sólo de una región de menor temperatura a otra de mayor temperatura".

Axioma de Kelvin-Planck: "Es imposible construir un dispositivo que opere en forma cíclica, y que tenga como único efecto el levantar un peso e intercambiar calor con una fuente de energía".

Analizando estos dos axiomas, la segunda ley establece que el calor no puede convertirse completa y continuamente en trabajo. Una parte de dicho calor va hacia un cuerpo de baja temperatura, es decir, la eficiencia térmica de una máquina que convierta calor en trabajo, siempre debe ser menor al 100%. Por lo anterior, mientras la energía siempre se conserva, la disponibilidad de ésta no.

1.3. Concepto de Reversibilidad

Un proceso reversible es un proceso ideal y es aquél que en cualquier momento puede detenerse e invertir la secuencia de los estados recorridos, para volver tanto al sistema como a los alrededores a su original estado.

Pero todos los procesos reales son irreversibles y es debido a diferentes factores: Fricción, transferencia de calor, expansión irrestricta.

Fricción: Tiene como consecuencia que el trabajo mecánico se disipe en calor. Un ejemplo sería el calentamiento que existe entre la flecha que gira dentro de un rodamiento.

Si queremos que la flecha comience a girar, no es posible sólo suministrando la misma cantidad de calor al rodamiento.

Transferencia de Calor: Esta se manifiesta de un objeto con alta temperatura hacia otro objeto de baja temperatura. Dicha transferencia no se puede efectuar a la inversa, de un cuerpo de baja temperatura, a otro cuerpo de alta temperatura, sin la ayuda de un agente externo. Al llevarse a cabo la transferencia de calor, existe una pérdida de energía, ya que ningún trabajo puede realizarse cuando dos objetos a diferentes temperaturas se ponen en contacto.

Expansión Irrestringida: La expansión de un gas es un proceso irreversible, ya que es imposible que, al retornar a su estado original, lo haga sin ayuda de un agente externo.

Con base en los tres factores anteriormente descritos, en un sistema de potencia, la irreversibilidad se clasifica en los factores siguientes.

Factores de Irreversibilidad Externa: Son aquellos que ocurren dentro de las fronteras del sistema, como la fricción de los fluidos en las tuberías, la expansión irrestringida y la mezcla de sustancias diferentes.

1.4 Concepto de Entropía

Este trata de definir que los procesos naturales que ocurren dentro de un sistema aislado tienden a equilibrarse otra vez, cuando ya se haya alcanzado nuevamente el equilibrio se deberá necesitar de la ayuda de un agente externo para activar de nuevo el sistema.

Existen métodos para calcular la energía dentro de un sistema, es decir, que podríamos conocer el grado de desequilibrio de éste. Necesitamos un procedimiento para conocer la cantidad de calor disponible. Se podría llevar a cabo, mediante el uso de la entropía la cual es una propiedad que se define como:

$$dS = dQ \quad \text{ó} \quad \delta Q = T dS$$

Donde

dS =cambio de entropía

dQ =transferencia de calor

T =temperatura absoluta a la que ocurre la transferencia de calor

1.2. CICLOS DE VAPOR.

El principio de la generación por medio de turbinas de vapor podría decirse que data desde el año 150 Antes de Cristo, cuando Hero de Alejandría diseñó y fabricó la primera turbina de vapor, que aunque no tenía utilidad alguna funcionaba bajo el principio de reacción pura, mismo que se emplea hoy en día. El desarrollo definitivo del diseño de estas máquinas se logró hasta 1882 cuando Goustav de Laval ideó los álabes de reacción para estas turbinas de vapor. Podemos decir que a la fecha sólo hemos perfeccionado sutilmente este par de diseños primitivos tratando de incrementar la eficiencia mecánica de transferencia de la energía cinética contenida en el vapor de admisión al rotor de la turbina sin grandes mejoras.

- Las turbinas tanto de acción como de reacción, son de flujo axial. Las de acción transfieren la energía de los gases al rotor, por medio del simple choque del vapor a alta velocidad contra los álabes móviles. Fig. 1.2.1, con la particularidad de que la expansión del vapor tiene lugar en los álabes fijos, con el propósito de obtener la mayor velocidad en los móviles.

Para obtener la máxima transferencia de energía con este sistema, los álabes deben moverse a la mitad de la velocidad del vapor.

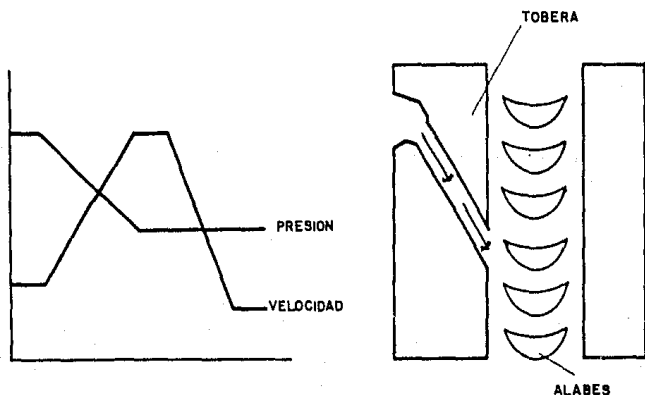
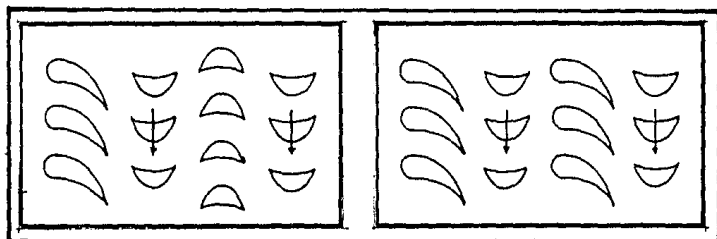


FIG. 1.2.1. FLUJO DE VAPOR A TRAVES DE UNA TURBINA DE ACCION.

Entre los diseños más importantes de turbinas de acción podemos citar al Curtis de velocidad compuesta y Rateau de presión compuesta, Fig. 1.2.2. donde se puede ver que la Curtis tiene dos hileras de álabes móviles, una tobera que dirige el vapor hacia la primera etapa de álabes móviles y a continuación otro diafragma de álabes fijos que alinea nuevamente el flujo de vapor hacia la siguiente etapa de álabes móviles.



CURTIS

RATEAU

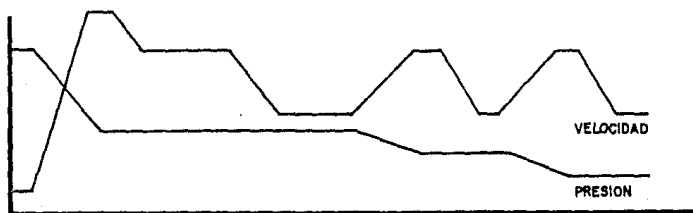


FIG. 1.2.2. FLUJO DE VAPOR A TRAVÉS DE LOS DISEÑOS CURTIS Y RATEAU DE ACCION.

Entre las ventajas de este diseño, podríamos apreciar un muy bajo número de etapas, bajas velocidades tangenciales y diámetros pequeños para estator y rotor.

En el diseño de Rateau de presión compuesta, cada etapa consta de una hilera de álabes fijos que operan como tobera y una hilera de móviles de la misma configuración.

En las turbinas de reacción los gases se expanden tanto en los álabes fijos como en los móviles. El álabe móvil viene siendo una tobera móvil la cual transfiere la energía aprovechando en cierta forma la incidencia directa del flujo de vapor sobre de él (acción) y expandiéndolo en sí mismo aumentando su velocidad, por lo que se produce una reacción sobre el álabe al ser abandonado por el vapor que pasa a la siguiente etapa.

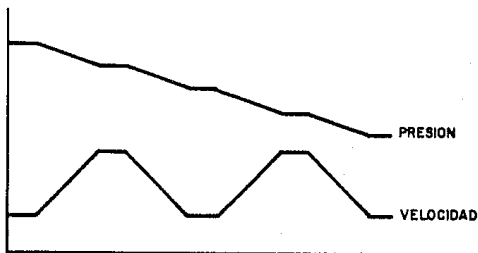
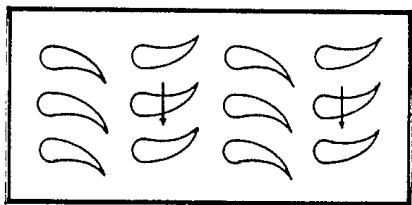


FIG. 123 FLUJO DE VAPOR A TRAVES DE UNA TURBINA DE REACCION.

Sin embargo las eficiencias mecánicas obtenidas a la fecha son de alrededor del 80%, por lo que pone a este tipo de máquinas en primer lugar cuando se piensa en grandes cantidades de caballos de fuerza, la producción de energía eléctrica en estos días requiere de máquinas confiables de relativo bajo mantenimiento y que puedan trabajar con carga constante. Además en lo que se refiere a máquina térmicas, la turbina de vapor en ciclo de condensación alcanza la mayor eficiencia calorífica conocida: 32%.

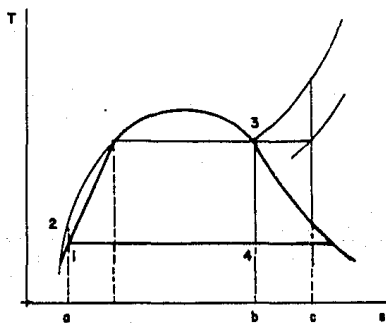
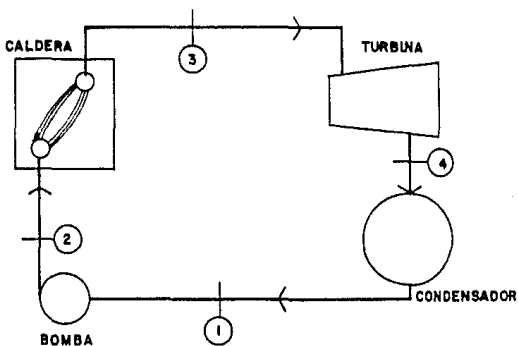


FIG. 1.2.4 CENTRAL DE VAPOR OPERANDO EN CICLO RANKINE

Esquema típico del ciclo Rankine

Como anteriormente mencionamos, el arreglo más eficiente para una turbina de vapor es el ciclo a condensación llamado también Rankine o convencional, fig. 1.2.4 y el cual consiste en proveer de vapor sobrecalentado a la turbina por medio de una caldera donde se produce éste mediante el intercambio de calor con el de un material en combustión. Después de haber intercambiado la energía del vapor en la turbina, éste es condensado mediante un sistema de enfriamiento que por tal causa, se denomina condensador y donde por medio de este fenómeno se crea un vacío aportando con esto acción positiva al flujo del sistema, posteriormente los condensados son forzados a alimentar nuevamente la caldera con bombas de alta presión.

Los procesos que comprenden este ciclo son los siguientes:

- 1-2 un proceso adiabático reversible en la bomba.
- 2-2'-3 Una transferencia de calor a presión constante en la caldera.
- 3-4 una expansión adiabática reversible en la turbina
- 4-1 una transferencia de calor a presión constante en el condensador

En este ciclo generalmente el vapor se sobrecalienta a alta presión y alta temperatura en la caldera hasta el punto 3' y su expansión adiabática en la turbina sería hacia el punto 4', sin embargo puede utilizarse tanto vapor saturado como vapor sobrecalentado para los mismos fines, dependiendo de las características de la planta. La eficiencia térmica η_{th} se determina con la siguiente ecuación:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{QH}$$

Simplemente trabajo neto W_{net} realizado entre el calor total suministrado. Como comentamos, la eficiencia del ciclo Rankine, puede incrementarse mediante el aumento de presión mediante la adición de calor, esto también disminuye la humedad del vapor en el escape de la turbina. El ciclo con recalentamiento, ha sido desarrollado para sacar ventaja del incremento de eficiencia con presiones más altas, y también evitar humedad excesiva en las etapas de baja presión de la turbina. Este ciclo está representado esquemáticamente en el diagrama T-S de la figura 1.2.5, donde se puede ver que la única novedad es que el vapor que se expande en alguna parte intermedia de la turbina es desviado a la caldera para calentarlo otra vez; después de esto vuelve a la turbina a completar el recorrido desde ese punto intermedio hasta la última etapa de baja presión.

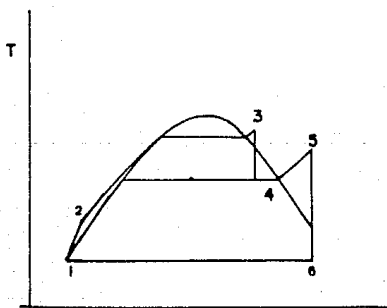
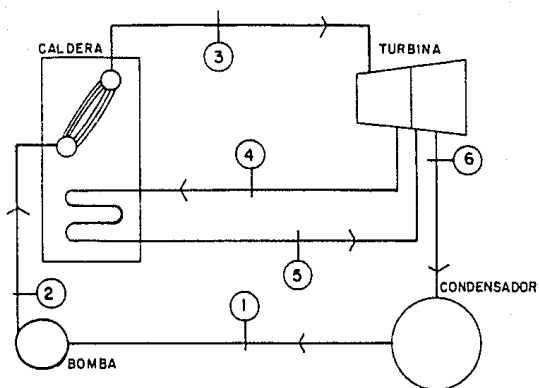


FIG. 1.2.5. CICLO IDEAL CON RECALENTAMIENTO

Es evidente según el diagrama T-S, que se gana muy poca eficiencia con esto ya que la temperatura del vapor suministrado no cambia tanto en promedio, pero las ventajas que se obtienen al no permitir humedad en las etapas de baja presión, son muy grandes al evitar desgaste prematuro de estos álabes salvando altos costos de mantenimiento y paros del sistema. También es útil notar que si hubiera metales capaces de resistir temperaturas y presiones de vapor mayores, el ciclo Rankine simple sería más eficiente que el recalentado y no habría necesidad de éste.

1.3 CICLOS DE TURBOGAS.

La factibilidad comercial del uso extensivo de las turbinas de gas en ciclo abierto en la generación de energía eléctrica todavía no está bien clara hasta hoy en día, su baja eficiencia térmica e incapacidad de quemar combustibles sólidos baratos nos hacen desconfiar de este sistema a primera vista. Los rangos de potencia de estas máquinas van desde los 100 hasta los 280,000 HP y son máquinas industriales que han servido mucho como accionamiento mecánico para grandes bombas, compresores, transporte marítimo y locomotoras, un reflejo de su baja eficiencia térmica es su alta temperatura y gasto de gases de escape, lo que se aprovecha como gran ventaja en arreglos industriales que requieren generación de electricidad y de vapor de proceso al mismo tiempo, a esto le llamaremos cogeneración.

Cuando la turbina de gas es usada como locomotor principal las aplicaciones pueden ser divididas en 3 clases:

- 1) Para aumentar la capacidad y eficiencia de una planta de vapor convencional.
- 2) Como fuente independiente de energía en competencia con otro tipo de locomotores principales.
- 3) Como unidad de emergencia para cubrir picos.

La combinación de ciclos de gas y vapor será discutida como tema principal en capítulos posteriores de esta tesis.

Como fuente de energía eléctrica independiente el principal atributo de la turbina de gas es a corto tiempo de entrega y rápida instalación además de su bajo costo, el cual asciende a tan sólo una tercera parte por kW de lo que cuesta el ciclo convencional de vapor. La eficiencia térmica de la turbina de gas es baja en comparación con otros locomotores tales como el diesel o la turbina de vapor convencional pero requiere de mucho menor inversión en tiempo y costo de mantenimiento y no requiere de las cantidades de agua que demanda un ciclo de vapor.

La turbina de gas, tiene muchos atributos que la hacen ideal para propósitos de emergencia cubriendo picos pasando mediante este criterio el costo del combustible a segundo término. Una de estas unidades puede ser puesta en marcha desde tirante frío a plena carga en sólo 25 minutos ó menos, siendo esto muy importante en una emergencia. También su instalación es muy barata, debido al poco espacio que ocupa, no requiere de casa de máquinas, solamente un basamento simple y acometidas sencillas de suministro eléctrico y combustible. Además puede ser operada a control remoto sin atención directa abatiendo así substancialmente los costos de operación. Una unidad instalada para picos está intencionada para proveer energía cuando por alguna causa la red de distribución a la que está conectada tiene una sobredemanda, es decir, que podría ser a ciertas horas durante los periodos de bajo nivel de agua de frecuencia y voltaje donde esta red deba dar servicio, la mayoría de las turbinas de gas para generar electricidad que operan en ciclo abierto son para cubrir picos o emergencias y muchos de los esquemas para combinar instalaciones de ciclo de gas con vapor requerirán de ser desarrolladas para usos futuros.

Como ya mencionamos, la desventaja más importante de la operación de la turbina de gas es su incapacidad de utilizar combustibles sólidos como el carbón y líquidos pesados como el Bunker "C" que quemar usualmente las calderas de los ciclos convencionales de vapor. En la actualidad se han desarrollado sistemas para tratar ambos combustibles antes de aplicarlos a la turbina con buenos resultados, pero a alto costo, y vale la pena mencionar que en este tipo de máquinas es costoso la operación sólo con combustibles muy limpios de preferencia gaseosos que no contengan ni vanadio ni sodio, materiales que a alta temperatura desgastan en exceso los álabes y partes calientes de la turbina.

El ciclo teórico para la turbina de gas es el ciclo Bryton el cual está compuesto por:

- Compresión adiabática.
- Adición de calor a presión constante.
- Expansión adiabática y
- Rechazo de calor a presión constante.

Como se indica en la Fig. 1.3.1 el aire entra en el compresor y es comprimido teóricamente a entropía constante hacia el punto 2. En realidad el proceso del compresor es irreversible, produciendo un incremento de entropía. Entonces el aire abandona al compresor realmente en 2 y no en 2'.

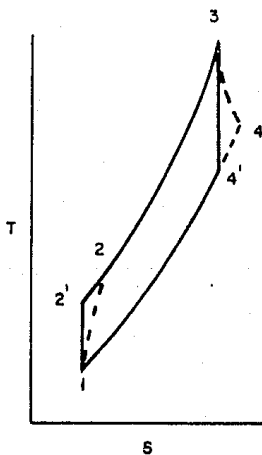
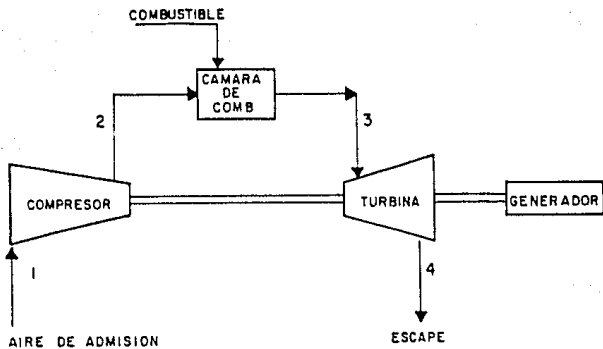


FIG. 1.3.1. CICLO SIMPLE TURBOGAS CON DIAGRAMA T-S

La adición de calor se realiza en la cámara de combustión teóricamente de 2' a 3, pero realmente es de 2 a 3.

Hay una pequeña caída de presión en la cámara de combustión que no consideraremos.

Teóricamente la expansión a través de la turbina es adiabática de 3 a 4'. Como en una turbina de vapor la expansión realmente va acompañada de un incremento de entropía. Esto está indicado como el proceso 3-4.

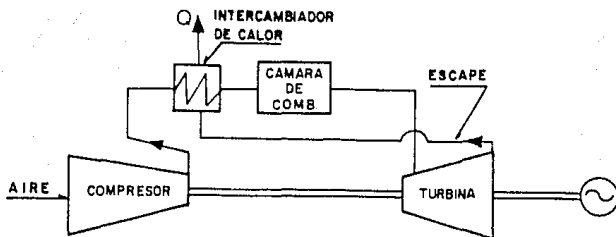
En este punto es conveniente distinguir el ciclo abierto del cerrado. En el diagrama que mostramos se indica una descarga de gases a la atmósfera y por otro lado un ingreso al compresor de gases de la atmósfera. Esto es el ciclo abierto, en el mismo que están diseñadas la mayoría de las turbinas de gas comerciales industriales que existen.

En el diagrama T-S de la figura 1.3.1, el punto del escape de la turbina, punto 4 (04') está conectado al punto del aire entrando, punto 1 por un proceso de presión constante indicando que los gases de escape son enfriados antes de entrar otra vez al sistema. Esto se trata del ciclo cerrado, Fig. 1.3.2., el cual requiere de un muy costoso intercambiador de calor entre el escape de la turbina y la entrada del compresor y grandes cantidades de agua o aire como medio de enfriamiento.

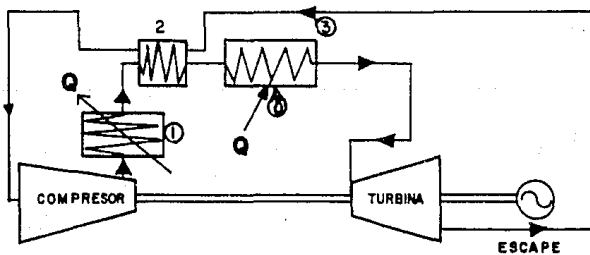
Los ciclos cerrados han sido propuestos como una alternativa para adaptar la turbina de gas al combustible sólido. En un arreglo en esta base le sería agregado calor al ciclo mediante el intercambiador de calor conectado entre 2 y 3 y los materiales abrasivos resultantes de la combustión del carbón mineral no entrarían a la turbina.

Debemos mencionar que en la teoría resulta fácil esta adaptación, sin embargo, tanto estos intercambiadores a alta presión y temperatura como cámaras de combustión aisladas no han sido desarrolladas a la fecha como para confiar en el sistema. Otra ventaja que podría tener este sistema de ciclo cerrado es que podría usar otro tipo de gas como substancia de trabajo en vez de aire, que es capaz de utilizar pasajes más reducidos para la misma masa de gas, reduciendo así el tamaño de la máquina. Es decir que el incrementar la densidad del gas de trabajo permite mejorar la capacidad de manejo de energía del flujo, lo cual aumenta la potencia del sistema.

Por este medio, es posible regular la potencia neta de salida mediante el control de la presión o densidad del gas de trabajo o substancia de trabajo.



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



C I R C U I T O C E R R A D O D E G A S

FIG. 1.3.2. DOS ARREGLOS DE CICLO CERRADO.

Aunque teóricamente parece ser la solución a los problemas de combustión de la turbina de gas, en conclusión debemos comentar, que todos los desarrollos mecánicos sobre el ciclo cerrado no han tenido éxito a la fecha por dos razones; baja eficiencia en los cambiadores de calor y falta de resistencia en los materiales de los mismos que tienen que soportar altas presiones y temperaturas.

Usando la nomenclatura de la figura 1.3.1 las siguientes ecuaciones corresponderían para el ciclo simple para un kilogramo de aire de flujo.

$$\text{Trabajo del compresor} = \frac{h_2 - h_1}{\eta_{mc}} = \frac{h_2 - h_1}{\eta_c \eta_{mc}}$$

Donde:

η_{mc} = Eficiencia mecánica del compresor

h = Entalpía del aire o gas

Notar que para cada kilogramo de aire que fluye en el compresor hay $(1 + W_f)$ Kg. de gas fluyendo a través de la turbina.

Donde:

W_f = Relación de aire combustible

Potencia de la turbina: $\eta_{mt} (h_2 - h_1) (1 + W_f)$

$\eta_{mc} \eta_c (h_3 - h_4) (1 + W_f)$

Donde:

η_c = Eficiencia adiabática de la turbina

η_{mt} = Eficiencia mecánica de la turbina

Potencia Neta del Ciclo

$$= \eta_{mt} (h_3 - h_4) (1 + W_f) - \frac{(h_2 - h_1)}{\eta_{mc}}$$

$$\text{Combustible quemado} = W_f = \frac{h_3 - h_2}{\text{PCI} (\eta_c)}$$

Donde: PCI (η_c) = Eficiencia del quemador

La masa de aire requerida para producir un trabajo dado será:

$$W = \frac{\text{kW } 3413}{\eta_c \eta_m (h_3 - h_4) (1 + W) - \frac{h_2 - h_1}{\eta_m}}$$

Donde:

η_c = Eficiencia electromecánica del generador

W = Flujo de aire en masa kg/hr.

kW = Potencia del generador

La eficiencia del ciclo es solamente de atractivo teórico, lo que en realidad nos interesa es el rendimiento calorífico durante el funcionamiento de la máquina. Es una costumbre en la industria utilizar el mínimo poder calorífico del combustible PCI cuando se determina el rendimiento térmico RC = Heat Rate

$$RC = \frac{W W_t \text{ PCI}}{\text{kW}}$$

1.4 OTROS SISTEMAS

Siguiendo el criterio de aprovechar fuentes de calor para impulsar máquinas térmicas generadoras de electricidad podemos citar:

A) LA GEOTERMICA

B) LA NUCLEAR

Que consisten principalmente en ciclos convencionales de vapor pero con diferente especie de procedencia de la fuente de calor que los combustibles fósiles.

La máquina geotérmica obtiene el vapor del subsuelo de ríos subterráneos que pasan cercanos a formaciones de magna obteniendo de ahí el calor. Este sistema tiene la enorme ventaja de que el calor se obtiene a muy bajo costo relativamente y de una fuente muy duradera, se podría decir que inagotable en relación con la vida de una central convencional; sin embargo cuenta con desventajas que la ponen en duda acerca de la costeabilidad de su operación.

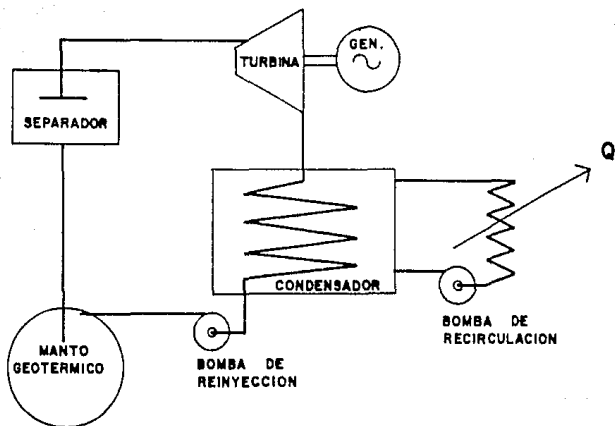


FIG. 1.4.1 CICLO RANKINE CONVENCIONAL ALIMENTADO POR VAPOR GEOTÉRMICO.

El vapor saturado y contaminado que se obtiene por este procedimiento se suministra a los turbogeneradores en la máxima desventaja en lo que a operación de estas máquinas se refiere, es decir; al tratarse de vapor a baja presión es necesario fabricar máquinas mucho más grandes para las mismas potencias que se manejarían con máquinas a las que se les suministra vapor seco a alta presión. Por otro lado la humedad excesiva causa abrasión en los álabes acortando considerablemente su vida además un descontrol en el tratamiento del vapor causaría también un uso desmedido en las partes internas de la turbina elevando muchísimo los costos de operación y mantenimiento y reduciendo su confiabilidad. Es muy importante aclarar que aún siendo muy barato el vapor, las desventajas antes citadas son suficientes como para hacer incosteable este sistema. En México la reserva probada de vapor de este tipo es de 1.26 millones de kW y la probable de 4.2 millones de kW repartidos en poco más 15 sitios. Para el año 1987 ya se había desarrollado este sistema hasta llegar a producir 650 mil kW y

era factible llegar a tener en el futuro un total de 2 millones de kW pero por lo que ya hemos mencionado se ha optado por invertir en otros tipos de generaci3n.

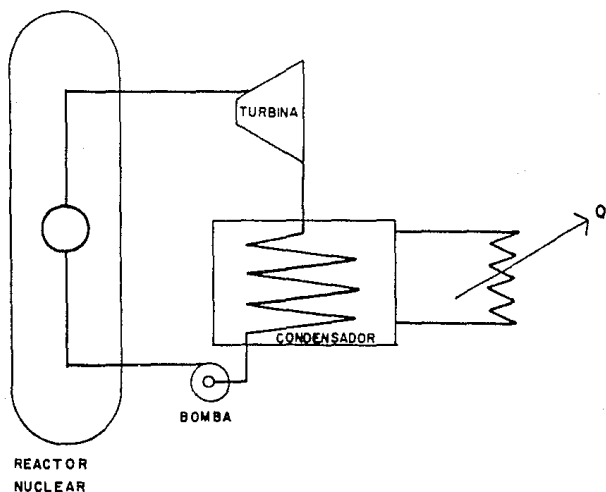


FIG.1.4.2. CICLO RANKINE CONVENCIONAL ALIMENTADO POR VAPOR GENERADO EN REACTOR NUCLEAR

La nucleoelectrica consiste enteramente en un ciclo convencional de vapor tambi3n, s3lo que aqui se obtiene el calor de la reacci3n nuclear de materiales radioactivos; al ser un procedimiento m3s peligroso que el fuego proveniente de combustibles se extremen las medidas de seguridad involucrando vapor saturado para garantizar un adecuado enfriamiento del n3cleo del reactor, lo que conlleva en manejar grandes gastos a relativa baja presi3n de fluido de trabajo. No obstante la calidad de este vapor est3 muy bien controlada y se pueden alimentar los turbogeneradores sin que estos sufran desgaste m3s all3 de lo especificado, concluyendo en bajos costos de operaci3n y mantenimiento de la turbo maquinaria y en confiabilidad para la central. Aunque la producci3n de vapor mediante este sistema resulta m3s barata que con combustibles f3siles, la complejidad de los sistemas de seguridad, los altos costos de instalaci3n y el fuerte impacto ecol3gico creado por la peligrosidad del combustible radioactivo agotado, cuestionan hoy en d3a el desarrollo de este tipo de centrales.

2.0 ANALISIS DEL PROBLEMA ESPECIFICO.

2.1 DESCRIPCION DE LA SITUACION ACTUAL.

Se nos ha encomendado hacer una propuesta para lograr un mejor costo del kW producido en una planta de generación de electricidad que cuenta con dos turbogeneradores a gas patente General Electric de 25 MW operando en ciclo abierto con consumo calorífico (HR) de 13,170 kJ/kWh. Esta central está situada en la cercanía de su principal centro de consumo, el cual es una planta industrial que maneja hidrocarburos y que necesita 18 MW de base y 23 de pico; esta central fue instalada para dar suministro eléctrico nada más a este cliente, pero estaba previsto un consumo de 40 MW, sin embargo, los proyectos de éste no llegaron a su conclusión final, dejando a nuestra planta eléctrica sobrada de capacidad. El primer problema es que la carga base (18 MW) es muy baja para las dos unidades y mucho para una sola, sobre todo que en el periodo de picos, tendría que ser necesaria más capacidad de apoyo.

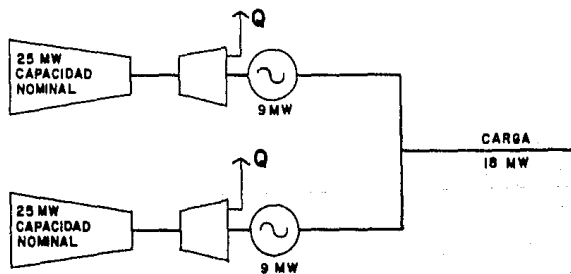


FIG. 2.1.1. DOS TURBINAS DE GAS TRABAJANDO A CICLO ABIERTO Y BAJA CARGA.

Por lo que no queda otra alternativa que operar la planta con las dos unidades con 9 MW, cada una en base y 12 MW cuando mucho en picos; ya hemos explicado que la eficiencia térmica de las turbinas de gas es bastante baja en ciclo abierto, ahora operando a menos de plena carga.

Estas eficiencias son más pobres todavía, reflejándose esta acción en un muy importante desperdicio de combustible sobre todo cuando la central eléctrica no es para emergencias. Fig. 2.1.1.

2.2 ALTERNATIVAS DE SOLUCION.

En virtud de que las turbinas de gas deben emplear combustibles finos, es decir, preferentemente gaseosos, o si es líquido, este deberá ser refinado y purificado lo que conduce a un alto costo en comparación con el que podrían quemar otras máquinas de producción eléctrica, nos sugiere que la solución a nuestro problema está basada en los siguientes elementos:

- Operar la central a carga plena.
- Tratar de optimizar la eficiencia térmica de la central.

Como ya habíamos comentado, si operamos la central a su máxima capacidad dentro del rango de seguridad ganaríamos considerable eficiencia térmica y también eficiencia económica en costo de equipo/kW, el cual se amortiza más rápido.

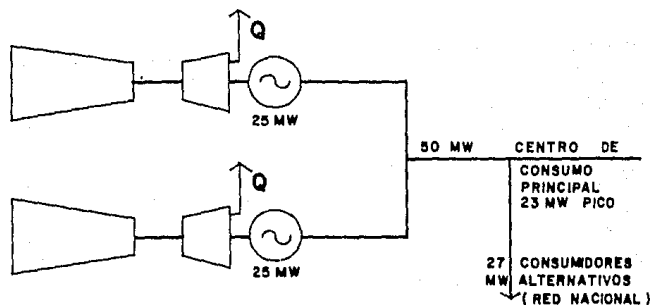


FIG. 2.2.1 EQUIPO A PLENA CARGA CON EXCEDENTES

Sabemos que tendríamos más consumo de combustible y mucho más producción también, por lo que sería una obligación la de conectar esta central a la red nacional para poder vender todos los excedentes que nuestro consumidor principal no pueda aceptar. Figura 2.2.1.

Referente a la alternativa b), vale la pena estudiar alguna posibilidad para ganar más eficiencia térmica al ciclo abierto de turbogas ya que contaremos con grandes volúmenes de aire caliente desperdiciados en el escape de las turbinas, para mejorar la eficiencia aprovechando este calor podríamos enunciar los procedimientos siguientes:

- 1) Ciclo regenerativo.
- 2) Cambio de partes internas más desarrolladas ó cambio a modelos más eficientes.
- 3) Cogeneración.

El ciclo regenerativo consiste en pasar el gas caliente del escape (470 Grados C aprox.) por un intercambiador de calor que precalienta el aire, a la salida del compresor. Figura 2.2.2.

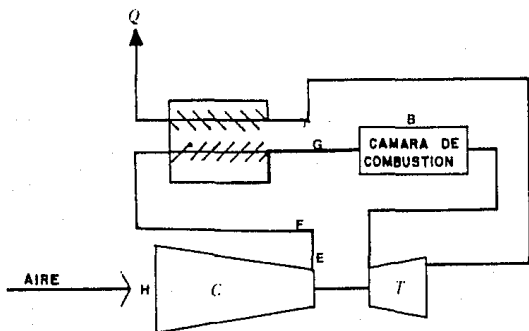


FIG. 2.2.2. CICLO REGENERATIVO

Con este aporte de calor antes de la combustión, podríamos ganar hasta un 3% más de eficiencia.

A pesar de ser un aditamento aparentemente sencillo el que conforma este sistema, no es muy barato ya que los materiales que se emplean en el intercambiador son muy especiales y por otro lado este sistema no está muy aceptado por la industria ya que las altas presiones y temperaturas a las que está sometido este intercambiador, lo ponen en un rango inseguro acortando su vida y produciendo problemas de fugas que constantemente se le presentan, sacando inevitablemente al turbogenerador a gas de operación, proporcionando además costosos paros y arranques que repercuten en el desgaste prematuro de los álabes de la sección caliente a causa de las variaciones bruscas de temperatura.

Para lograr este objetivo sobre las turbinas de gas existentes, es necesario lo siguiente:

- 1) Modificar los álabes guía de entrada de aire al compresor (H).
 - 2) Sellar la salida del compresor (E).
 - 3) Modificar las carcasas del compresor con bridas para poder instalar las tuberías de salida de aire al regenerador. (F).
 - 4) Modificar las cámaras de combustión (B) con bridas para que acepten la entrada de aire proveniente del regenerador. (G).
- Según la figura 2.2.2

Costos y Comentarios:

Con este sistema se lograría un rendimiento calorífico de 11,509 kJ/kW/hr. contra 13,028 kJ/kW/HR del ciclo sencillo abierto, (según IBC Turbo de Houston USA). Este sistema está normalmente intencionado para máquinas de doble flecha para accionamiento mecánico de grandes bombas y compresores, por ejemplo.

El costo de esta conversión sería aproximadamente así:

- a) Convertir las máquinas existentes para que acepten el regenerador.

1.4 MM de USD.

- b) Costo del regenerador y accesorios.

1.4 MM de USD.

c) Fletes, seguros, instalación, materiales, mano de obra, etc.

1.2 MM de USD.

TOTAL: 4.0 MM de USD.

costo por MW ganado:

4.00 = 1.33 MM de USD
3 MW

En nuestra opinión particular esta opción resulta obsoleta hoy en día, ya que el último modelo de estos turbogeneradores, el General Electric modelo PA, que por su simple concepción con álabes de diseño más avanzado, hechos de materiales más sofisticados que aceptan temperaturas más altas, puede mejorar la eficiencia más o menos al mismo nivel que el ciclo regenerativo y con una garantía de confiabilidad de una máquina nueva, y sin los riesgos que produce el regenerador. Estas turbinas existentes aceptan la modernización a Modelo PA, sin complicación alguna con las siguientes ventajas:

Se ganaría una reparación mayor de la máquina completa con registro de cero horas y se ganaría eficiencia térmica a 13,068 kJ/kW/hr.

El costo de esta conversión sería de 2.0 MM de USD.

También podríamos pensar en cambiar radicalmente de modelo de máquina substituyendo las dos existentes por una sola del modelo que les sigue en tamaño; que es la MS 6001 que es capaz de producir 36 MW a plena carga con un rendimiento calorífico de 11,495 kJ/kW/hr.

El precio de esta alternativa es de:

9.5 MM de USD y
.8 MM de USD por fletes, instalación,
seguros, materiales varios, etc.

TOTAL: 10.3 MM de USD

Precio por MW ganado = 10.3 MM de USD = .93 MM de USD/MW
36 - 25 MW

El último procedimiento que podemos aplicarle al sistema para mejorarle la eficiencia es la cogeneración ó ciclo combinado. Como ya hemos mencionado, esto consiste en aprovechar el calor del escape para producir vapor y accionar otro turbogenerador de vapor adicional. Dentro de este procedimiento tenemos a la disposición un gran número de opciones que van desde aprovechar sólo una parte del calor desperdiciado hasta disponerlo todo y además, utilizar combustible extra en la caldera, la cual tomaría el aporte del gas caliente de la turbina de gas como calor en si y comburente para la post combustión, ya que la combustión en la turbina de gas se realiza con exceso de aire, quedando un muy buen sobrante de oxígeno para estos propósitos.

El costo de esta conversión sería a razón de:

- A) 2 Calderas de recuperación con deaerador integrado, ductos, válvulas, etc.

8.0 MM de USD.

- B) 1 Turbogenerador a vapor a condensación de 25 MW, con auxiliares, consola de lubricación, bombas alimentadoras, condensador, auxiliares eléctricos, etc..

11.00 MM de USD

- C) Ingeniería, dirección de proyecto, supervisión técnica, entrenamiento, seguros, fianzas, costos de financiamiento, etc..

Costo del lote: 1.1 MM de USD

- D) Todos los materiales varios necesarios para la instalación, obra civil, etc..

Costo del lote: 3.3 MM de USD

Costo total de la conversión:

23.4 MM de USD

Costo por MW ganado:

$23.4 \text{ MM} = 0.86 \text{ MM/MW}$
27.1 MW

Según IBC Turbo Houston USA

2.3 VENTAJAS DE LA CONVERSION A CICLO COMBINADO SOBRE LAS OTRAS ALTERNATIVAS.

Las ventajas que se obtienen serian:

No es necesario sacar de operación a las máquinas existentes más que un corto período que comprende la conexión del escape de la turbina de gas a la caldera de recuperación. Otra ventaja sería que ya se cuenta en realidad con la fuente de calor sin costo que impulsaría al ciclo de vapor a condensación. Otra ventaja sería que se obtendría el mejor rendimiento calorífico que una máquina térmica para generar electricidad pueda dar, coadyuvando con esto a una pronta recuperación económica. Otra ventaja sería su relativamente fácil y rápida implantación.

Este sistema también cuenta con gran versatilidad, ya que puede operar con poco calor de suministro cuando una de las turbinas a gas sale de operación y también la turbina de vapor por su reducido tamaño relativamente, puede ser puesta en marcha y retirada del servicio diariamente si es necesario, siendo su tiempo de arranque desde frío de una hora cuando mucho, facilitando su mantenimiento sin tener que prescindir de toda la capacidad de la central.

También hay que considerar que el costo de equipo por kW ocuparía cuando menos el segundo lugar en competencia con los otros sistemas propuestos.

Para el caso que tenemos en estudio, pensamos que la utilización al máximo del calor desperdiciado sería lo ideal; teniendo en cuenta que con este podríamos producir con vapor, hasta la mitad de la potencia que se produce con el ciclo de gas. Creemos que aún siendo el de más costo inicial de todos los sistemas propuestos es el que cumple con los objetivos fijados y podría tener la más rápida recuperación económica debido a su alta eficiencia. Cuando el fin perseguido es producir el máximo de Kw's con el menor combustible, esta planta versátil de cogeneración en ciclo combinado debería ser la solución más adecuada.

3.0 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.

3.1 COMPONENTES DEL SISTEMA Y CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

La central a ciclo combinado vapor gas es una central concebida para trabajar en base o semi-base.

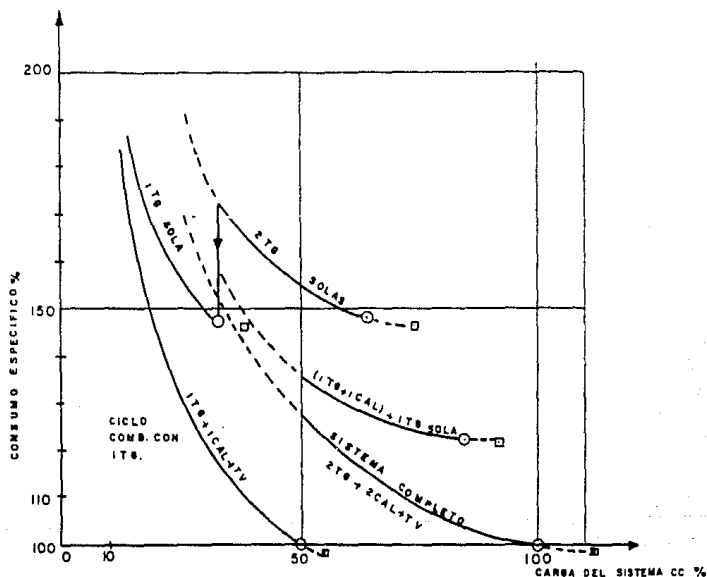
En el caso que contemplamos esta central estaría constituida por los siguientes elementos:

- 2 turbinas a gas Modelo MS 5001 de 25 MW cada una. (Existentes).
- 2 calderas de recuperación sin fuego complementario (SF).
- 1 turbina de vapor a condensación de 25 MW aproximadamente.
- 1 instalación para agua.
- 1 lote de equipos para comando y control.
- y otras instalaciones tales como:
 - * instalación de combustibles
 - * instalación eléctrica complementaria.
 - * instalación de circuitos de refrigeración.
 - * los dispositivos para mantenimiento.

Cada uno de estos equipos está diseñado para obtener flexibilidad y alta eficiencia. El rendimiento del ciclo será de 40% aproximadamente, lo cual ya hemos comentado que es superior al obtenido en centrales térmicas clásicas del mismo rango de potencia, cuando se aplican cargas parciales, este rendimiento no cambia prácticamente. El principio de funcionamiento que incluye a dos diferentes ciclos de máquinas térmicas Bryton y Rankine, es simple y se trata de máquinas confiables para trabajo pesado y carga base.

La potencia de base es producida por las turbinas de gas. Los gases de escape, que salen a una temperatura del orden de los 500 °C atraviesan el interior de las calderas de recuperación. Estas calderas producen, sin aporte de combustible adicional, un cierto caudal de vapor sobrecalentado a 450 °C que permite mover una turbina de vapor a expansión directa y condensación pura. La potencia entregada por esta turbina de vapor es prácticamente igual al 50% de la potencia total de las turbinas de gas.

Las calderas son a circulación forzada y el conjunto calderas turbina de vapor funciona a presión variable de acuerdo a la carga. Cuando la carga de las turbinas de gas baja, las válvulas de admisión de la turbina de vapor tienden a abrirse, la presión del vapor disminuye y el régimen de recuperación es mejor que si la presión se hubiera mantenido fija. Gráfica 3.1.1.



○ MARCHA EN BASE

□ MARCHA EN PICO

(SIN ACCION SOBRE LOS ALABES DIRECTRICES)

FIG. 3.1.1. VARIACION DEL CONSUMO ESPECIFICO EN FUNCION DE LA POTENCIA.

La turbina de vapor gira a 3600 RPM, no hay por lo tanto reductor entre el alternador de 60 CPS y la turbina. La turbina no tiene extracción (sangrado), el recalentamiento del agua de alimentación, como se verá más adelante, se lleva a cabo recuperando energía de los gases de escape de las turbinas de gas.

La potencia total neta de este conjunto de máquinas es de 76.9 MW en base y de 79 MW en pico. Estos valores son logrados en las condiciones ISO (15 °C y 1.013 bar) y utilizando gas natural como combustible, además una temperatura de agua de enfriamiento de 20°C que nos conduce a un vacío en el condensador de 70 mbar. Ya también veremos adelante que la potencia varía de acuerdo a las condiciones del lugar de instalación, tales como temperatura ambiente y altura sobre el nivel del mar. El consumo específico neto sobre el PCI (LHV o poder calorífico inferior del combustible).

Para las potencias mencionadas arriba es de:

-En base a 8.990 kJ/kWh a 40.0% de eficiencia térmica global.

-En pico 8.530 kJ/kWh a 42.2% de eficiencia térmica

El esquema del conjunto lo podemos ver en la figura 3.1.2.

Las turbinas de gas MS 5001 que integrarían esta central, consisten básicamente en lo siguiente:

- La turbina propiamente dicha.
- El alternador o generador.
- El compartimiento de control.
- El compartimiento de protecciones eléctricas.

Las características de funcionamiento y eficiencias son las siguientes:

- Pérdidas de carga en la admisión: 100 mm de H₂O.
- Pérdidas de carga en el escape: 350 mm H₂O
- Potencia producida: 24.9 MW.
- Caudal de gases: 435.8 t/h.
- Temperatura de escape: 493.4 °C.
- Consumo específico: 13,170 kJ/kWh.
- Consumo horario: 328 millones de kJ/hr

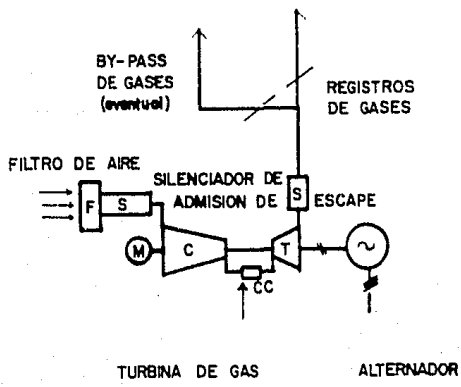
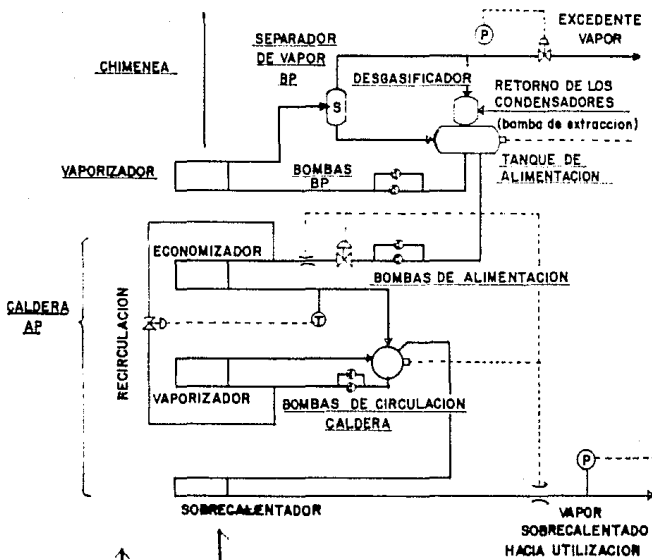


FIG. 3.1.2 ESQUEMA DE LA CALDERA SOBRE LA TG

Caldera de recuperación

El circuito interno de la caldera se compone principalmente de los elementos siguientes:

- Sobrecalentador.
- Evaporador.
- Economizador.
- Evaporador de baja presión.

La caldera es de circulación forzada, no tiene quemadores de aporte, y funciona a presión variable según la carga. Fig. 3.1.3.

Sus características de funcionamiento óptimo son:

Temperatura de agua de alimentación: 105 °C quemando gas.

Gases a la entrada: 442.5 t/h a 493.4 °C.

Caudal de vapor producido: 51.2 t/h.

Presión del vapor: 31.5 bars

Temperatura del vapor: 450 °C.

Temperatura de gases en la salida: 155.4 °C.

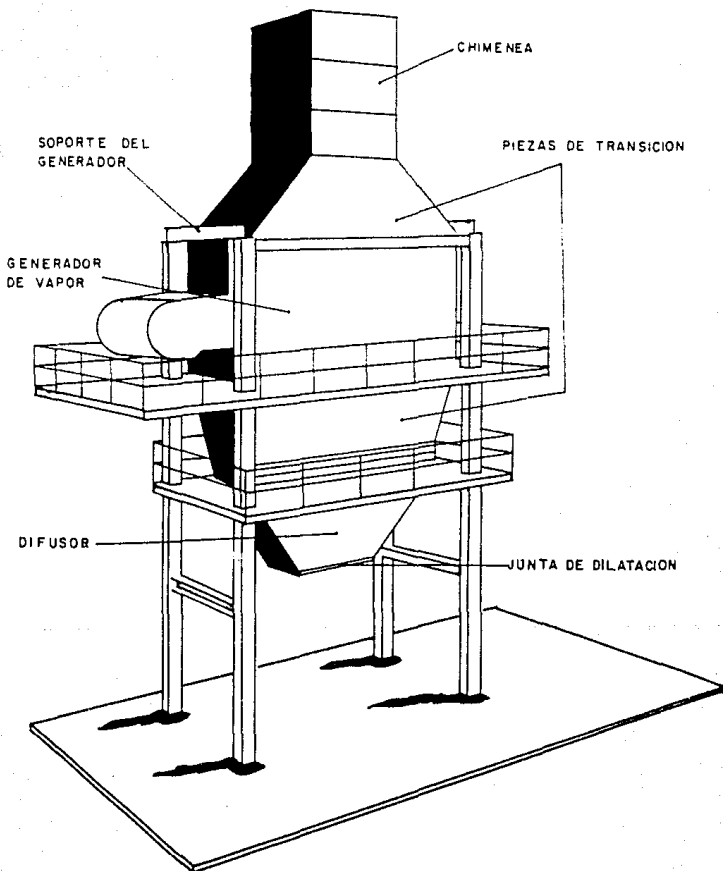
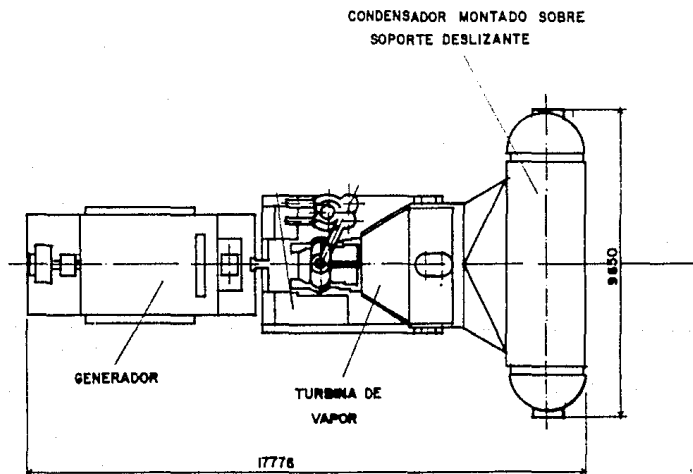


FIG. 3.13. CALDERA DE RECUPERACION TIPICA

Turbina de vapor:

La turbina de vapor es de condensación y se compone de un cuerpo de alta presión de hierro colado y un cuerpo de baja presión de pailería y un sólo rotor sobre flecha monolítica.

El acoplamiento del alternador va del lado de la admisión del vapor y el escape va sobre el extremo de la turbina hacia un condensador transversal. Fig. 3.1.4.



31.4 FIG. TURBINA DE VAPOR DE 28 MW PARA ADAPTARE AL SISTEMA

La turbina tiene dos desvíos de alta presión de retorno que se utilizarán en los arranques y ciertos regímenes transitorios. El vacío en el condensador se realiza ya sea con agua y bombas eléctricas o ventiladores de aire eléctricos, según el caso.

Las características de funcionamiento de la turbina son:

Caudal de admisión: 102.4 t/h.

Presión de admisión: 30 bars.

Temperatura: 448 °C

Presión del condensador: 50 m bars.

Potencia del alternador: 27.1 MW

Velocidad de rotación 3,600 RPM

Instalación de agua.

Comprende principalmente dos grupos de motobombas eléctricas de extracción.

Tanque de almacenamiento de agua (capacidad de reserva: 15 m³) con su desgasificador.

- 3 grupos de motobombas alimentadoras de AP.
- 2 grupos de motobombas de BP.
- El equipo de desmineralización de agua de aporte a las calderas.
- Las tomas de muestras de agua y vapor.
- El equipo de inyección de reactivos.
- Los dispositivos de expansión de purgas.

Equipos de combustibles

Para gas natural :

- Separadores.
- Filtros
- Recalentador eventual
- Planta de regulación
- Tuberías y válvulas accesorias.

También se contemplan tanques de almacenamiento de combustible líquido ya sea diesel o combustible pesado.

Si se planea utilizar combustible pesado deberá existir además una planta de tratamiento, este tratamiento consiste en un lavado para bajarle el contenido de vanadio y sodio, contaminantes que perjudican importantemente la sección caliente de la turbina de gas. La separación del agua utilizada en este lavado se realiza por decantación mecánica o centrifugación.

Sistema de Condensación:

El condensador es enfriado por agua ya sea dulce o salada, es decir la que predomine en el lugar de instalación. Las bombas de recirculación podrán ser 2 o 3 de acuerdo a las necesidades. Si se utilizan torres de refrigeración, ellas podrán ser del tipo húmedo, lo que lograría un muy buen vacío pero en detrimento del consumo de unos 100 t/h de agua de aporte.

La central de ciclo combinado esta estudiada para ser instalada en regiones donde el agua es muy escasa, resolviendo el problema del enfriamiento del condensador mediante circulación de aire.

Comando y control adjunto:

Este equipo consiste en:

- Los circuitos de regulación de funcionamiento del conjunto.
- Los equipos de seguridad y las alarmas.
- Paneles de instrumentos del cuarto de control centralizado
- Instalación eléctrica baja tensión:
- Esta instalación comprende:
- El material de protección.
- El cableado para motores y otros aparatos eléctricos.
- El cableado entre el sitio de instalación y los aparatos remotos.

Instalación eléctrica alta tensión:

- 3 Transformadores de potencia iguales para cada uno de los generadores.
- Transformadores auxiliares

Influencia de las condiciones locales:

La potencia de las turbinas de gas o del ciclo combinado disminuye si aumentan la altitud o las temperaturas ambientales. El rendimiento de las máquinas no se ve afectado por la altitud, en cambio si lo afecta la variación de la temperatura ambiente. En todos los casos el rendimiento del ciclo combinado es menos afectado que el de las turbinas de gas de ciclo simple. Este es debido al aumento de temperatura de los gases de escape de las turbinas de gas.

Para calcular exactamente la influencia de las condiciones ambientales sobre el ciclo combinado es necesario aclarar que el criterio es sobre una instalación ideal en condiciones ISO adaptable a cada situación realmente o sobre una instalación figurada que funcionará entonces en condiciones diferentes.

La realidad será intermedia entre estas dos situaciones , es decir:

- Las turbinas de gas son siempre las mismas de fábrica.
- En las calderas de recuperación deberá preverse un ajuste fácil en su diseño a realizarse después de las pruebas de la central si las condiciones locales ambientales difieren mucho de las de base ISO.
- La turbina de vapor está fabricada a partir de un cuerpo fundido de alta presión, que podrá permanecer igual pero deberán preverse modificaciones en el cuerpo de baja presión, para ajustarla según la temperatura del agua de enfriamiento, inclusive. Pero como ya lo hemos mencionado anteriormente, en este estudio nos basaremos únicamente en las condiciones de diseño ISO (15 °C - 1.013 bar).
- Influencia sobre la turbina de gas sola.

La altitud modifica el rendimiento como lo indica la curva de la Fig. 3.1.5

El factor de correccion se aplica sobre:

- el Caudal de Aire
- la Potencia TG
- el consumo horario TG
- el caudal de vapor
- la potencia TV
- la potencia del sistema

Los consumos especificos no cambian.

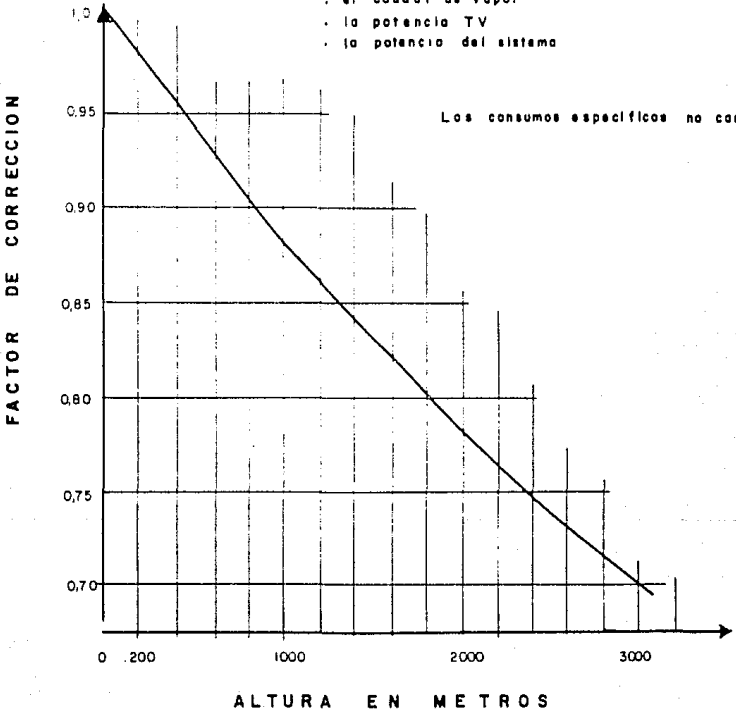


FIG. 3.1.5. INFLUENCIA DE LA ALTITUD SOBRE LOS RENDIMIENTOS.

Por ejemplo una turbina de gas instalada a 1500 mts. de altura SNM disminuye su potencia un 17%, su consumo específico no cambia.

La temperatura ambiente influye sobre la potencia y el consumo específico como lo indican las curvas de la Fig. 3.1.6.

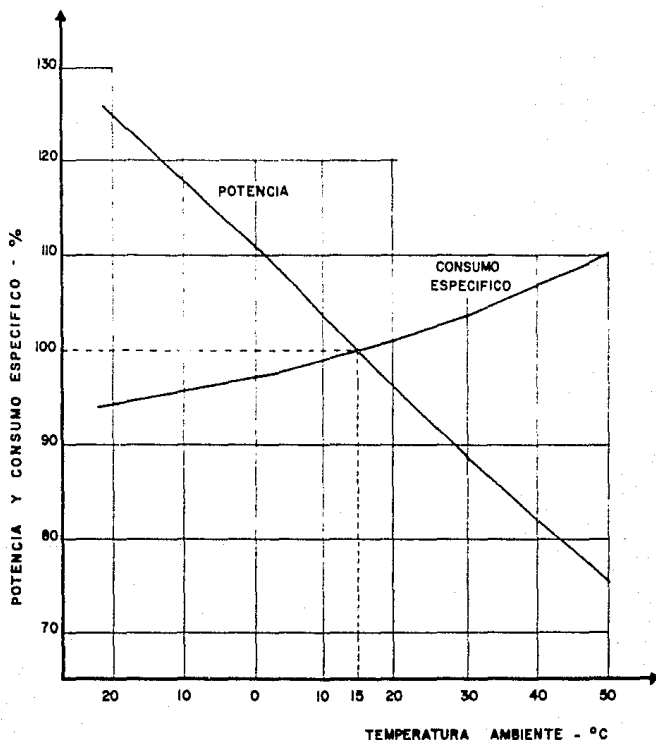


FIG. 3.1.6 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE LA POTENCIA Y EL CONSUMO ESPECIFICO DE LA TURBINA DE GAS.

Influencia Sobre la Caldera de Recuperación.

La curva de la Fig. 3.1.5 muestra que el gasto de vapor disminuye con la altura como la potencia de la turbina de gas. En realidad como el funcionamiento es a presión variable según la carga, esta bajará un poco y en consecuencia la temperatura de sobrecalentamiento también.

El aumento de la temperatura ambiente provoca un aumento en la temperatura de los gases y una disminución de su gasto. Fig. 3.1.7.

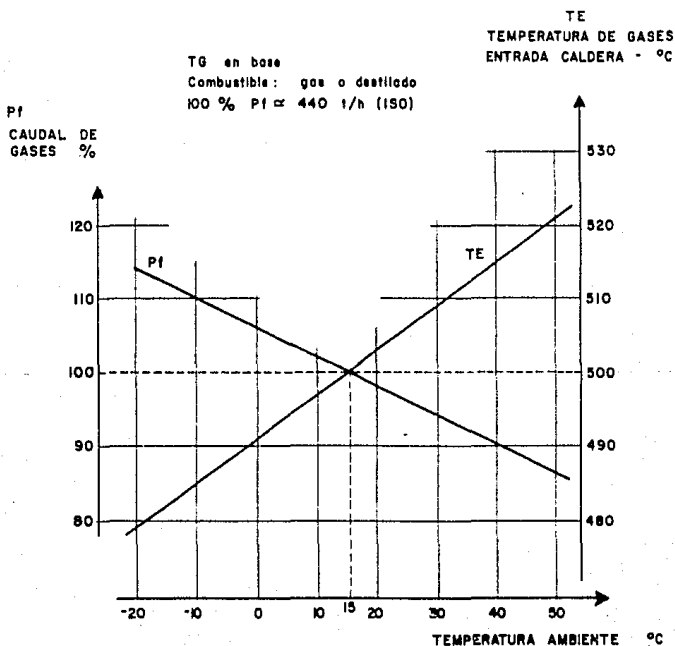


FIG. 3.1.7 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE EL GASTO Y LA TEMPERATURA DE GASES.

Y las curvas de la Fig. 3.1.8 resumen las variaciones en función de la temperatura ambiente de:

- El gasto del vapor.
- Presión del vapor.
- Temperatura del vapor sobrecalentado.

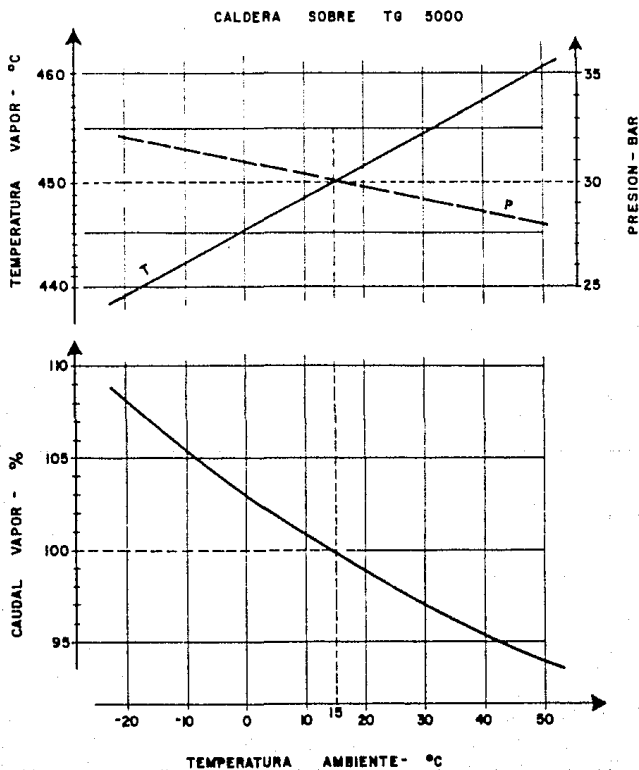


FIG.3.1.8 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE LAS CARACTERISTICAS DEL VAPOR.

Influencia sobre la turbina de vapor.

La turbina de vapor sufre en cierto modo las variaciones de las características del vapor entregado por la caldera y por la otra de las provenientes del agua de refrigeración del condensador. Las curvas que se muestran en la Fig. 3.1.9 indican esta influencia en las siguientes dos situaciones:

- El condensador está refrigerado por agua que está sensiblemente a temperatura constante (agua de mar por ejemplo).
- El condensador se enfría por aire ya sea en torre húmeda o seca.

— (a) ENFRIAMIENTO POR AGUA DE MAR
- - - (b) AEROCONDENSADOR

NOTA : La potencia de la TV cambia consecuentemente con las variaciones de las características del vapor y de la temperatura de la fuente fría.

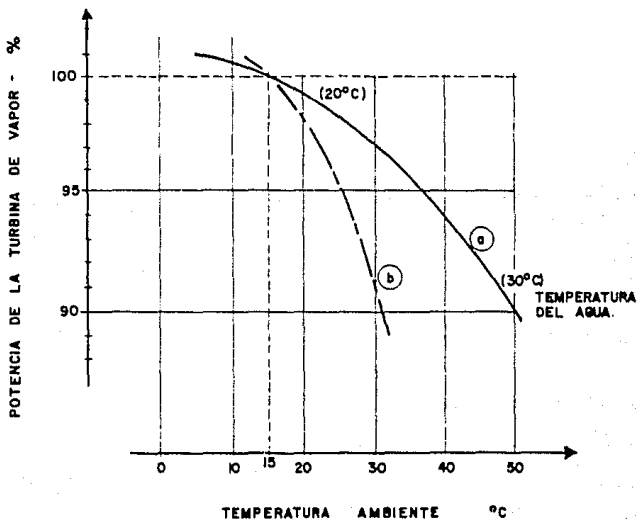


FIG. 3.1.9 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE LA POTENCIA DE LA TURBINA DE VAPOR.

La curva de la Fig. 3.1.5 nos muestra también la influencia de la temperatura ambiente sobre la turbina de vapor cuando se utiliza aerocondensador.

Con el fin de ayudarnos a elegir el tipo de refrigeración del condensador podemos referirnos a las Fig. 3.1.10 y 3.1.11, las cuales muestran el vacío que podría ser obtenido.

TORRES SECAS O AEROCONDENSADOR

(SITIOS SIN AGUA)

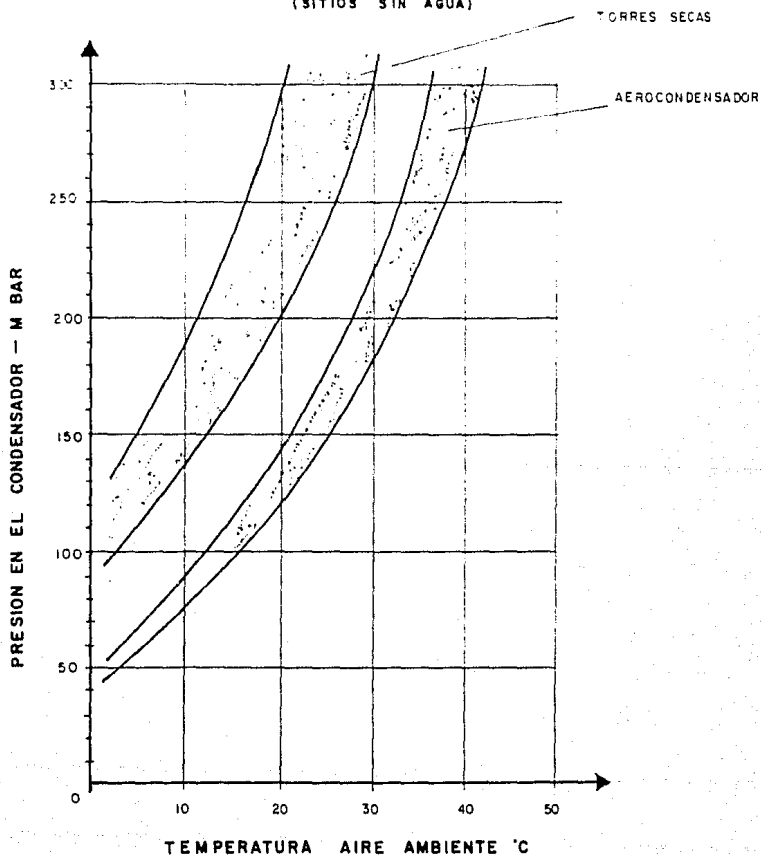


FIG. 3.1.10. PRESION EN EL CONDENSADOR EN FUNCION DE LA TEMPERATURA AMBIENTE.

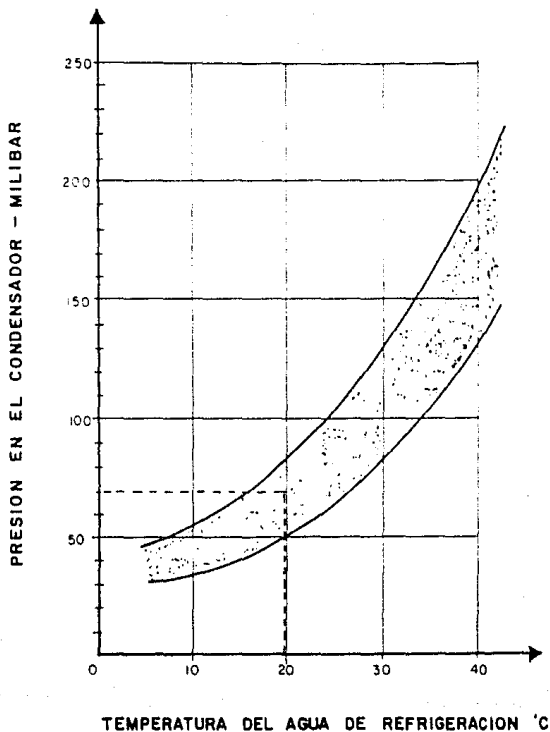


FIG. 3.1.II. PRESION EN EL CONDENSADOR EN FUNCION DE LA TEMPERATURA DEL AGUA DE REFRIGERACION.

- En función de la temperatura ambiente en el caso de torre seca o de aerocondensador. Fig. 3.1.10

- En función de la temperatura del aire húmedo en el caso de la torre húmeda. Fig. 3.1.12

- Y También en función de la temperatura del agua de refrigeración en caso de que sea tomada de un río o el mar. Fig. 3.1.11

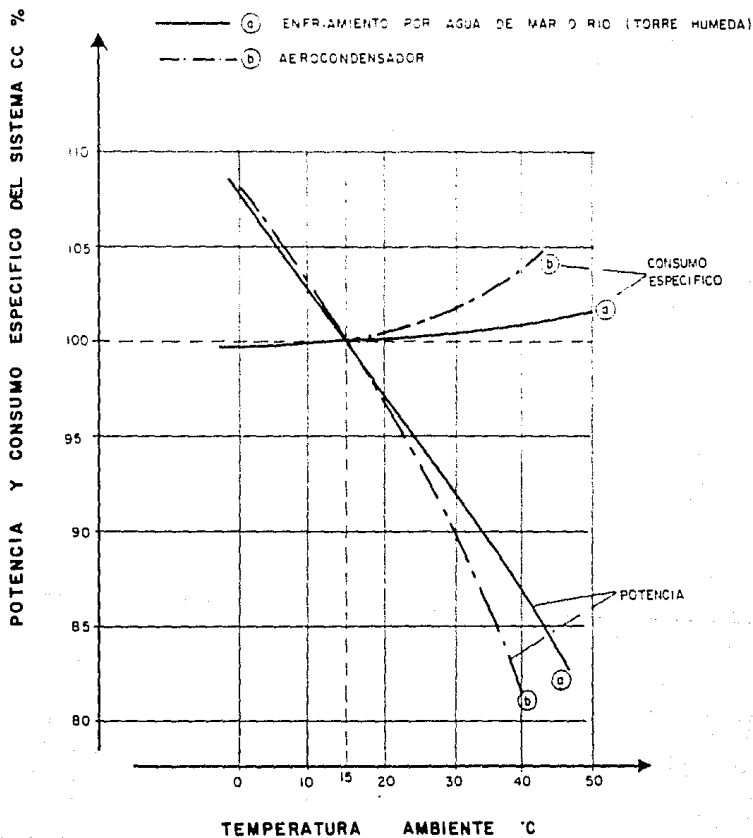


FIG. 3.1.12. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE LOS RENDIMIENTOS DEL SISTEMA.

POTENCIA Y CONSUMO ESPECIFICO DEL SISTEMA CC

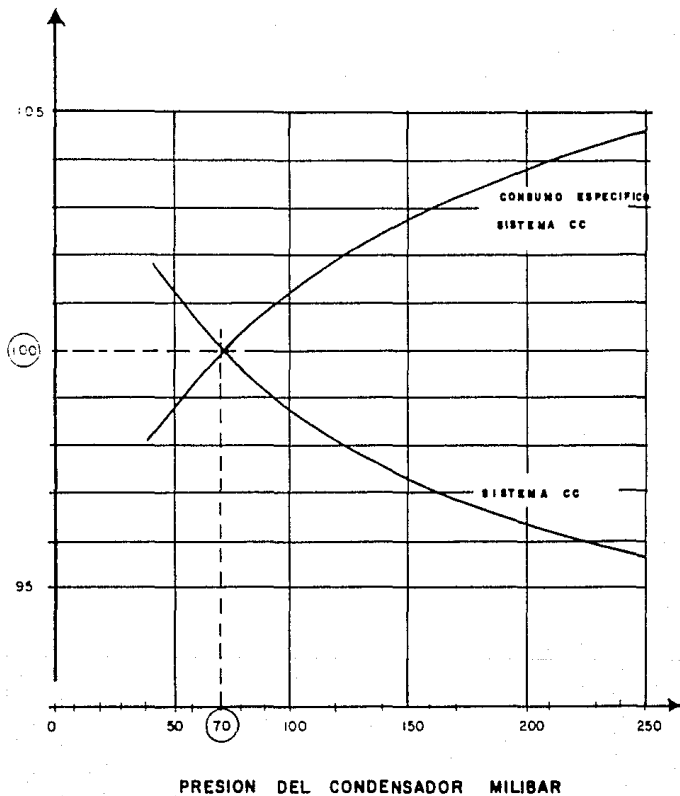


FIG. 3.1.13. RENDIMIENTOS DEL SISTEMA CC EN FUNCION DE LA PRESION EN EL CONDENSADOR.

Influencia sobre el Conjunto Completo de Ciclo Combinado.

La potencia y el consumo del ciclo combinado depende de los rendimientos de los ciclos de vapor y de gas.

Las curvas de la Fig. 3.1.12 dan las variaciones de la potencia y del consumo específico del ciclo combinado en función de la temperatura ambiente. Estas curvas demuestran que un mucho mejor vacío y con poca variación se logra con una buena fuente fría y estable como el agua de mar o río y un no tan buen vacío se produce mediante una fuente fría inestable como el aire. (Aerocondensador o torre seca). La influencia de la altura está dada por la curva de la Fig. 3.1.5.

Las curvas de la Fig. 3.1.13, nos muestran la influencia de la presión del condensador sobre la potencia y consumo específico del ciclo combinado.

Arranque del Ciclo Combinado.

El arranque normal completo de este sistema se desarrolla de la manera siguiente a partir del estado frío.

- Arranque de la primera TG.
- Desviar gases de la primera TG sobre su caldera.
- Poner en marcha bombas de vaco del condensador.
- Calentamiento de la primera caldera.
- Arranque de la segunda TG y su correspondiente calentamiento de caldera, si se desea porque con el calor, producido por una sola TG, es suficiente para que la TV funcione.
- Calentamiento de tubería de vapor.
- Alimentación de laberintos de la TV.
- Acoplamiento y sincronización de la primera TG.
- Desvío del vapor de la primera caldera hacia el condensador.
- Sincronización de la segunda TG.
- Arranque de la TV.

- Aumento de presión según el régimen escogido.
- Calentamiento de la segunda caldera y sus tuberías.
- Vapor de la segunda caldera al condensador.
- Sincronización y carga de la TV.
- Válvula de admisión de la TV. Se abre según la carga.
- Se cierra el desvío de vapor al condensador de ambas calderas.
- El sistema alcanza su plena carga.

El tiempo de esta secuencia puede variar según la temperatura del sistema que puede encontrarse frío, tibia ó caliente. según se muestra en la Fig. 3.1.14, pero en ningún caso se exceden de 30 minutos para alcanzar los 2/3 de la carga.

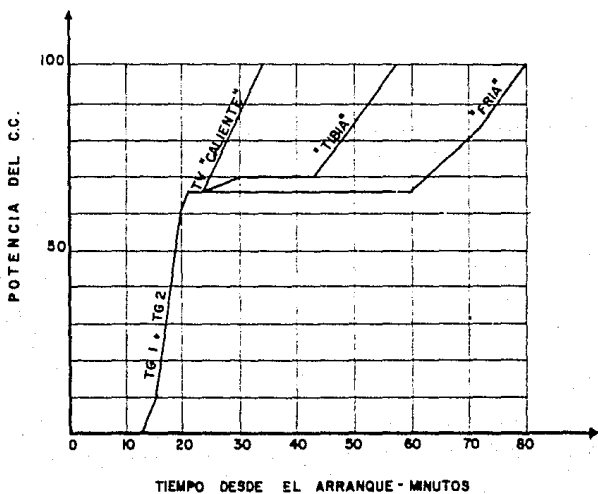


FIG. 3.14. TIEMPO DE TOMA DE CARGA DEL SISTEMA C.C.

El estudio concierne a la instalación de los elementos principales a saber:

- Las dos TG.
- Las dos calderas de recuperación.
- La turbina de vapor.
- El equipo de agua.
- El equipo de control y comando.

Esto deberá tener en cuenta los siguientes puntos importantes.

- Provisión de combustible.
- Salidas de los circuitos eléctricos.
- Provisión del agua de refrigeración del condensador.
- Acceso, desmontaje y mantenimiento.
- Superficie ocupada en planta.
- Instalación en edificio o al aire libre.

Debe contemplarse el funcionamiento en ciclo simple e ir escalonando según la carga. La optimización de una instalación nos sugiere algún número muy limitado de posibles esquemas de entre los cuales podemos ilustrar con la Fig. 3.1.15. Es importante mencionar que estos elementos que se ilustran podrían instalarse en un espacio de 3,000 M² máximo.

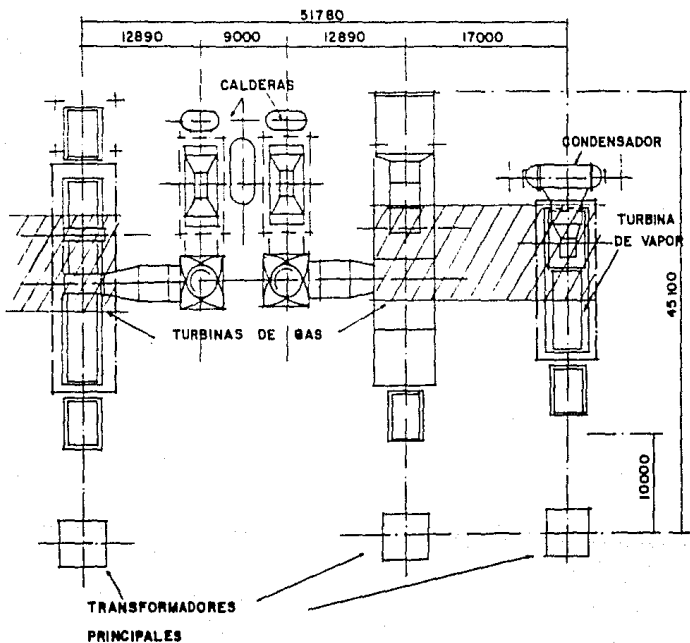


FIG. 3.1.15 INSTALACION TIPICA DEL SISTEMA CC.
(MEDIDAS EN mm.)

4.0 BALANCE TERMICO DEL SISTEMA.

4.1 PARAMETROS DE OPERACION.

Tomar en cuenta las siguientes características, asumidas a los TG existentes en ciclo abierto.

I CARACTERISTICAS ASUMIDAS A LAS TURBINAS DE GAS EXISTENTES OPERANDO EN CICLO ABIERTO

| | |
|---------------------------------------|------------------------|
| Combustible | Gas nat. |
| PCI | 48,500 kJ/kg |
| Velocidad de Rotación | 3,600 RPM |
| Temp. del aire de admisión | 15 °C |
| Caida de presión del aire de admisión | 90 mm H ₂ O |
| Caida de presión al escape | 65 mm H ₂ O |
| Potencia de salida del generador | 25.3 MW |
| Consumo de calor TG por hora. | 327.GJ/h |
| Consumo específico TG. | 12,960 kJ/kWh |
| Temperatura gas de escape TG | 496 °C. |

II. CARACTERISTICAS QUE SE LE ASUMEN A LAS TURBINAS DE GAS EXISTENTES OPERANDO CON EL EQUIPO DE CICLO COMBINADO (cada una).

| | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Caida total de presión al escape | 254 mm H ₂ O |
| Salida de potencia del generador | 24.9 MW |
| Consumo específico | 13.170 kJ/kWh |
| Temp. de gases de escape | 495.3 °C |
| Gasto de gas de escape | 442.5 t/h |

III. CALDERAS DE RECUPERACION. (Cada una).

| | |
|--|-------------------------|
| GVRC. Temp. de gases de admisión | 493.4 °C |
| GVRC. Temp. de gases de salida | 155.4 °C |
| Caida de presión a través del GVRC | 160 mm H ₂ O |
| Presión de vapor sobrecalentado a la salida del GVRC | 31.5 bar abs |
| Temperatura del vapor sobrecalentado | 450 °C |
| Gasto de vapor sobrecalentado | 51.2 t/h |

IV. TURBINA DE VAPOR.

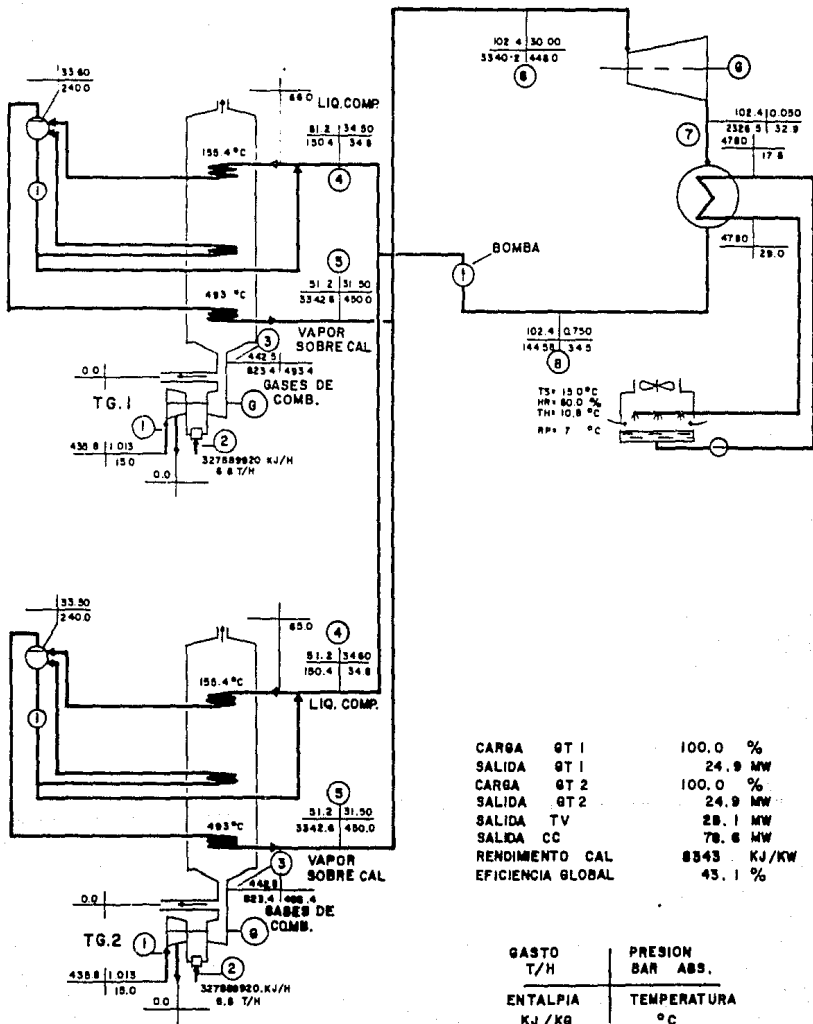
| | |
|--|------------|
| Presión de vapor a la admisión de la TV | 30 bar abs |
| Temperatura del vapor a la admisión | 448 °C |
| Gasto de vapor | 102.4 t/h |
| Presión en el condensador | 50 mbar |
| Velocidad de rotación | 3,600 RPM |
| Potencia a las terminales del generador | 27.1 MW |
| Voltaje | 11 kV |
| Enfriamiento del condensador: | |
| Agua de circulación entrando a un gasto de | 4,780 M /h |
| Y temperatura de | 17.8 °C |

V. RENDIMIENTO DE LA PLANTA.

| | |
|--|--------------|
| Potencia total | 76.9 MW |
| Consumo específico de calor total bruto en (PCI) | 8,530 kJ/kWh |
| Eficiencia total bruta en (PCI) | 42.2% |

NOTAS:

| | |
|-----|--|
| PCI | Poder calorífico inferior del combustible. |
| TG | Turbina de gas |
| TV | Turbina de vapor |



| | | |
|-------------------|------|------------|
| CARGA | GT 1 | 100.0 % |
| SALIDA | GT 1 | 24.9 MW |
| CARGA | GT 2 | 100.0 % |
| SALIDA | GT 2 | 24.9 MW |
| SALIDA | TV | 28.1 MW |
| SALIDA | CC | 78.6 MW |
| RENDIMIENTO CAL | | 8343 KJ/KW |
| EFICIENCIA GLOBAL | | 43.1 % |

| GASTO T/H | PRESION BAR ABS. |
|-------------------|---------------------|
| ENTALPIA KJ/KG | TEMPERATURA °C |

FIG. 4.1.1 BALANCE TERMICO DEL SISTEMA C.C.

4.2 BALANCE TERMICO SECUENCIA DE CALCULOS.

A partir del diagrama 4.1.1 podemos ver que las TG en ciclo simple manejan 435.8 t/h de aire a 1.013 bar y 15 °C en el punto 1. En el punto 2 se le van a agregar 6.8 t/h de gas combustible y en consecuencia 327'889,920 kJ/h de calor. En el punto 3, tendremos un total de masa de gas de 442.5 t/h a una entalpia de 823 kJ/kg a 493.4 °C. aqui termina el ciclo simple de la TG logrando un consumo de calor de :

$$\text{Rendimiento calorífico (RC)} = \frac{327,889,9}{24,9}$$

$$\text{RC} = 13,168,26 \text{ kJ/kW/hr}$$

Se puede apreciar que los gases en el punto 3 abandonan la TG con un considerable contenido de energia todavia por tanto ingresarán al generador de vapor con el fin de obtener potencia adicional de esta energia excedente. En el punto 4, el más frio del recuperador, ingresaremos 51.2 T/h de condensados provenientes de la TV a 34.5 bar, 34.8 °C y entalpia de 150.4 kJ/kg; de las tablas A8 del apéndice No. 1 para agua como liquido saturado podemos determinar la h a partir de la temperatura. En el punto 5, el más caliente de la caldera tendremos que las 51.2 t/h de agua, se han convertido en vapor sobrecalentado a 450 °C, y 31.5 bar de presión la entalpia de 3,342.6 kJ/kg y la presión, de las tablas A7 para P = 3.00 MPa. A este punto el vapor está en condiciones de impulsar a la TV, misma que podrá manejar el doble de esta cantidad de vapor ya que se trata de dos TG's equipadas con su respectiva caldera, en el punto 6 se une el producto de las dos calderas sumando 102.4 t/h de flujo de masa a 30.00 bar (ligera caída de presión por causa de tuberías) y a 448 °C, (ligera caída en la temperatura también debido a lo mismo). Podemos asumir una h = 3,340.2 kJ/kg de las tablas A7. Al escape de la turbina de vapor, y antes del condensador tendremos un decremento en la entalpia y en la temperatura de h = 2,326.5 y 32.9°C respectivamente, al bombear el caudal de condensados hacia la caldera nuevamente en el punto 4, sufre un ligero aumento en la temperatura por efectos de energia interna aportada por la bomba de 32.9 °C (salida de turbina a 34.8 °C) y alcanzará una presión después de ser bombeados de 34.5 bar a lo que le corresponderá una entalpia de 150.4 kJ/kg para liquido comprimido según las tablas y aqui se completa el ciclo de vapor a condensación.

BALANCE DE ENERGIA.

Se derivará de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} + \sum_i \dot{m}_i \left[\frac{1}{2} V_i^2 + g z_i + h_i \right] = \dot{Q}' + \sum_o \dot{m}_o \left[\frac{1}{2} V_o^2 + g z_o + h_o \right]$$

donde:

V^2 = Energía Cinética por Unidad de Masa

$g z$ = Energía Potencial por Unidad de Masa

h = Entalpía por Unidad de Masa.

i = Entrada

o = Salida

Despejando y escogiendo sólo los elementos importantes del balance.

$$\dot{Q} + \dot{m}_i h_i = \dot{Q}' + \dot{m}_o h_o$$

1) GENERADOR DE VAPOR. - GVRC (Suministro de Calor).

Q = Calor recibido

$$Q + m h_i = m h_o$$

$$Q = m(h_o - h_i) = (51.2 \text{ t/h}) (3342.6 - 150.4) \text{ Kj/Kg}$$

$$= 163440 \text{ Kj/Kg} \left(\frac{1000}{3600} \right) = \text{kW/hr.}$$

$$= 45399 \text{ kW/h}$$

o sea que el calor transferido al flujo de masa en el GVRC

$$Q = m_i(h_o - h_i) \times 2$$

por tratarse de 2 calderas GVRC serían

$$326880 \text{ Kj/Kg ó}$$

$$90799.97 \text{ kW/hr.}$$

2) TURBINA DE VAPOR. (Potencia)

Para determinar la potencia que genera partimos de la misma base

$$\dot{m}h_{11} = \dot{W} + \dot{m}h_{22}$$

Despejando

$$W = m(h_{11} - h_{22}) = 102.4 (3340.2 - 2326.5) \frac{(1000)}{3600} \text{ kW}$$

$$+ 103802 \frac{(1000)}{3600} = 28.883 = 28.8 \text{ MW}$$

3) CONDENSADOR (calor rechazado)

$$Q = mh_2 = \dot{m}h_{22} \text{ o sea}$$

$$Q = m(h_{22} - h_f) = 102.4 (150.4 - 2326.5) \text{ Kj/Kg}$$

$$Q = 102.4 \times -2176.1$$

$$Q = 222832 \text{ Kj/Kg o } "$$

$$Q = 222832 \times \frac{1000}{3600} = -60164 \text{ kW/hr.}$$

4) BOMBA (Trabajo Aportado)

$$\text{A partir de: } \dot{m}h_1 = \dot{W} + \dot{m}h_{22}$$

$$\dot{W} = \dot{m} (h_{22} - h_1)$$

Para este punto en particular, podríamos determinar la h con la ayuda de las tablas de vapor; sin embargo el rango de dichas tablas no abarca hasta un líquido a tan baja presión (0.750 bar) por lo que nos referimos a los valores de líquido saturado como sigue:

Condiciones Disponibles

$$T = 34.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$P = 0.750 \text{ bar}$$

$$m = 102.4 \text{ t/hr}$$

hay que interpolar a partir de:

$$\text{a } 30^{\circ}\text{C} \quad 125.78 = h$$

$$\text{a } 35^{\circ}\text{C} \quad 146.67 = h$$

Para $34.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ nos corresponde una $h = 144.58 \text{ kJ/kg}$ que consideramos muy buena aproximación para la substancia de trabajo en este paso.

$$W = 102.4 (144.58 - 150.4) = 595.96 \text{ KJ/Kg}$$

$$\frac{595.96 \times 1000}{3600} = 160.90 \text{ KW/hr}$$

5) EFICIENCIA DEL CICLO DE VAPOR:

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q} \quad 100$$

$$\eta = \frac{W + W}{Q} \quad 100$$

$$\eta = \frac{28800 - 160.9}{90799.97} \quad 100$$

$$\eta_{\text{h}} = 31.54 \%$$

EFICIENCIA TOTAL DEL CICLO COMBINADO

$$\eta = \frac{28.800 - (24900 \times 2) - 160.9}{327889.920 \times 2} \times \frac{1000}{3600} \quad 100$$

$$\eta = \frac{78.43}{181651}$$

$$\eta = 43.1\%$$

5.0 EVALUACION ECONOMICA.

Las decisiones de inversión son tan importantes para una empresa en particular, como para la economía en conjunto. Las variaciones que existan en las inversiones que hagan los negocios en planta y equipo, generalmente se consideran como uno de los factores decisivos que causan oscilaciones en la actividad general de los negocios.

Muy frecuentemente las decisiones de inversión se toman bajo un marco de pesimismo oscuro, o bien de un optimismo desatinado. Las decisiones de inversión deben tomarse haciendo una evaluación concienzuda de los beneficios a largo plazo. Cuando una inversión implica un riesgo mucho mayor del que caracteriza a la empresa, necesitamos hacer una serie de ajustes adicionales que no se consideraba prudente cuando se comenta acerca de inversiones en activos circulantes.

El principio sobre el que descansan las decisiones de inversión es que el dinero tiene un valor en el tiempo.

Mediante este estudio demostraremos que la decisión de invertir en la conversión de la planta generadora de energía eléctrica con turbogeneradores de gas en ciclo abierto a una planta de generación de energía eléctrica con ciclo combinado, es conveniente.

Existen diversos métodos para evaluar proyectos de inversión. Consideraremos en primer término los dos procedimientos que emplean el valor del dinero en el tiempo: Valor Presente Neto (VPN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).

5.1 DEFINICIONES.-

Valor Presente Neto.

El cálculo del Valor Presente Neto (VPN) de los proyectos, es una de las técnicas elaboradas de presupuestación de capital más comúnmente utilizadas. El VPN se define como: $VPN = \text{Valor presente de las entradas de efectivo/inversión final}$

Dicho de otra forma, es el trasladar el dinero de años futuros a una tasa de interés al punto donde puedan ser comparativos en el tiempo.

También se interpreta como el valor presente de las entradas de efectivo o flujos menos la inversión inicial. Dicho valor se obtiene al restar la inversión inicial en un proyecto del valor presente de los flujos de efectivo descontados a una tasa igual al costo de capital de la empresa, siendo el costo de capital la tasa de uso del dinero para satisfacer los deseos de una utilidad.

El razonamiento a seguir en la toma de decisión de aceptación o rechazo es el siguiente: si el VPN es mayor o igual a 0 se acepta el proyecto, de lo contrario se rechaza. Esto quiere decir que si esto se cumple, la empresa obtendrá un rendimiento mayor de su costo de capital requerido o igual a éste.

La fórmula del VPN es:

$$VPN = \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} - C \quad \text{donde:}$$

S_t = Flujos o entradas

C = Inversión inicial

i = Interés del costo de capital

t = Períodos que dura el proyecto.

Tasa Interna de Retorno.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es quizá la técnica más empleada para evaluar las alternativas de inversión, pero es considerablemente más difícil de calcular que el VPN. La TIR se define como la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de efectivo con la inversión inicial asociada a un proyecto.

Esto significa que la TIR es una tasa de descuento que iguala a cero el VPN de una oportunidad de inversión, puesto que el valor presente de los flujos de efectivo es igual a la inversión inicial.

El criterio que se sigue en la toma de decisiones de aceptación o rechazo es el siguiente: Si la TIR es mayor a la tasa de capital, se acepta el proyecto, de lo contrario se rechaza. Con el objeto de que un proyecto sea aceptable, la TIR debe ser superior o por lo menos igual al costo del capital bancario. Esto garantiza que la empresa ganará más del rendimiento requerido, por tanto, tenemos las siguientes consideraciones:

$$VPN = 0 = \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} - C \quad \text{donde}$$

S_t = Flujos o entradas

i = TIR

t = número de períodos del proyecto.

5.2 ANALISIS ECONOMICO FINANCIERO.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el estudio consiste en analizar la rentabilidad de la decisión de invertir en la conversión a ciclo combinado de una central ya existente que se compone de dos turbinas de gas que operan en ciclo abierto.

Se cuenta con 2 turbogeneradores a gas con potencia nominal de 25.3 MW cada uno, para lo cual se requiere de un turbogenerador de vapor con potencia de placa de 28.0 MW. La inversión contempla todo lo requerido para realizar esta conversión a ciclo combinado, excluyendo lógicamente los equipos y todo lo concerniente a las turbinas de gas a ciclo abierto.

| | |
|--|---------|
| - Potencia del turbogenerador a gas en ciclo abierto | 25.3 MW |
| - Potencia del turbogenerador a gas en ciclo combinado | 24.9 MW |
| - Potencia del turbogenerador a vapor | 29.1 MW |
| - Factor de consumo interior (% de MW del Turbo Vapor) | 5% |
| - Potencia real adicional del ciclo combinado | 27.0 |
| - Costo de operación y mantenimiento (% de la inversión del ciclo combinado a una utilización de 6000 hrs. anuales): | |
| Operación: | 9% |
| Mantenimiento: | 1% |
| - Reposición del equipo (años de vida) | 20 |
| - Costo real del dinero (% anual) | 5% |

Inversión inicial = 24.3 MM USD

El precio real actual del kW es 0.060 USD. Cuando es entregada en alta tensión (11 KV) lo cual es la tarifa que se adecúa a nuestro caso (Según C.F.E.).

Con lo anterior podríamos comentar que en esta máquina que no utiliza combustible como materia prima y que es precisamente lo más costoso en el negocio de la generación termoeléctrica, la recuperación económica de la inversión que se tendría que hacer para realizar esta conversión se deberá llevar a cabo en un plazo relativamente corto. Para ilustrar lo anterior correremos a continuación 10 panoramas simulados a saber: Del I al V se basarán en el criterio de recuperar la inversión por medio de comercializar el producto adicional de la conversión. Las variables del proyecto I plantean un panorama optimista a un precio real actual de 0.06 USD/kW operando 6000 h/año a una confiabilidad del 100%, lo que nos conducirá a una cobertura total de esta inversión al 4o. año de operación, y así iremos variando hasta panoramas pesimistas como el ilustrado en la tabla IV donde suponemos una reducción en el precio del kW/hr a 0.05 USD, un alto costo de la inversión inicial debido a imprevistos, pocas horas de utilización al año y una confiabilidad del 80%, lo que nos daría como resultado 8 años para recuperar la inversión.

EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO I

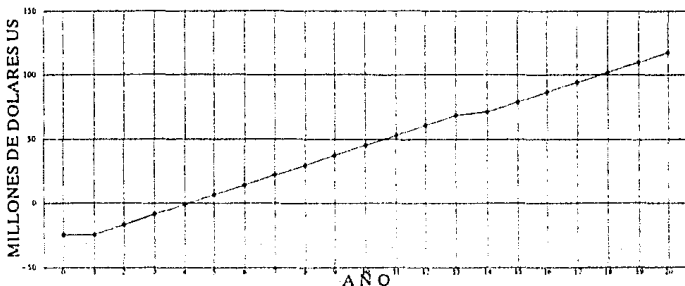
| | | | | | |
|--------------------------|-----------|---------|------------------------------|--------|--------|
| Potencia Adicional | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 6.000 | Costo de Operacion (Anual) | USD MM | \$0.25 |
| Precio por KiloWatt-Hora | USD/KWH | \$0.06 | Costo de Manto Menor (Anual) | USD MM | \$1.00 |
| Inversion Adicional | USD MM | \$24.30 | Costo de Manto Mayor | USD MM | \$5.00 |
| Confiabilityd | % | 100% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80.000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|------------|-----------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto | Acumulado |
| 0 | \$24.30 | | | | (\$24.30) | (\$24.30) |
| 1 | | | | | \$0.00 | (\$24.30) |
| 2 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | (\$16.57) |
| 3 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | (\$8.84) |
| 4 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | (\$1.11) |
| 5 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$6.61 |
| 6 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$14.34 |
| 7 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$22.07 |
| 8 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$29.80 |
| 9 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$37.53 |
| 10 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$45.26 |
| 11 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$52.98 |
| 12 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$60.71 |
| 13 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$68.44 |
| 14 | | \$8.98 | \$0.25 | \$6.00 | \$2.73 | \$71.17 |
| 15 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$78.90 |
| 16 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$86.63 |
| 17 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$94.35 |
| 18 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$102.08 |
| 19 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$109.81 |
| 20 | | \$8.98 | \$0.25 | \$1.00 | \$7.73 | \$117.54 |

VALOR PRESENTE NETO **\$59.17**

TASA INTERNA DE RETORNO **24.87%**

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO II

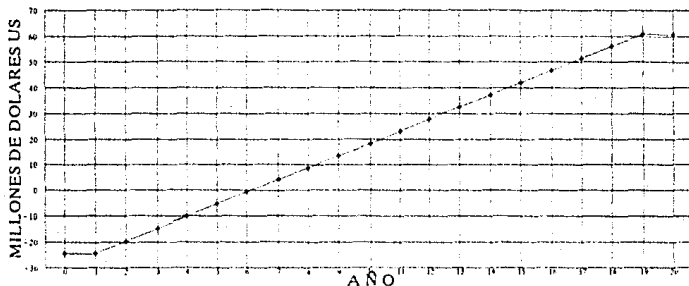
| | | | | | |
|--------------------------|-----------|---------|------------------------------|--------|--------|
| Potencia Adicional | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 4.000 | Costo de Operacion (Anual) | USD MM | \$0.25 |
| Precio por KiloWatt-Hora | USD/KWH | \$0.06 | Costo de Manto Menor (Anual) | USD MM | \$1.00 |
| Inversion Adicional | USD MM | \$24.30 | Costo de Manto Mayor | USD MM | \$5.00 |
| Confiability | % | 100% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80.000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|------------|-----------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto | Acumulado |
| 0 | \$24.30 | | | | (\$24.30) | (\$24.30) |
| 1 | | | | | \$0.00 | \$0.00 |
| 2 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | (\$19.56) |
| 3 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | (\$14.83) |
| 4 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | (\$10.09) |
| 5 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | (\$5.36) |
| 6 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | (\$0.62) |
| 7 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$4.11 |
| 8 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$8.85 |
| 9 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$13.58 |
| 10 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$18.32 |
| 11 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$23.06 |
| 12 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$27.79 |
| 13 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$32.53 |
| 14 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$37.26 |
| 15 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$42.00 |
| 16 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$46.73 |
| 17 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$51.47 |
| 18 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$56.21 |
| 19 | | \$5.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$4.74 | \$60.94 |
| 20 | | \$5.99 | \$0.25 | \$6.00 | (\$0.26) | \$60.68 |

VALOR PRESENTE NETO **\$26.97**

TASA INTERNA DE RETORNO **15.61%**

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO III

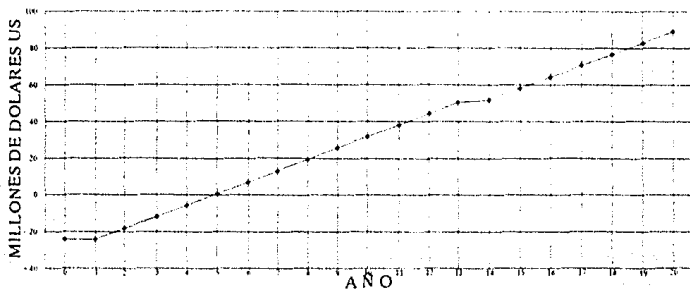
| | | | | | |
|--------------------------|-----------|---------|------------------------------|--------|--------|
| Potencia Adicional | MW | 24 94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 6.000 | Costo de Operacion (Anual) | USD MM | \$0 25 |
| Precio por KiloWatt-Hora | USD/KWH | \$0 05 | Costo de Manto Menor (Anual) | USD MM | \$1 00 |
| Inversion Adicional | USD MM | \$24 30 | Costo de Manto Mayor | USD MM | \$5 00 |
| Confiabilidad | % | 100% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80,000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|------------|-----------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto | Acumulado |
| 0 | \$24 30 | | | | | |
| 1 | | | | | (\$24 30) | (\$24 30) |
| 2 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | (\$18 07) |
| 3 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | (\$11 84) |
| 4 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | (\$5 60) |
| 5 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$0 63 |
| 6 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$6 86 |
| 7 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$13 09 |
| 8 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$19 32 |
| 9 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$25 56 |
| 10 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$31 79 |
| 11 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$38 02 |
| 12 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$44 25 |
| 13 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$50 48 |
| 14 | | \$7 48 | \$0 25 | \$6 00 | \$1 23 | \$51 72 |
| 15 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$57 95 |
| 16 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$64 18 |
| 17 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$70 41 |
| 18 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$76 64 |
| 19 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$82 88 |
| 20 | | \$7 48 | \$0 25 | \$1 00 | \$6 23 | \$89 11 |

VALOR PRESENTE NETO \$42.77

TASA INTERNA DE RETORNO 20.36%

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO IV

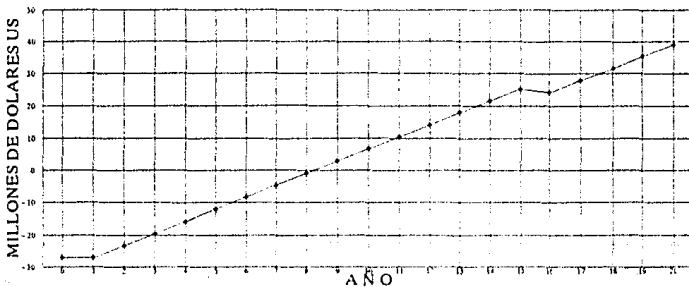
| | | | | | |
|--------------------------|-----------|---------|------------------------------|--------|--------|
| Potencia Adicional | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 5.000 | Costo de Operacion (Anual) | USD MM | \$0.25 |
| Precio por KiloWatt-Hora | USD/KWH | \$0.05 | Costo de Manto Menor (Anual) | USD MM | \$1.00 |
| Inversion Adicional | USD MM | \$27.00 | Costo de Manto Mayor | USD MM | \$5.00 |
| Confiability | % | 80% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80.000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | Flujo Neto Acumulado |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|------------|----------------------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto | |
| 0 | \$27.00 | | | | | (\$27.00) |
| 1 | | | | | | \$0.00 (\$27.00) |
| 2 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | (\$23.26) |
| 3 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | (\$19.52) |
| 4 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | (\$15.79) |
| 5 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | (\$12.05) |
| 6 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | (\$8.31) |
| 7 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | (\$4.57) |
| 8 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | (\$0.83) |
| 9 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$2.90 |
| 10 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$6.64 |
| 11 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$10.38 |
| 12 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$14.12 |
| 13 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$17.86 |
| 14 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$21.59 |
| 15 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$25.33 |
| 16 | | \$4.99 | \$0.25 | \$6.00 | (\$1.26) | \$24.07 |
| 17 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$27.81 |
| 18 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$31.55 |
| 19 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$35.28 |
| 20 | | \$4.99 | \$0.25 | \$1.00 | \$3.74 | \$39.02 |

VALOR PRESENTE NETO **\$13.08**

TASA INTERNA DE RETORNO **10.17%**

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO V

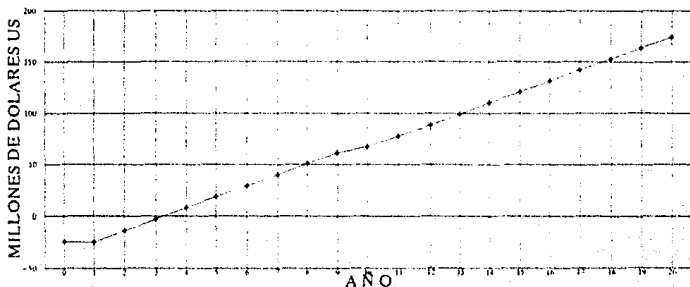
| | | | | | |
|--------------------------|-----------|---------|------------------------------|--------|--------|
| Potencia Adicional | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 8.000 | Costo de Operacion (Anual) | USD MM | \$0.25 |
| Precio por KiloWatt-Hora | USD/KWH | \$0.06 | Costo de Manto Menor (Anual) | USD MM | \$1.00 |
| Inversion Adicional | USD MM | \$24.30 | Costo de Manto Mayor | USD MM | \$5.00 |
| Confiabilidad | % | 100% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80.000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | |
|-----|-----------------|---------|-----------|--------|------------|-----------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto | Acumulado |
| 0 | \$24.30 | | | | (\$24.30) | (\$24.30) |
| 1 | | | | | \$0.00 | (\$24.30) |
| 2 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | (\$13.58) |
| 3 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | (\$2.86) |
| 4 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$7.86 |
| 5 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$18.58 |
| 6 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$29.31 |
| 7 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$40.03 |
| 8 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$50.75 |
| 9 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$61.47 |
| 10 | | \$11.97 | \$0.25 | \$6.00 | \$5.72 | \$67.19 |
| 11 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$77.91 |
| 12 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$88.63 |
| 13 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$99.35 |
| 14 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$110.08 |
| 15 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$120.80 |
| 16 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$131.52 |
| 17 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$142.24 |
| 18 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$152.96 |
| 19 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$163.68 |
| 20 | | \$11.97 | \$0.25 | \$1.00 | \$10.72 | \$174.40 |

VALOR PRESENTE NETO \$91.46

TASA INTERNA DE RETORNO 32.70%

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



Así también desde otro punto de vista, es decir otro criterio, podríamos analizar la costeabilidad. A continuación ilustraremos mediante las tablas variables de la VI a la X, panoramas basados en lo que significaría el ahorro en combustibles para recuperar la inversión. El primer ejemplo de este tipo simula una situación donde se produce la carga base de la conversión de 24.94 MW durante 6000 hr/año ahorrando combustible a razón de 0.04 USD/kW (precio del gas combustible según CFE). Es importante notar que en estos ejemplos consideramos la alternativa de instalar otra turbina de gas para cubrir los 24.34 MW, que mencionamos, este equipo sería mucho más barato que la conversión a ciclo combinado a razón de 8.7 MM USD por eso es que presentamos una inversión diferencial de 18.3 MM USD para la conversión a ciclo combinado solamente, también los costos de operación y mantenimiento bajarán considerablemente, pero el gasto de combustible subirá de 0 a $0.04 \times 25000/\text{hr}$ con relación a la conversión. Al igual que en los 5 primeros ejemplos, impondremos variables desde las más ideales que permitirían recuperar la inversión en tres años y medio como la tabla X hasta las más adversas, que la recuperarían en casi 10 años como en la tabla IX

EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO VI

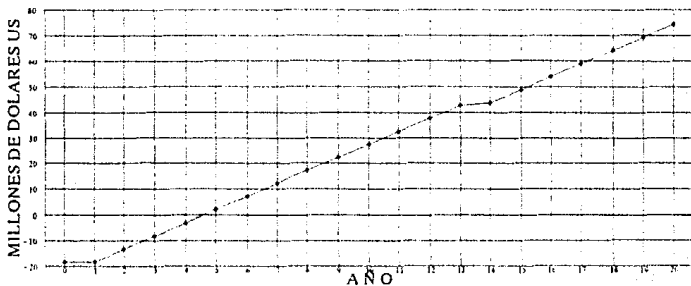
| | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------|-------------------------------------|--------|--------|
| Potencia Equivalente | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 6.000 | C. de Operacion Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.20 |
| Ahorro en Comb / KWH | USD/KWH | \$0.04 | C. Manto Menor Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.70 |
| Inversion Diferencial (V/G) | USD MM | \$18.30 | C. Manto Mayor Diferencial | USD MM | \$4.00 |
| Confiabilidad | % | 100% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80.000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|------------|-----------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto | Acumulado |
| 0 | \$18.30 | | | | | |
| 1 | | | | | (\$18.30) | (\$18.30) |
| 2 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | (\$13.21) |
| 3 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | (\$8.13) |
| 4 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | (\$3.04) |
| 5 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$2.04 |
| 6 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$7.13 |
| 7 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$12.21 |
| 8 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$17.30 |
| 9 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$22.38 |
| 10 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$27.47 |
| 11 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$32.56 |
| 12 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$37.64 |
| 13 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$42.73 |
| 14 | | \$5.99 | \$0.20 | \$4.70 | \$1.09 | \$43.81 |
| 15 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$48.90 |
| 16 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$53.98 |
| 17 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$59.07 |
| 18 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$64.16 |
| 19 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$69.24 |
| 20 | | \$5.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$5.09 | \$74.33 |

VALOR PRESENTE NETO \$36.39

TASA INTERNA DE RETORNO 21.96%

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO VII

| | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------|------------------------------------|--------|--------|
| Potencia Equivalente | MW | 24 94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 4 000 | C de Operacion Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.20 |
| Ahorro en Comb / KWH | USD/KWH | \$0.04 | C Manto Menor Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.70 |
| Inversion Diferencial (V'G) | USD MM | \$18.30 | C Manto Mayor Diferencial | USD MM | \$4.00 |
| Contabilidad | % | 100% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80,000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|----------------------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto Acumulado |
| 0 | \$18.30 | | | | (\$18.30) |
| 1 | | | | | \$0.00 (\$18.30) |
| 2 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 (\$15.21) |
| 3 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 (\$12.12) |
| 4 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 (\$9.03) |
| 5 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 (\$5.94) |
| 6 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 (\$2.85) |
| 7 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$0.24 |
| 8 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$3.33 |
| 9 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$6.42 |
| 10 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$9.51 |
| 11 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$12.60 |
| 12 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$15.69 |
| 13 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$18.78 |
| 14 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$21.88 |
| 15 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$24.97 |
| 16 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$28.06 |
| 17 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$31.15 |
| 18 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$34.24 |
| 19 | | \$3.99 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.09 \$37.33 |
| 20 | | \$3.99 | \$0.20 | \$4.70 | (\$0.91) \$36.42 |

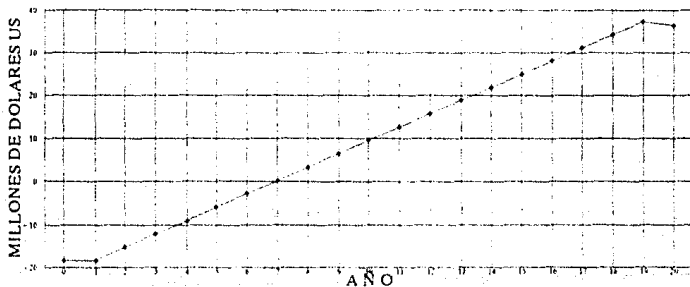
VALOR PRESENTE NETO

\$15.01

TASA INTERNA DE RETORNO

13.27%

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO VIII

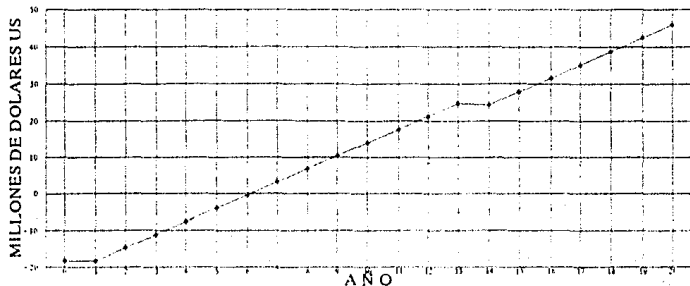
| | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------|------------------------------------|--------|--------|
| Potencia Equivalente | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 6.000 | C de Operacion Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.20 |
| Ahorro en Comb / KWH | USD/KWH | \$0.03 | C Manto Menor Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.70 |
| Inversion Diferencial (V/G) | USD MM | \$18.30 | C Manto Mayor Diferencial | USD MM | \$4.00 |
| Confiabilidad | % | 100% | Mantenimiento Mayo: | HORAS | 80.000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|------------|-----------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto | Acumulado |
| 0 | \$18.30 | | | | (\$18.30) | (\$18.30) |
| 1 | | | | | \$0.00 | (\$18.30) |
| 2 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | (\$14.71) |
| 3 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | (\$11.12) |
| 4 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | (\$7.53) |
| 5 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | (\$3.94) |
| 6 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | (\$0.35) |
| 7 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$3.24 |
| 8 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$6.82 |
| 9 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$10.41 |
| 10 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$14.00 |
| 11 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$17.59 |
| 12 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$21.18 |
| 13 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$24.77 |
| 14 | | \$4.49 | \$0.20 | \$4.70 | (\$0.41) | \$24.36 |
| 15 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$27.95 |
| 16 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$31.54 |
| 17 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$35.13 |
| 18 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$38.72 |
| 19 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$42.31 |
| 20 | | \$4.49 | \$0.20 | \$0.70 | \$3.59 | \$45.89 |

VALOR PRESENTE NETO \$19.99

TASA INTERNA DE RETORNO 15.43%

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA - FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO IX

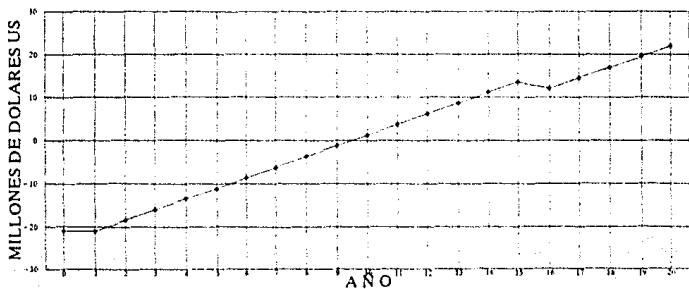
| | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------|------------------------------------|--------|--------|
| Potencia Equivalente | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilización | Horas/Año | 5,000 | C de Operación Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.20 |
| Ahorro en Comb / KWH | USD/KWH | \$0.03 | C Manto Menor Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.70 |
| Inversión Diferencial (V/G) | USD MM | \$21.00 | C Manto Mayor Diferencial | USD MM | \$4.00 |
| Confiabilidad | % | 90% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80,000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|----------------------|---------------------|
| | Inversión | Ventas | Operación | Manto | Flujo Neto (\$21.00) | Acumulado (\$21.00) |
| 0 | \$21.00 | | | | | |
| 1 | | | | | \$0.00 | (\$21.00) |
| 2 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$18.53) |
| 3 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$16.07) |
| 4 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$13.60) |
| 5 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$11.13) |
| 6 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$8.67) |
| 7 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$6.20) |
| 8 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$3.73) |
| 9 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | (\$1.26) |
| 10 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$1.20 |
| 11 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$3.67 |
| 12 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$6.14 |
| 13 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$8.60 |
| 14 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$11.07 |
| 15 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$13.54 |
| 16 | | \$3.37 | \$0.20 | \$4.70 | (\$1.53) | \$12.00 |
| 17 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$14.47 |
| 18 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$16.94 |
| 19 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$19.40 |
| 20 | | \$3.37 | \$0.20 | \$0.70 | \$2.47 | \$21.87 |

VALOR PRESENTE NETO \$5.30

TASA INTERNA DE RETORNO 7.86%

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



EVALUACION ECONOMICA-FINANCIERA DEL CICLO COMBINADO

VARIABLES DEL PROYECTO X

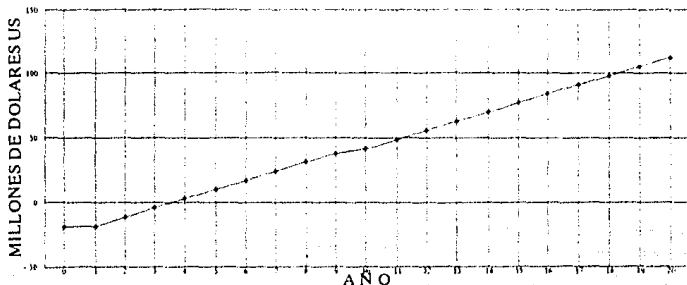
| | | | | | |
|-----------------------------|-----------|---------|------------------------------------|--------|--------|
| Potencia Equivalente | MW | 24.94 | Costo de Capital | % | 5% |
| Nivel de Utilizacion | Horas/Año | 8.000 | C de Operacion Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.20 |
| Ahorro en Comb. / KWH | USD/KWH | \$0.04 | C Manto Menor Diferencial (Anual) | USD MM | \$0.70 |
| Inversion Diferencial (V/G) | USD MM | \$18.30 | C Manto Mayor Diferencial | USD MM | \$4.00 |
| Contabilidad | % | 100% | Mantenimiento Mayor | HORAS | 80,000 |

| AÑO | MILLONES DE USD | | | | |
|-----|-----------------|--------|-----------|--------|----------------------|
| | Inversion | Ventas | Operacion | Manto | Flujo Neto Acumulado |
| 0 | \$18.30 | | | | (\$18.30) |
| 1 | | | | | \$0.00 (\$18.30) |
| 2 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 (\$11.22) |
| 3 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 (\$4.14) |
| 4 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$2.94 |
| 5 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$10.02 |
| 6 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$17.10 |
| 7 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$24.18 |
| 8 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$31.27 |
| 9 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$38.35 |
| 10 | | \$7.98 | \$0.20 | \$4.70 | \$3.08 \$41.43 |
| 11 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$48.51 |
| 12 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$55.59 |
| 13 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$62.67 |
| 14 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$69.75 |
| 15 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$76.83 |
| 16 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$83.91 |
| 17 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$90.99 |
| 18 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$98.07 |
| 19 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$105.15 |
| 20 | | \$7.98 | \$0.20 | \$0.70 | \$7.08 \$112.24 |

VALOR PRESENTE NETO **\$57.85**

TASA INTERNA DE RETORNO **29.22%**

FLUJO DE EFECTIVO ACUMULADO



CONCLUSIONES

Después de la realización de esta Tesis podemos afirmar la viabilidad de la conversión de una planta de turbogeneradores a gas en una planta de ciclo combinado por los siguientes factores:

A) La conversión de turbogeneradores a gas a ciclo abierto desperdicia actualmente los gases de escape que son arrojados al ambiente a una temperatura de 493 C y que estos al colocar el ciclo de vapor propuesto se utilizarían como materia prima, con lo cual no habría un consumo adicional de combustible y la temperatura sería aprovechada haciendo más eficiente el ciclo.

B) La producción actual del ciclo abierto con los dos turbogeneradores a gas es de 24.9 MW cada uno haciendo un total de 49.8 MW trabajando a una eficiencia del 25%. Al hacer la conversión a ciclo combinado aumentamos la producción casi un 50%, en 27.1 y a una eficiencia del 42.2%.

C) En el aspecto económico, la conversión a ciclo combinado es totalmente rentable, pues como se puede ver, el valor de la TIR y del VPN son mayor al 5% en el caso de la TIR que es el costo de capital y mayor a cero en el caso del VPN. Si además consideramos que la planta trabajará 6000 hrs. al año que representan aproximadamente 2 turnos, los 365 días del año. Esta podrá hacerse mucho más rentable trabajando mayor tiempo debido a que estas plantas están diseñadas para trabajar hasta por 100,000 horas de uso continuo sin mantenimiento mayor.

BIBLIOGRAFIA:

- Fundamentos de Administración Financiera
Lawrence J. Gitman Ed. Harper & Row Publisher Inc.
1982.
- Administración Financiera
Robert W. Johnson Ed Harta
1986
- Manual de Ciclo Combinado.
Alstom Ingeniería CTM
1986
- Del Fuego a la Energía Nuclear
Comisión Federal de Electricidad.
México 1989.
- Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión
Raúl Coss Bll.
Editorial Limusa 1992.
- Ingeniería Económica
George A. Taylor
Editorial Limusa 1977
- Fundamentos de Turbinas de Gas
William W. Bathie
Editorial Limusa 1987
- Thermodynamics
William C. Reynolds
Mc Graw- Hill 1968
- Introduction to Thermodynamics
Richard E. Sonntag and Gordon J. Van Wylen
John Wiley & Sons Inc. 1971
- Manuales Técnicos de Ciclos Combinados
de C.T.M. Alstom Ingeniería. FRA.

- **Propuestas Técnico-Económicas para diversos clientes de IBC Turbo Inc. U.S.A.**
- **Propuestas de Proyectos Técnico-Económicos para PEMEX de INTERCOM, S.A.**
- **Tablas Termodinámicas para Vapor y Tablas de Conversión de Unidades, tomadas de Ingeniería Termodinámica 2a. Edición M. David Burghardt Edit Harla.**

Tabla A.5 Vapor de Agua Saturado – Temperatura

| Temp. °C <i>T</i> | Presión kPa <i>P</i> | Volumen específico | | Energía interna | | | Entalpia | | | Entropía | | |
|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | Liq. sat. <i>v_f</i> | Vap. sat. <i>v_g</i> | Liq. sat. <i>u_f</i> | Evap. <i>u_{fg}</i> | Vap. sat. <i>u_g</i> | Liq. sat. <i>h_f</i> | Evap. <i>h_{fg}</i> | Vap. sat. <i>h_g</i> | Liq. sat. <i>s_f</i> | Evap. <i>s_{fg}</i> | Vap. sat. <i>s_g</i> |
| 0.01 | 0.6113 | 0.001 000 | 206.14 | .00 | 2375.3 | 2375.3 | .01 | 2501.3 | 2501.4 | 0.000 | 9.1562 | 9.1562 |
| 5 | 0.8721 | 0.001 000 | 147.12 | 20.97 | 2361.3 | 2382.3 | 20.98 | 2489.6 | 2510.6 | 0.761 | 8.9496 | 9.0257 |
| 10 | 1.2276 | 0.001 000 | 106.38 | 42.00 | 2347.2 | 2389.2 | 42.01 | 2477.7 | 2519.8 | 1.510 | 8.7498 | 8.9008 |
| 15 | 1.7051 | 0.001 001 | 77.93 | 62.99 | 2333.1 | 2396.1 | 62.99 | 2465.9 | 2528.9 | 2.245 | 8.5569 | 8.7814 |
| 20 | 2.339 | 0.001 002 | 57.79 | 83.95 | 2319.0 | 2402.9 | 83.96 | 2454.1 | 2538.1 | 2.966 | 8.3706 | 8.6672 |
| 25 | 3.169 | 0.001 003 | 43.36 | 104.88 | 2304.9 | 2409.8 | 104.89 | 2442.3 | 2547.2 | 3.674 | 8.1905 | 8.5580 |
| 30 | 4.246 | 0.001 004 | 32.89 | 125.78 | 2290.8 | 2416.6 | 125.79 | 2430.5 | 2556.3 | 4.369 | 8.0164 | 8.4533 |
| 35 | 5.628 | 0.001 006 | 25.22 | 146.67 | 2276.7 | 2423.4 | 146.68 | 2418.6 | 2565.3 | 5.053 | 7.8478 | 8.3531 |
| 40 | 7.384 | 0.001 008 | 19.52 | 167.56 | 2262.6 | 2430.1 | 167.57 | 2406.7 | 2574.3 | 5.725 | 7.6845 | 8.2570 |
| 45 | 9.593 | 0.001 010 | 15.26 | 188.44 | 2248.4 | 2436.8 | 188.45 | 2394.8 | 2583.2 | 6.387 | 7.5261 | 8.1648 |
| 50 | 12.349 | 0.001 012 | 12.03 | 209.32 | 2234.2 | 2443.5 | 209.33 | 2382.7 | 2592.1 | 7.038 | 7.3725 | 8.0763 |
| 55 | 15.758 | 0.001 015 | 9.568 | 230.21 | 2219.9 | 2450.1 | 230.23 | 2370.7 | 2600.9 | 7.679 | 7.2234 | 7.9913 |
| 60 | 19.940 | 0.001 017 | 7.671 | 251.11 | 2205.5 | 2456.6 | 251.13 | 2358.5 | 2609.6 | 8.312 | 7.0784 | 7.9096 |
| 65 | 25.03 | 0.001 020 | 6.197 | 272.02 | 2191.1 | 2463.1 | 272.06 | 2346.2 | 2618.3 | 8.935 | 6.9375 | 7.8310 |
| 70 | 31.19 | 0.001 023 | 5.042 | 292.95 | 2176.6 | 2469.6 | 292.98 | 2333.8 | 2626.8 | 9.549 | 6.8004 | 7.7553 |
| 75 | 38.58 | 0.001 026 | 4.131 | 313.90 | 2162.0 | 2475.9 | 313.93 | 2321.4 | 2635.3 | 1.0155 | 6.6669 | 7.6824 |
| 80 | 47.39 | 0.001 029 | 3.407 | 334.86 | 2147.4 | 2482.2 | 334.91 | 2308.8 | 2643.7 | 1.0753 | 6.5369 | 7.6122 |
| 85 | 57.83 | 0.001 033 | 2.828 | 355.84 | 2132.6 | 2488.4 | 355.90 | 2296.0 | 2651.9 | 1.1343 | 6.4102 | 7.5445 |
| 90 | 70.14 | 0.001 036 | 2.361 | 376.85 | 2117.7 | 2494.5 | 376.92 | 2283.2 | 2660.1 | 1.1925 | 6.2866 | 7.4791 |
| 95 | 84.55 | 0.001 040 | 1.982 | 397.88 | 2102.7 | 2500.6 | 397.96 | 2270.2 | 2668.1 | 1.2500 | 6.1659 | 7.4159 |
| MPa | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 0.101 35 | 0.001 044 | 1.6729 | 418.94 | 2087.6 | 2506.5 | 419.04 | 2257.0 | 2676.1 | 1.3069 | 6.0480 | 7.3549 |
| 105 | 0.120 82 | 0.001 048 | 1.4194 | 440.02 | 2072.3 | 2512.4 | 440.15 | 2243.7 | 2683.8 | 1.3630 | 5.9328 | 7.2958 |

Tabla A-5 Vapor de Agua Saturado – Temperatura (continuación)

| MPa | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|-----------|----------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 110 | 0.143 27 | 0.001 052 | 1.2102 | 461.14 | 2057.0 | 2518.1 | 461.30 | 2230.2 | 2691.5 | 1.4185 | 5.8202 | 7.2387 |
| 115 | 0.169 06 | 0.001 056 | 1.0366 | 482.30 | 2041.4 | 2523.7 | 482.48 | 2216.5 | 2699.0 | 1.4734 | 5.7100 | 7.1833 |
| 120 | 0.198 53 | 0.001 060 | 0.8919 | 503.50 | 2025.8 | 2529.3 | 503.71 | 2202.6 | 2706.3 | 1.5276 | 5.6020 | 7.1296 |
| 125 | 0.2321 | 0.001 065 | 0.7706 | 524.74 | 2009.9 | 2534.6 | 524.99 | 2188.5 | 2713.5 | 1.5813 | 5.4962 | 7.0775 |
| 130 | 0.2701 | 0.001 070 | 0.6685 | 546.02 | 1993.9 | 2539.9 | 546.31 | 2174.2 | 2720.5 | 1.6344 | 5.3925 | 7.0269 |
| 135 | 0.3130 | 0.001 075 | 0.5822 | 567.35 | 1977.7 | 2545.0 | 567.69 | 2159.6 | 2727.3 | 1.6870 | 5.2907 | 6.9777 |
| 140 | 0.3613 | 0.001 080 | 0.5089 | 588.74 | 1961.3 | 2550.0 | 589.13 | 2144.7 | 2733.9 | 1.7391 | 5.1908 | 6.9299 |
| 145 | 0.4154 | 0.001 085 | 0.4463 | 610.18 | 1944.7 | 2554.9 | 610.63 | 2129.6 | 2740.3 | 1.7907 | 5.0926 | 6.8833 |
| 150 | 0.4758 | 0.001 091 | 0.3928 | 631.68 | 1927.9 | 2559.5 | 632.20 | 2114.3 | 2746.5 | 1.8418 | 4.9960 | 6.8379 |
| 155 | 0.5431 | 0.001 096 | 0.3468 | 653.24 | 1910.8 | 2564.1 | 653.84 | 2098.6 | 2752.4 | 1.8925 | 4.9010 | 6.7935 |
| 160 | 0.6178 | 0.001 102 | 0.3071 | 674.87 | 1893.5 | 2568.4 | 675.55 | 2082.6 | 2758.1 | 1.9427 | 4.8075 | 6.7502 |
| 165 | 0.7005 | 0.001 108 | 0.2727 | 696.56 | 1876.0 | 2572.5 | 697.34 | 2066.2 | 2763.5 | 1.9925 | 4.7153 | 6.7078 |
| 170 | 0.7917 | 0.001 114 | 0.2428 | 718.33 | 1858.1 | 2576.5 | 719.21 | 2049.5 | 2768.7 | 2.0419 | 4.6244 | 6.6663 |
| 175 | 0.8920 | 0.001 121 | 0.2168 | 740.17 | 1840.0 | 2580.2 | 741.17 | 2032.4 | 2773.6 | 2.0909 | 4.5347 | 6.6256 |
| 180 | 1.0221 | 0.001 127 | 0.194 05 | 762.09 | 1821.6 | 2583.7 | 763.22 | 2015.0 | 2778.2 | 2.1396 | 4.4461 | 6.5857 |
| 185 | 1.1227 | 0.001 134 | 0.174 09 | 784.10 | 1802.9 | 2587.0 | 785.37 | 1997.1 | 2782.4 | 2.1879 | 4.3586 | 6.5465 |
| 190 | 1.2544 | 0.001 141 | 0.156 54 | 806.19 | 1783.8 | 2590.0 | 807.62 | 1978.8 | 2786.4 | 2.2359 | 4.2720 | 6.5079 |
| 195 | 1.3978 | 0.001 149 | 0.141 05 | 828.37 | 1764.4 | 2592.8 | 829.98 | 1960.0 | 2790.0 | 2.2835 | 4.1863 | 6.4698 |
| 200 | 1.5538 | 0.001 157 | 0.127 36 | 850.65 | 1744.7 | 2595.3 | 852.45 | 1940.7 | 2793.2 | 2.3309 | 4.1014 | 6.4323 |
| 205 | 1.7230 | 0.001 164 | 0.115 21 | 873.04 | 1724.5 | 2597.5 | 875.04 | 1921.0 | 2796.0 | 2.3780 | 4.0172 | 6.3952 |
| 210 | 1.9062 | 0.001 173 | 0.104 41 | 895.53 | 1703.9 | 2599.5 | 897.76 | 1900.7 | 2798.5 | 2.4248 | 3.9337 | 6.3585 |
| 215 | 2.104 | 0.001 181 | 0.094 79 | 918.14 | 1682.9 | 2601.1 | 920.62 | 1879.9 | 2800.5 | 2.4714 | 3.8507 | 6.3221 |
| 220 | 2.318 | 0.001 190 | 0.086 19 | 940.87 | 1661.5 | 2602.4 | 943.62 | 1858.5 | 2802.1 | 2.5178 | 3.7683 | 6.2861 |
| 225 | 2.548 | 0.001 199 | 0.078 49 | 963.73 | 1639.6 | 2603.3 | 966.78 | 1836.5 | 2803.3 | 2.5639 | 3.6863 | 6.2503 |
| 230 | 2.795 | 0.001 209 | 0.071 58 | 986.74 | 1617.2 | 2603.9 | 990.12 | 1813.8 | 2804.0 | 2.6099 | 3.6047 | 6.2146 |
| 235 | 3.060 | 0.001 219 | 0.065 37 | 1009.89 | 1594.2 | 2604.1 | 1013.62 | 1790.5 | 2804.2 | 2.6558 | 3.5233 | 6.1791 |
| 240 | 3.344 | 0.001 229 | 0.059 76 | 1033.21 | 1570.8 | 2604.0 | 1037.32 | 1766.5 | 2803.8 | 2.7015 | 3.4422 | 6.1437 |
| 245 | 3.648 | 0.001 240 | 0.054 71 | 1056.71 | 1546.7 | 2603.4 | 1061.23 | 1741.7 | 2803.0 | 2.7472 | 3.3612 | 6.1083 |

Tabla A.5 Vapor de Agua Saturado – Temperatura (continuación)

| Temp. °C <i>T</i> | Presión MPa <i>P</i> | Volumen específico | | Energía interna | | | Entalpía | | | Entropía | | |
|-------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | Liq. sat. <i>v_f</i> | Vap. sat. <i>v_g</i> | Liq. sat. <i>u_f</i> | Evap. <i>u_{fg}</i> | Vap. sat. <i>u_g</i> | Liq. sat. <i>h_f</i> | Evap. <i>h_{fg}</i> | Vap. sat. <i>h_g</i> | Liq. sat. <i>s_f</i> | Evap. <i>s_{fg}</i> | Vap. sat. <i>s_g</i> |
| 250 | 3.973 | 0.001 251 | 0.050 13 | 1080.39 | 1522.0 | 2602.4 | 1085.36 | 1716.2 | 2801.5 | 2.7927 | 3.2802 | 6.0730 |
| 255 | 4.319 | 0.001 263 | 0.045 98 | 1104.28 | 1496.7 | 2600.9 | 1109.73 | 1689.8 | 2799.5 | 2.8383 | 3.1992 | 6.0375 |
| 260 | 4.688 | 0.001 276 | 0.042 21 | 1128.39 | 1470.6 | 2599.0 | 1134.37 | 1662.5 | 2796.9 | 2.8838 | 3.1181 | 6.0019 |
| 265 | 5.081 | 0.001 289 | 0.038 77 | 1152.74 | 1443.9 | 2596.6 | 1159.28 | 1634.4 | 2793.6 | 2.9294 | 3.0368 | 5.9662 |
| 270 | 5.499 | 0.001 302 | 0.035 64 | 1177.36 | 1416.3 | 2593.7 | 1184.51 | 1605.2 | 2789.7 | 2.9751 | 2.9551 | 5.9301 |
| 275 | 5.942 | 0.001 317 | 0.032 79 | 1202.25 | 1387.9 | 2590.2 | 1210.07 | 1574.9 | 2785.0 | 3.0208 | 2.8730 | 5.8938 |
| 280 | 6.412 | 0.001 332 | 0.030 17 | 1227.46 | 1358.7 | 2586.1 | 1235.99 | 1543.6 | 2779.6 | 3.0668 | 2.7903 | 5.8571 |
| 285 | 6.909 | 0.001 348 | 0.027 77 | 1253.00 | 1328.4 | 2581.4 | 1262.31 | 1511.0 | 2773.3 | 3.1130 | 2.7070 | 5.8199 |
| 290 | 7.436 | 0.001 366 | 0.025 57 | 1278.92 | 1297.1 | 2576.0 | 1289.07 | 1477.1 | 2766.2 | 3.1594 | 2.6227 | 5.7821 |
| 295 | 7.993 | 0.001 384 | 0.023 54 | 1305.2 | 1264.7 | 2569.9 | 1316.3 | 1441.8 | 2758.1 | 3.2062 | 2.5375 | 5.7457 |
| 300 | 8.581 | 0.001 404 | 0.021 67 | 1332.0 | 1231.0 | 2563.0 | 1344.0 | 1404.9 | 2749.0 | 3.2534 | 2.4511 | 5.7045 |
| 305 | 9.202 | 0.001 425 | 0.019 948 | 1359.3 | 1195.9 | 2555.2 | 1372.4 | 1366.4 | 2738.7 | 3.3010 | 2.3633 | 5.6643 |
| 310 | 9.856 | 0.001 447 | 0.018 350 | 1387.1 | 1159.4 | 2546.4 | 1401.3 | 1326.0 | 2727.3 | 3.3493 | 2.2737 | 5.6230 |
| 315 | 10.547 | 0.001 472 | 0.016 867 | 1415.5 | 1121.1 | 2536.6 | 1431.0 | 1283.5 | 2714.5 | 3.3982 | 2.1821 | 5.5804 |
| 320 | 11.274 | 0.001 499 | 0.015 488 | 1444.6 | 1080.9 | 2525.5 | 1461.5 | 1238.6 | 2700.1 | 3.4480 | 2.0882 | 5.5362 |
| 350 | 12.845 | 0.001 561 | 0.012 996 | 1505.3 | 993.7 | 2498.9 | 1525.3 | 1140.6 | 2665.9 | 3.5507 | 1.8909 | 5.4417 |
| 340 | 14.586 | 0.001 638 | 0.010 797 | 1570.3 | 894.3 | 2464.6 | 1594.2 | 1027.9 | 2622.0 | 3.6594 | 1.6763 | 5.3357 |
| 350 | 16.313 | 0.001 740 | 0.008 813 | 1641.9 | 776.6 | 2418.4 | 1670.6 | 893.4 | 2563.9 | 3.7777 | 1.4335 | 5.2112 |
| 360 | 18.651 | 0.001 893 | 0.006 945 | 1725.2 | 626.3 | 2351.5 | 1760.5 | 720.5 | 2481.0 | 3.9147 | 1.1379 | 5.0526 |
| 370 | 21.05 | 0.002 213 | 0.004 925 | 1844.0 | 384.5 | 2228.5 | 1890.5 | 441.6 | 2332.1 | 4.1106 | .6865 | 4.7971 |
| 374.14 | 22.09 | 0.003 155 | 0.003 155 | 2029.6 | 0 | 2029.6 | 2099.3 | 0 | 2099.3 | 4.4298 | 0 | 4.4298 |

FUENTE: Reproducido con autorización, de Joseph H. Keenan, Frederick G. Kayes, Phillip G. Hill y Joan G. Moore, *Steam Tables* (Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 1969).

Tabla A.6 Vapor de Agua Saturado–Presión

| Presión kPa <i>P</i> | Temp. °C <i>T</i> | Volumen específico | | Energía interna | | | Entalpía | | | Entropía | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | Liq. sat. <i>v_f</i> | Vap. sat. <i>v_g</i> | Liq. sat. <i>u_f</i> | Evap. <i>u_{fg}</i> | Vap. sat. <i>u_g</i> | Liq. sat. <i>h_f</i> | Evap. <i>h_{fg}</i> | Vap. sat. <i>h_g</i> | Liq. sat. <i>s_f</i> | Evap. <i>s_{fg}</i> | Vap. sat. <i>s_g</i> |
| 0.6113 | 0.01 | 0.001 000 | 206.14 | .00 | 2375.3 | 2375.3 | .01 | 2501.3 | 2501.4 | .0000 | 9.1562 | 9.1562 |
| 1.0 | 6.98 | 0.001 000 | 129.21 | 29.30 | 2355.7 | 2385.0 | 29.30 | 2484.9 | 2514.2 | .1059 | 8.8697 | 8.9756 |
| 1.5 | 13.03 | 0.001 001 | 87.98 | 54.71 | 2338.6 | 2393.3 | 54.71 | 2470.6 | 2525.3 | .1957 | 8.6322 | 8.8279 |
| 2.0 | 17.50 | 0.001 001 | 67.00 | 73.48 | 2326.0 | 2399.5 | 73.48 | 2460.0 | 2533.5 | .2607 | 8.4629 | 8.7237 |
| 2.5 | 21.08 | 0.001 002 | 54.25 | 88.48 | 2315.9 | 2404.4 | 88.49 | 2451.6 | 2540.0 | .3120 | 8.3311 | 8.6432 |
| 3.0 | 24.08 | 0.001 003 | 45.67 | 101.04 | 2307.5 | 2408.5 | 101.05 | 2444.5 | 2545.5 | .3545 | 8.2231 | 8.5776 |
| 4.0 | 28.96 | 0.001 004 | 34.80 | 121.45 | 2293.7 | 2415.2 | 121.46 | 2432.9 | 2554.4 | .4226 | 8.0520 | 8.4746 |
| 5.0 | 32.88 | 0.001 005 | 28.19 | 137.81 | 2282.7 | 2420.5 | 137.82 | 2423.7 | 2561.5 | .4764 | 7.9187 | 8.3951 |
| 7.5 | 40.29 | 0.001 008 | 19.24 | 168.78 | 2261.7 | 2430.5 | 168.79 | 2406.0 | 2574.8 | .5764 | 7.6750 | 8.2515 |
| 10 | 45.81 | 0.001 010 | 14.67 | 191.82 | 2246.1 | 2437.9 | 191.83 | 2392.8 | 2584.7 | .6493 | 7.5009 | 8.1502 |
| 15 | 53.97 | 0.001 014 | 10.02 | 225.92 | 2222.8 | 2448.7 | 225.94 | 2373.1 | 2599.1 | .7549 | 7.2536 | 8.0085 |
| 20 | 60.06 | 0.001 017 | 7.649 | 251.38 | 2205.4 | 2456.7 | 251.40 | 2358.3 | 2609.7 | .8320 | 7.0766 | 7.9085 |
| 25 | 64.97 | 0.001 020 | 6.204 | 271.90 | 2191.2 | 2463.1 | 271.93 | 2346.3 | 2618.2 | .8931 | 6.9383 | 7.8314 |
| 30 | 69.10 | 0.001 022 | 5.229 | 289.20 | 2179.2 | 2468.4 | 289.23 | 2336.1 | 2625.3 | .9439 | 6.8247 | 7.7686 |
| 40 | 75.87 | 0.001 027 | 3.993 | 317.53 | 2159.5 | 2477.0 | 317.58 | 2319.2 | 2636.8 | 1.0259 | 6.6441 | 7.6700 |
| 50 | 81.33 | 0.001 030 | 3.240 | 340.44 | 2143.4 | 2483.9 | 340.49 | 2305.4 | 2645.9 | 1.0910 | 6.5029 | 7.5939 |
| 75 | 91.78 | 0.001 037 | 2.217 | 384.31 | 2112.4 | 2496.7 | 384.39 | 2278.6 | 2663.0 | 1.2130 | 6.2434 | 7.4564 |
| MPa | | | | | | | | | | | | |
| 0.100 | 99.63 | 0.001 043 | 1.6940 | 417.36 | 2088.7 | 2506.1 | 417.46 | 2258.0 | 2675.5 | 1.3026 | 6.0568 | 7.3594 |
| 0.125 | 105.99 | 0.001 048 | 1.3749 | 444.19 | 2069.3 | 2513.5 | 444.32 | 2241.0 | 2685.4 | 1.3740 | 5.9104 | 7.2844 |
| 0.150 | 111.37 | 0.001 053 | 1.1593 | 466.94 | 2052.7 | 2519.7 | 467.11 | 2226.5 | 2693.6 | 1.4336 | 5.7897 | 7.2233 |
| 0.175 | 116.06 | 0.001 057 | 1.0036 | 486.80 | 2038.1 | 2524.9 | 486.99 | 2213.6 | 2700.6 | 1.4849 | 5.6868 | 7.1717 |
| 0.200 | 120.23 | 0.001 061 | 0.8857 | 504.49 | 2025.0 | 2529.5 | 504.70 | 2201.9 | 2706.7 | 1.5301 | 5.5970 | 7.1271 |
| 0.225 | 124.00 | 0.001 064 | 0.7933 | 520.47 | 2013.1 | 2533.6 | 520.72 | 2191.3 | 2712.1 | 1.5706 | 5.5173 | 7.0878 |

Tabla A.6 Vapor de Agua Saturado—Presión (continuación)

| Presión MPa <i>P</i> | Temp. °C <i>T</i> | Volumen específico | | Energía interna | | | Entalpía | | | Entropía | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | Liq. sat. <i>v_f</i> | Vap. sat. <i>v_g</i> | Liq. sat. <i>u_f</i> | Evap. <i>u_{fg}</i> | Vap. sat. <i>u_g</i> | Liq. sat. <i>h_f</i> | Evap. <i>h_{fg}</i> | Vap. sat. <i>h_g</i> | Liq. sat. <i>s_f</i> | Evap. <i>s_{fg}</i> | Vap. sat. <i>s_g</i> |
| 0.250 | 127.44 | 0.001 067 | 0.7187 | 535.10 | 2002.1 | 2537.2 | 535.37 | 2181.5 | 2716.9 | 1.6072 | 5.4455 | 7.0527 |
| 0.275 | 130.60 | 0.001 070 | 0.6573 | 548.59 | 1991.9 | 2540.5 | 548.89 | 2172.4 | 2721.3 | 1.6408 | 5.3801 | 7.0209 |
| 0.300 | 133.55 | 0.001 073 | 0.6058 | 561.15 | 1982.4 | 2543.6 | 561.47 | 2163.8 | 2725.3 | 1.6718 | 5.3201 | 6.9919 |
| 0.325 | 136.30 | 0.001 076 | 0.5620 | 572.90 | 1973.5 | 2546.4 | 573.25 | 2155.8 | 2729.0 | 1.7006 | 5.2646 | 6.9652 |
| 0.350 | 138.88 | 0.001 079 | 0.5243 | 583.95 | 1965.0 | 2548.9 | 584.33 | 2148.1 | 2732.4 | 1.7275 | 5.2130 | 6.9405 |
| 0.375 | 141.32 | 0.001 081 | 0.4914 | 594.40 | 1956.9 | 2551.3 | 594.81 | 2140.8 | 2735.6 | 1.7528 | 5.1647 | 6.9175 |
| 0.40 | 143.63 | 0.001 084 | 0.4625 | 604.31 | 1949.3 | 2553.6 | 604.74 | 2133.8 | 2738.6 | 1.7766 | 5.1193 | 6.8959 |
| 0.45 | 147.93 | 0.001 088 | 0.4140 | 622.77 | 1934.9 | 2557.6 | 623.25 | 2120.7 | 2743.9 | 1.8207 | 5.0359 | 6.8565 |
| 0.50 | 151.86 | 0.001 093 | 0.3749 | 639.68 | 1921.6 | 2561.2 | 640.23 | 2108.5 | 2748.7 | 1.8607 | 4.9606 | 6.8213 |
| 0.55 | 155.48 | 0.001 097 | 0.3427 | 655.32 | 1909.2 | 2564.5 | 655.93 | 2097.0 | 2753.0 | 1.8973 | 4.8920 | 6.7893 |
| 0.60 | 158.85 | 0.001 101 | 0.3157 | 669.90 | 1897.5 | 2567.4 | 670.56 | 2086.3 | 2756.8 | 1.9312 | 4.8288 | 6.7600 |
| 0.65 | 162.01 | 0.001 104 | 0.2927 | 683.56 | 1886.5 | 2570.1 | 684.28 | 2076.0 | 2760.3 | 1.9627 | 4.7705 | 6.7331 |
| 0.70 | 164.97 | 0.001 108 | 0.2729 | 696.44 | 1876.1 | 2572.5 | 697.22 | 2066.3 | 2763.5 | 1.9922 | 4.7158 | 6.7080 |
| 0.75 | 167.78 | 0.001 112 | 0.2556 | 708.64 | 1866.1 | 2574.7 | 709.47 | 2057.0 | 2766.4 | 2.0200 | 4.6647 | 6.6847 |
| 0.80 | 170.43 | 0.001 115 | 0.2404 | 720.22 | 1856.6 | 2576.8 | 721.11 | 2048.0 | 2769.1 | 2.0462 | 4.6166 | 6.6628 |
| 0.85 | 172.96 | 0.001 118 | 0.2270 | 731.27 | 1847.4 | 2578.7 | 732.22 | 2039.4 | 2771.6 | 2.0710 | 4.5711 | 6.6421 |
| 0.90 | 175.38 | 0.001 121 | 0.2150 | 741.83 | 1838.6 | 2580.5 | 742.83 | 2031.1 | 2773.9 | 2.0946 | 4.5280 | 6.6226 |
| 0.95 | 177.69 | 0.001 124 | 0.2042 | 751.95 | 1830.2 | 2582.1 | 753.02 | 2023.1 | 2776.1 | 2.1172 | 4.4869 | 6.6041 |
| 1.00 | 179.91 | 0.001 127 | 0.194 44 | 761.68 | 1822.0 | 2583.6 | 762.81 | 2015.3 | 2778.1 | 2.1387 | 4.4478 | 6.5865 |
| 1.10 | 184.09 | 0.001 133 | 0.177 53 | 780.09 | 1806.3 | 2586.4 | 781.34 | 2000.4 | 2781.7 | 2.1792 | 4.3744 | 6.5536 |
| 1.20 | 187.99 | 0.001 139 | 0.163 33 | 797.29 | 1791.5 | 2588.8 | 798.65 | 1986.2 | 2784.8 | 2.2166 | 4.3067 | 6.5233 |
| 1.30 | 191.64 | 0.001 144 | 0.151 25 | 813.34 | 1777.5 | 2591.0 | 814.93 | 1972.7 | 2787.6 | 2.2515 | 4.2438 | 6.4953 |
| 1.40 | 195.07 | 0.001 149 | 0.140 84 | 828.70 | 1764.1 | 2592.8 | 830.30 | 1959.7 | 2790.0 | 2.2842 | 4.1850 | 6.4693 |

Tabla A.6 Vapor de Agua Saturado – Presión (continuación)

| Presión MPa <i>P</i> | Temp. °C <i>T</i> | Volumen específico | | Energía interna | | | Entalpía | | | Entropía | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| | | Liq. sat. <i>v_f</i> | Vap. sat. <i>v_g</i> | Liq. sat. <i>u_f</i> | Evap. <i>u_{fg}</i> | Vap. sat. <i>u_g</i> | Liq. sat. <i>h_f</i> | Evap. <i>h_{fg}</i> | Vap. sat. <i>h_g</i> | Liq. sat. <i>s_f</i> | Evap. <i>s_{fg}</i> | Vap. sat. <i>s_g</i> |
| 1.50 | 198.32 | 0.001 154 | 0.131 77 | 843.16 | 1751.3 | 2594.5 | 844.89 | 1947.3 | 2792.2 | 2 3150 | 4.1298 | 6.4448 |
| 1.75 | 205.76 | 0.001 166 | 0.115 49 | 876.46 | 1721.4 | 2597.8 | 878.50 | 1917.9 | 2796.4 | 2 3851 | 4.0044 | 6.3896 |
| 2.00 | 212.42 | 0.001 177 | 0.099 63 | 906.44 | 1693.8 | 2600.3 | 908.79 | 1890.7 | 2799.5 | 2 4474 | 3.8935 | 6.3409 |
| 2.25 | 218.45 | 0.001 187 | 0.088 75 | 933.83 | 1668.2 | 2602.0 | 936.49 | 1865.2 | 2801.7 | 2 5055 | 3.7937 | 6.2972 |
| 2.5 | 223.99 | 0.001 197 | 0.079 98 | 959.11 | 1644.0 | 2603.1 | 962.11 | 1841.0 | 2803.1 | 2 5547 | 3.7028 | 6.2575 |
| 3.0 | 233.90 | 0.001 217 | 0.066 68 | 1004.78 | 1599.3 | 2604.1 | 1008.42 | 1795.7 | 2804.2 | 2 6457 | 3.5412 | 6.1869 |
| 3.5 | 242.60 | 0.001 235 | 0.057 07 | 1045.43 | 1558.3 | 2603.7 | 1049.75 | 1753.7 | 2803.4 | 2 7253 | 3.4000 | 6.1253 |
| 4 | 250.40 | 0.001 252 | 0.049 78 | 1082.31 | 1520.0 | 2602.3 | 1087.31 | 1714.1 | 2801.4 | 2 7964 | 3.2737 | 6.0701 |
| 5 | 263.99 | 0.001 286 | 0.039 44 | 1147.81 | 1449.3 | 2597.1 | 1154.23 | 1640.1 | 2794.3 | 2 9202 | 3.0532 | 5.9734 |
| 6 | 275.64 | 0.001 319 | 0.032 44 | 1205.44 | 1384.3 | 2589.7 | 1213.35 | 1571.0 | 2784.3 | 3 0267 | 2.8625 | 5.8892 |
| 7 | 285.88 | 0.001 351 | 0.027 37 | 1257.55 | 1323.0 | 2580.5 | 1267.00 | 1505.1 | 2772.1 | 3 1211 | 2.6922 | 5.8133 |
| 8 | 295.06 | 0.001 384 | 0.023 52 | 1305.57 | 1264.2 | 2569.8 | 1316.64 | 1441.3 | 2758.0 | 3 2068 | 2.5364 | 5.7432 |
| 9 | 303.40 | 0.001 418 | 0.020 48 | 1350.51 | 1207.3 | 2557.8 | 1363.26 | 1378.9 | 2742.1 | 3 2858 | 2.3915 | 5.6772 |
| 10 | 311.06 | 0.001 452 | 0.018 026 | 1393.04 | 1151.4 | 2544.4 | 1407.56 | 1317.1 | 2724.7 | 3 3596 | 2 2544 | 5.6141 |
| 11 | 318.15 | 0.001 489 | 0.015 987 | 1433.7 | 1096.0 | 2529.8 | 1450.1 | 1255.5 | 2705.6 | 3 4295 | 2 1233 | 5.5527 |
| 12 | 324.75 | 0.001 527 | 0.014 263 | 1473.0 | 1040.7 | 2513.7 | 1491.3 | 1193.6 | 2684.9 | 3 4962 | 1 9962 | 5.4924 |
| 13 | 330.93 | 0.001 567 | 0.012 780 | 1511.1 | 985.0 | 2496.1 | 1531.5 | 1130.7 | 2662.2 | 3 5606 | 1 8718 | 5.4323 |
| 14 | 336.75 | 0.001 611 | 0.011 485 | 1548.6 | 928.2 | 2476.8 | 1571.1 | 1066.5 | 2637.6 | 3 6232 | 1 7485 | 5.3717 |
| 15 | 342.24 | 0.001 658 | 0.010 337 | 1585.6 | 869.8 | 2455.5 | 1610.5 | 1000.0 | 2610.5 | 3 6848 | 1 6249 | 5.3098 |
| 16 | 347.44 | 0.001 711 | 0.009 306 | 1622.7 | 809.0 | 2431.7 | 1650.1 | 930.6 | 2580.6 | 3 7461 | 1 4994 | 5.2455 |
| 17 | 352.37 | 0.001 770 | 0.008 364 | 1660.2 | 744.8 | 2405.0 | 1690.3 | 856.9 | 2547.2 | 3 8079 | 1 3698 | 5.1777 |
| 18 | 357.06 | 0.001 840 | 0.007 489 | 1698.9 | 675.4 | 2374.3 | 1732.0 | 777.1 | 2509.1 | 3 8715 | 1 2329 | 5.1044 |
| 19 | 361.54 | 0.001 924 | 0.006 657 | 1739.9 | 598.1 | 2338.1 | 1776.5 | 688.0 | 2464.5 | 3 9388 | 1 0839 | 5.0228 |
| 20 | 365.81 | 0.002 036 | 0.005 834 | 1785.6 | 507.5 | 2293.0 | 1826.3 | 583.4 | 2409.7 | 4 0139 | 9130 | 4.9269 |
| 21 | 369.89 | 0.002 207 | 0.004 952 | 1842.1 | 388.5 | 2230.6 | 1888.4 | 446.2 | 2334.6 | 4 1075 | 6938 | 4.8013 |
| 22 | 373.80 | 0.002 742 | 0.003 568 | 1961.9 | 125.2 | 2087.1 | 2022.2 | 143.4 | 2165.6 | 4 3110 | 2216 | 4.5327 |
| 22.09 | 374.14 | 0.003 155 | 0.003 155 | 2029.6 | 0 | 2029.6 | 2099.3 | 0 | 2099.3 | 4 4298 | 0 | 4 4298 |

FUENTE: Reproducido con autorización, de Joseph H. Keenan, Frederick G. Kayes, Philip G. Hill y Joan G. Moore, *Steam Tables* (Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 1969).

Tabla A.7 Vapor de Agua Sobrecalentado (continuación)

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|----------|------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|
| | <i>P</i> = 1.00 MPa (179.91) | | | | <i>P</i> = 1.20 MPa (187.99) | | | | <i>P</i> = 1.40 MPa (195.07) | | | |
| Sat. | .194 44 | 2583.6 | 2778.1 | 6.5865 | .163 33 | 2588.8 | 2784.8 | 6.5233 | .140 84 | 2592.8 | 2790.0 | 6.4693 |
| 200 | .2060 | 2621.9 | 2827.9 | 6.6940 | .169 30 | 2612.8 | 2815.9 | 6.5898 | .143 02 | 2603.1 | 2803.3 | 6.4975 |
| 250 | .2327 | 2709.9 | 2942.6 | 6.9247 | .192 34 | 2704.2 | 2935.0 | 6.8294 | .163 50 | 2698.3 | 2927.2 | 6.7467 |
| 300 | .2579 | 2793.2 | 3051.2 | 7.1229 | .2138 | 2789.2 | 3045.8 | 7.0317 | .182 28 | 2785.2 | 3040.4 | 6.9534 |
| 350 | .2825 | 2875.2 | 3157.7 | 7.3011 | .2345 | 2872.2 | 3153.6 | 7.2121 | .2003 | 2869.2 | 3149.5 | 7.1360 |
| 400 | .3066 | 2957.3 | 3263.9 | 7.4651 | .2548 | 2954.9 | 3260.7 | 7.3774 | .2178 | 2952.5 | 3257.5 | 7.3026 |
| 500 | .3541 | 3124.4 | 3478.5 | 7.7622 | .2946 | 3122.8 | 3476.3 | 7.6759 | .2521 | 3121.1 | 3474.1 | 7.6027 |
| 600 | .4011 | 3296.8 | 3697.9 | 8.0290 | .3339 | 3295.6 | 3696.3 | 7.9435 | .2860 | 3294.4 | 3694.8 | 7.8710 |
| 700 | .4478 | 3475.3 | 3923.1 | 8.2731 | .3729 | 3474.4 | 3922.0 | 8.1881 | .3195 | 3473.6 | 3920.8 | 8.1160 |
| 800 | .4943 | 3660.4 | 4154.7 | 8.4996 | .4118 | 3659.7 | 4153.8 | 8.4148 | .3528 | 3659.0 | 4153.0 | 8.3431 |
| 900 | .5407 | 3852.2 | 4392.9 | 8.7118 | .4505 | 3851.6 | 4392.2 | 8.6272 | .3861 | 3851.1 | 4391.5 | 8.5556 |
| 1000 | .5871 | 4050.5 | 4637.6 | 8.9119 | .4892 | 4050.0 | 4637.0 | 8.8274 | .4192 | 4049.5 | 4636.4 | 8.7559 |
| 1100 | .6335 | 4255.1 | 4888.6 | 9.1017 | .5278 | 4254.6 | 4888.0 | 9.0172 | .4524 | 4254.1 | 4887.5 | 8.9457 |
| 1200 | .6798 | 4465.6 | 5145.4 | 9.2822 | .5665 | 4465.1 | 5144.9 | 9.1977 | .4855 | 4464.7 | 5144.4 | 9.1262 |
| 1300 | .7261 | 4681.3 | 5407.4 | 9.4543 | .6051 | 4680.9 | 5407.0 | 9.3698 | .5186 | 4680.4 | 5406.5 | 9.2984 |
| | <i>P</i> = 1.60 MPa (201.41) | | | | <i>P</i> = 1.80 MPa (207.15) | | | | <i>P</i> = 2.00 MPa (212.42) | | | |
| Sat. | .123 80 | 2596.0 | 2794.0 | 6.4218 | .110 42 | 2598.4 | 2797.1 | 6.3794 | .099 63 | 2600.3 | 2799.5 | 6.3409 |
| 225 | .132 87 | 2644.7 | 2857.3 | 6.5518 | .116 73 | 2636.6 | 2846.7 | 6.4808 | .103 77 | 2628.3 | 2835.8 | 6.4147 |
| 250 | .141 84 | 2692.3 | 2919.2 | 6.6732 | .124 97 | 2686.0 | 2911.0 | 6.6066 | .111 44 | 2679.6 | 2902.5 | 6.5453 |
| 300 | .158 62 | 2781.1 | 3034.8 | 6.8844 | .140 21 | 2776.9 | 3029.2 | 6.8226 | .125 47 | 2772.6 | 3023.5 | 6.7664 |
| 350 | .174 56 | 2866.1 | 3145.4 | 7.0694 | .154 57 | 2863.0 | 3141.2 | 7.0100 | .138 57 | 2859.8 | 3137.0 | 6.9563 |
| 400 | .190 05 | 2950.1 | 3254.2 | 7.2374 | .168 47 | 2947.7 | 3250.9 | 7.1794 | .151 20 | 2945.2 | 3247.6 | 7.1271 |
| 500 | .2203 | 3119.5 | 3472.0 | 7.5390 | .195 50 | 3117.9 | 3469.8 | 7.4825 | .175 68 | 3116.2 | 3467.6 | 7.4317 |
| 600 | .2500 | 3293.3 | 3693.2 | 7.8080 | .2220 | 3292.1 | 3691.7 | 7.7523 | .199 60 | 3290.9 | 3690.1 | 7.7024 |
| 700 | .2794 | 3472.7 | 3919.7 | 8.0535 | .2482 | 3471.8 | 3918.5 | 7.9983 | .2232 | 3470.9 | 3917.4 | 7.9487 |

Tabla A.7 Vapor de Agua Sobrecalentado (continuación)

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|----------|------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|
| | <i>P</i> = 1.60 MPa (201.41) | | | | <i>P</i> = 1.80 MPa (207.15) | | | | <i>P</i> = 2.00 MPa (212.42) | | | |
| 800 | .3086 | 3658.3 | 4152.1 | 8.2808 | .2742 | 3657.6 | 4151.2 | 8.2258 | .2467 | 3657.0 | 4150.3 | 8.1765 |
| 900 | .3377 | 3850.5 | 4390.8 | 8.4935 | .3001 | 3849.9 | 4390.1 | 8.4386 | .2700 | 3849.3 | 4389.4 | 8.3895 |
| 1000 | .3668 | 4049.0 | 4655.8 | 8.6938 | .3260 | 4048.5 | 4635.2 | 8.6391 | .2933 | 4048.0 | 4634.6 | 8.5901 |
| 1100 | .3958 | 4253.7 | 4887.0 | 8.8837 | .3518 | 4253.2 | 4886.4 | 8.8290 | .3166 | 4252.7 | 4885.9 | 8.7800 |
| 1200 | .4248 | 4464.2 | 5143.9 | 9.0643 | .3776 | 4463.7 | 5143.4 | 9.0096 | .3398 | 4463.3 | 5142.9 | 8.9607 |
| 1300 | .4538 | 4679.9 | 5406.0 | 9.2364 | .4034 | 4679.5 | 5405.6 | 9.1818 | .3631 | 4679.0 | 5405.1 | 9.1329 |
| | <i>P</i> = 2.50 MPa (223.99) | | | | <i>P</i> = 3.00 MPa (233.90) | | | | <i>P</i> = 3.50 MPa (242.60) | | | |
| Sat. | .079 98 | 2603.1 | 2803.1 | 6.2575 | .066 68 | 2604.1 | 2804.2 | 6.1869 | .057 07 | 2603.7 | 2803.4 | 6.1253 |
| 225 | .080 27 | 2605.6 | 2806.3 | 6.2639 | | | | | | | | |
| 250 | .087 00 | 2662.6 | 2880.1 | 6.4085 | .070 58 | 2644.0 | 2855.8 | 6.2872 | .058 72 | 2623.7 | 2829.2 | 6.1749 |
| 300 | .098 90 | 2761.6 | 3008.8 | 6.6438 | .081 14 | 2750.1 | 2993.5 | 6.5390 | .068 42 | 2738.0 | 2977.5 | 6.4461 |
| 350 | .109 76 | 2851.9 | 3126.3 | 6.8403 | .090 53 | 2843.7 | 3115.3 | 6.7428 | .076 78 | 2835.3 | 3104.0 | 6.6579 |
| 400 | .120 10 | 2939.1 | 3239.3 | 7.0148 | .099 36 | 2932.8 | 3230.9 | 6.9212 | .084 53 | 2926.4 | 3222.3 | 6.8405 |
| 450 | .130 14 | 3025.5 | 3350.8 | 7.1746 | .107 87 | 3020.4 | 3344.0 | 7.0834 | .091 96 | 3015.3 | 3337.2 | 7.0052 |
| 500 | .139 98 | 3112.1 | 3462.1 | 7.3234 | .116 19 | 3108.0 | 3456.5 | 7.2338 | .099 18 | 3103.0 | 3450.9 | 7.1572 |
| 600 | .159 30 | 3288.0 | 3686.3 | 7.5960 | .132 43 | 3285.0 | 3682.3 | 7.5085 | .113 24 | 3282.1 | 3678.4 | 7.4339 |
| 700 | .178 32 | 3468.7 | 3914.5 | 7.8435 | .148 38 | 3466.5 | 3911.7 | 7.7571 | .126 99 | 3464.3 | 3908.8 | 7.6837 |
| 800 | .197 16 | 3655.3 | 4148.2 | 8.0720 | .164 14 | 3653.5 | 4145.9 | 7.9862 | .140 56 | 3651.8 | 4143.7 | 7.9134 |
| 900 | .215 90 | 3847.9 | 4387.6 | 8.2853 | .179 80 | 3846.5 | 4385.9 | 8.1999 | .154 02 | 3845.0 | 4384.1 | 8.1276 |
| 1000 | .2346 | 4046.7 | 4633.1 | 8.4861 | .195 41 | 4045.4 | 4631.6 | 8.4009 | .167 43 | 4044.1 | 4630.1 | 8.3288 |
| 1100 | .2532 | 4251.5 | 4884.6 | 8.6762 | .210 98 | 4250.3 | 4883.3 | 8.5912 | .180 80 | 4249.2 | 4881.9 | 8.5192 |
| 1200 | .2718 | 4462.1 | 5141.7 | 8.8569 | .226 52 | 4460.9 | 5140.5 | 8.7720 | .194 15 | 4459.8 | 5139.3 | 8.7000 |
| 1300 | .2905 | 4677.8 | 5404.0 | 9.0291 | .242 06 | 4676.6 | 5402.8 | 8.9442 | .207 49 | 4675.5 | 5401.7 | 8.8723 |

Tabla A.7 Vapor de Agua Sobrecalentado (continuación)

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------------------------|----------|----------|----------|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <i>P</i> = 4.0 MPa (250.40) | | | | <i>P</i> = 4.5 MPa (257.49) | | | | <i>P</i> = 5.0 MPa (263.99) | | | | |
| Sat. | .049 78 | 2602.3 | 2801.4 | 6.0701 | .044 06 | 2600.1 | 2798.3 | 6.0198 | .039 44 | 2597.1 | 2794.3 | 5.9734 |
| 275 | .054 57 | 2667.9 | 2886.2 | 6.2285 | .047 30 | 2650.3 | 2863.2 | 6.1401 | .041 41 | 2631.3 | 2838.3 | 6.0544 |
| 300 | .058 84 | 2725.3 | 2960.7 | 6.3615 | .051 35 | 2712.0 | 2943.1 | 6.2828 | .045 32 | 2698.0 | 2924.5 | 6.2084 |
| 350 | .066 45 | 2826.7 | 3092.5 | 6.5821 | .058 40 | 2817.8 | 3080.6 | 6.5131 | .051 94 | 2808.7 | 3068.4 | 6.4493 |
| 400 | .073 41 | 2919.9 | 3213.6 | 6.7690 | .064 75 | 2913.3 | 3204.7 | 6.7047 | .057 81 | 2906.6 | 3195.7 | 6.6459 |
| 450 | .080 02 | 3010.2 | 3330.3 | 6.9363 | .070 74 | 3005.0 | 3323.3 | 6.8746 | .063 30 | 2999.7 | 3316.2 | 6.8186 |
| 500 | .086 43 | 3099.5 | 3445.3 | 7.0901 | .076 51 | 3095.3 | 3439.6 | 7.0301 | .068 57 | 3091.0 | 3433.8 | 6.9759 |
| 600 | .098 85 | 3279.1 | 3674.4 | 7.3688 | .087 65 | 3276.0 | 3670.5 | 7.3110 | .078 69 | 3273.0 | 3666.5 | 7.2589 |
| 700 | .110 95 | 3462.1 | 3905.9 | 7.6198 | .098 47 | 3459.9 | 3903.0 | 7.5631 | .088 49 | 3457.6 | 3900.1 | 7.5122 |
| 800 | .122 87 | 3650.0 | 4141.5 | 7.8502 | .109 11 | 3648.3 | 4139.3 | 7.7942 | .098 11 | 3646.6 | 4137.1 | 7.7440 |
| 900 | .134 69 | 3843.6 | 4382.3 | 8.0647 | .119 65 | 3842.2 | 4380.6 | 8.0091 | .107 62 | 3840.7 | 4378.8 | 7.9593 |
| 1000 | .146 45 | 4042.9 | 4628.7 | 8.2662 | .130 13 | 4041.6 | 4627.2 | 8.2108 | .117 07 | 4040.4 | 4625.7 | 8.1612 |
| 1100 | .158 17 | 4248.0 | 4880.6 | 8.4567 | .140 56 | 4246.8 | 4879.3 | 8.4015 | .126 48 | 4245.6 | 4878.0 | 8.3520 |
| 1200 | .169 87 | 4458.6 | 5138.1 | 8.6376 | .150 98 | 4457.5 | 5136.9 | 8.5825 | .135 87 | 4456.3 | 5135.7 | 8.5331 |
| 1300 | .181 56 | 4674.3 | 5400.5 | 8.8100 | .161 39 | 4673.1 | 5399.4 | 8.7549 | .145 26 | 4672.0 | 5398.2 | 8.7055 |
| <i>P</i> = 6.0 MPa (275.64) | | | | <i>P</i> = 7.0 MPa (285.88) | | | | <i>P</i> = 8.0 MPa (295.06) | | | | |
| Sat. | .032 44 | 2589.7 | 2784.3 | 5.8892 | .027 37 | 2580.5 | 2772.1 | 5.8133 | .023 52 | 2569.8 | 2758.0 | 5.7432 |
| 300 | .036 16 | 2667.2 | 2884.2 | 6.0674 | .029 47 | 2632.2 | 2838.4 | 5.9305 | .024 26 | 2590.9 | 2785.0 | 5.7906 |
| 350 | .042 23 | 2789.6 | 3043.0 | 6.3335 | .035 24 | 2769.4 | 3016.0 | 6.2283 | .029 95 | 2747.7 | 2987.3 | 6.1301 |
| 400 | .047 39 | 2892.9 | 3177.2 | 6.5408 | .039 93 | 2878.6 | 3158.1 | 6.4478 | .034 32 | 2863.8 | 3138.3 | 6.3634 |
| 450 | .052 14 | 2988.9 | 3301.8 | 6.7193 | .044 16 | 2978.0 | 3287.1 | 6.6327 | .038 17 | 2966.7 | 3272.0 | 6.5551 |
| 500 | .056 65 | 3082.2 | 3422.2 | 6.8803 | .048 14 | 3073.4 | 3410.3 | 6.7975 | .041 75 | 3064.3 | 3398.3 | 6.7240 |
| 550 | .061 01 | 3174.6 | 3540.6 | 7.0288 | .051 95 | 3167.2 | 3530.9 | 6.9486 | .045 16 | 3159.8 | 3521.0 | 6.8778 |
| 600 | .065 25 | 3266.9 | 3658.4 | 7.1677 | .055 65 | 3260.7 | 3650.3 | 7.0894 | .048 45 | 3254.4 | 3642.0 | 7.0206 |

Tabla A.7 Vapor de Agua Sobrecalentado (continuación)

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|-----------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| <i>P</i> = 6.0 MPa (275.64) | | | | <i>P</i> = 7.0 MPa (285.88) | | | | <i>P</i> = 8.0 MPa (295.06) | | | | |
| 700 | .073 52 | 3453.1 | 3894.2 | 7.4234 | .062 83 | 3448.5 | 3888.3 | 7.3476 | .054 81 | 3443.9 | 3882.4 | 7.2812 |
| 800 | .081 60 | 3643.1 | 4132.7 | 7.6566 | .069 81 | 3639.5 | 4128.2 | 7.5822 | .060 97 | 3636.0 | 4123.8 | 7.5173 |
| 900 | .089 58 | 3837.8 | 4375.3 | 7.8727 | .076 69 | 3835.0 | 4371.8 | 7.7991 | .067 02 | 3832.1 | 4368.3 | 7.7351 |
| 1000 | .097 49 | 4037.8 | 4622.7 | 8.0751 | .083 50 | 4035.3 | 4619.8 | 8.0020 | .073 01 | 4032.8 | 4616.9 | 7.9384 |
| 1100 | .105 36 | 4243.3 | 4875.4 | 8.2661 | .090 27 | 4240.9 | 4872.8 | 8.1933 | .078 96 | 4238.6 | 4870.3 | 8.1300 |
| 1200 | .113 21 | 4454.0 | 5133.3 | 8.4474 | .097 03 | 4451.7 | 5130.9 | 8.3747 | .084 89 | 4449.5 | 5128.5 | 8.3115 |
| 1300 | .121 06 | 4669.6 | 5396.0 | 8.6199 | .103 77 | 4667.3 | 5393.7 | 8.5473 | .090 80 | 4665.0 | 5391.5 | 8.4842 |
| <i>P</i> = 9.0 MPa (303.40) | | | | <i>P</i> = 10.0 MPa (311.06) | | | | <i>P</i> = 12.5 MPa (327.89) | | | | |
| Sat. | .020 48 | 2557.8 | 2742.1 | 5.6772 | .018 026 | 2544.4 | 2724.7 | 5.6141 | .013 495 | 2505.1 | 2673.8 | 5.4624 |
| 325 | .023 27 | 2646.6 | 2856.0 | 5.8712 | .019 861 | 2610.4 | 2809.1 | 5.7568 | | | | |
| 350 | .025 80 | 2724.4 | 2956.6 | 6.0361 | .022 42 | 2699.2 | 2923.4 | 5.9443 | .016 126 | 2624.6 | 2826.2 | 5.7118 |
| 400 | .029 93 | 2848.4 | 3117.8 | 6.2854 | .026 41 | 2832.4 | 3096.5 | 6.2120 | .020 00 | 2789.3 | 3039.3 | 6.0417 |
| 450 | .033 50 | 2955.2 | 3256.6 | 6.4844 | .029 75 | 2943.4 | 3240.9 | 6.4190 | .022 99 | 2912.5 | 3199.8 | 6.2719 |
| 500 | .036 77 | 3055.2 | 3386.1 | 6.6576 | .032 79 | 3045.8 | 3373.7 | 6.5966 | .025 60 | 3021.7 | 3341.8 | 6.4618 |
| 550 | .039 87 | 3152.2 | 3511.0 | 6.8142 | .035 64 | 3144.6 | 3500.9 | 6.7561 | .028 01 | 3125.0 | 3475.2 | 6.6290 |
| 600 | .042 85 | 3248.1 | 3633.7 | 6.9589 | .038 37 | 3241.7 | 3625.3 | 6.9029 | .030 29 | 3225.4 | 3604.0 | 6.7810 |
| 650 | .045 74 | 3343.6 | 3755.3 | 7.0943 | .041 01 | 3338.2 | 3748.2 | 7.0398 | .032 48 | 3324.4 | 3730.4 | 6.9218 |
| 700 | .048 57 | 3439.3 | 3876.5 | 7.2221 | .043 58 | 3434.7 | 3870.5 | 7.1687 | .034 60 | 3422.9 | 3855.3 | 7.0536 |
| 800 | .054 09 | 3632.5 | 4119.3 | 7.4596 | .048 59 | 3628.9 | 4114.8 | 7.4077 | .038 69 | 3620.0 | 4103.6 | 7.2965 |
| 900 | .059 50 | 3829.2 | 4364.8 | 7.6783 | .053 49 | 3826.3 | 4361.2 | 7.6272 | .042 67 | 3819.1 | 4352.5 | 7.5182 |
| 1000 | .064 85 | 4030.3 | 4614.0 | 7.8821 | .058 32 | 4027.8 | 4611.0 | 7.8315 | .046 58 | 4021.6 | 4603.8 | 7.7237 |
| 1100 | .070 16 | 4236.3 | 4867.7 | 8.0740 | .063 12 | 4234.0 | 4865.1 | 8.0237 | .050 45 | 4228.2 | 4858.8 | 7.9165 |
| 1200 | .075 44 | 4447.2 | 5126.2 | 8.2556 | .067 89 | 4444.9 | 5123.8 | 8.2055 | .054 30 | 4439.3 | 5118.0 | 8.0987 |
| 1300 | .080 72 | 4662.7 | 5389.2 | 8.4284 | .072 65 | 4460.5 | 5387.0 | 8.3783 | .058 13 | 4654.8 | 5381.4 | 8.2717 |

Tabla A.7 Vapor de Agua Sobrecalentado (continuación)

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|------------------------------|------------|----------|----------|------------------------------|------------|----------|----------|------------------------------|------------|----------|----------|----------|
| <i>P</i> = 15.0 MPa (342.24) | | | | <i>P</i> = 17.5 MPa (354.75) | | | | <i>P</i> = 20.0 MPa (365.81) | | | | |
| Sat. | .010 337 | 2455.5 | 2610.5 | 5.3098 | .007 920 | 2390.2 | 2528.8 | 5.1419 | .005 834 | 2293.0 | 2409.7 | 4.9269 |
| 350 | .011 470 | 2520.4 | 2692.4 | 5.4421 | | | | | | | | |
| 400 | .015 649 | 2740.7 | 2975.5 | 5.8811 | .012 447 | 2685.6 | 2902.9 | 5.7213 | .009 942 | 2619.3 | 2818.1 | 5.5540 |
| 450 | .018 445 | 2879.5 | 3156.2 | 6.1404 | .015 174 | 2844.2 | 3109.7 | 6.0184 | .012 695 | 2806.2 | 3060.1 | 5.9017 |
| 500 | .020 80 | 2996.6 | 3308.6 | 6.3443 | .017 358 | 2970.3 | 3274.1 | 6.2383 | .014 768 | 2942.9 | 3238.2 | 6.1401 |
| 550 | .022 93 | 3104.7 | 3448.6 | 6.5199 | .019 288 | 3083.9 | 3421.4 | 6.4230 | .016 555 | 3062.4 | 3393.5 | 6.3348 |
| 600 | .024 91 | 3208.6 | 3582.3 | 6.6776 | .021 06 | 3191.5 | 3560.1 | 6.5866 | .018 178 | 3174.0 | 3537.6 | 6.5048 |
| 650 | .026 80 | 3310.3 | 3712.3 | 6.8224 | .022 74 | 3296.0 | 3693.9 | 6.7357 | .019 693 | 3281.4 | 3675.3 | 6.6582 |
| 700 | .028 61 | 3410.9 | 3840.1 | 6.9572 | .024 34 | 3398.7 | 3824.6 | 6.8736 | .021 13 | 3386.4 | 3809.0 | 6.7993 |
| 800 | .032 10 | 3610.9 | 4092.4 | 7.2040 | .027 38 | 3601.8 | 4081.1 | 7.1244 | .023 85 | 3592.7 | 4069.7 | 7.0544 |
| 900 | .035 46 | 3811.9 | 4343.8 | 7.4279 | .030 31 | 3804.7 | 4335.1 | 7.3507 | .026 45 | 3797.5 | 4326.4 | 7.2830 |
| 1000 | .038 75 | 4015.4 | 4596.6 | 7.6348 | .033 16 | 4009.3 | 4589.5 | 7.5589 | .028 97 | 4003.1 | 4582.5 | 7.4925 |
| 1100 | .042 00 | 4222.6 | 4852.6 | 7.8283 | .035 97 | 4216.9 | 4846.4 | 7.7531 | .031 45 | 4211.3 | 4840.2 | 7.6874 |
| 1200 | .045 23 | 4433.8 | 5112.3 | 8.0108 | .038 76 | 4428.3 | 5106.6 | 7.9360 | .033 91 | 4422.8 | 5101.0 | 7.8707 |
| 1300 | .048 45 | 4649.1 | 5376.0 | 8.1840 | .041 54 | 4643.5 | 5370.5 | 8.1093 | .036 36 | 4638.0 | 5365.1 | 8.0442 |
| <i>P</i> = 25.0 MPa | | | | <i>P</i> = 30.0 MPa | | | | <i>P</i> = 35.0 MPa | | | | |
| 375 | .001 973 1 | 1798.7 | 1848.0 | 4.0320 | .001 789 2 | 1737.8 | 1791.5 | 3.9305 | .001 700 3 | 1702.9 | 1762.4 | 3.8722 |
| 400 | .006 004 | 2430.1 | 2580.2 | 5.1418 | .002 790 | 2067.4 | 2151.1 | 4.4728 | .002 100 | 1914.1 | 1987.6 | 4.2126 |
| 425 | .007 881 | 2609.2 | 2806.3 | 5.4723 | .005 303 | 2455.1 | 2614.2 | 5.1504 | .003 428 | 2253.4 | 2373.4 | 4.7747 |
| 450 | .009 162 | 2720.7 | 2949.7 | 5.6744 | .006 735 | 2619.3 | 2821.4 | 5.4424 | .004 961 | 2498.7 | 2672.4 | 5.1962 |
| 500 | .011 123 | 2884.3 | 3162.4 | 5.9592 | .008 678 | 2820.7 | 3081.1 | 5.7905 | .006 927 | 2751.9 | 2994.4 | 5.6282 |
| 550 | .012 724 | 3017.5 | 3335.6 | 6.1765 | .010 168 | 2970.3 | 3275.4 | 6.0342 | .008 345 | 2921.0 | 3213.0 | 5.9026 |
| 600 | .014 137 | 3137.9 | 3491.4 | 6.3602 | .011 446 | 3100.5 | 3443.9 | 6.2331 | .009 527 | 3062.0 | 3395.5 | 6.1179 |
| 650 | .015 433 | 3251.6 | 3637.4 | 6.5229 | .012 596 | 3221.0 | 3598.9 | 6.4058 | .010 575 | 3189.8 | 3559.9 | 6.3010 |

Tabla A.7 Vapor de Agua Sobrecalentado (continuación)

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|---|------------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|------------|----------|----------|----------|
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <i>P</i> = 25.0 MPa <i>P</i> = 30.0 MPa <i>P</i> = 35.0 MPa </div> | | | | | | | | | | | | |
| 700 | .016 646 | 3361.3 | 3777.5 | 6.6707 | .013 661 | 3335.8 | 3745.6 | 6.5606 | .011 533 | 3309.8 | 3713.5 | 6.4631 |
| 800 | .018 912 | 3574.3 | 4047.1 | 6.9345 | .015 623 | 3555.5 | 4024.2 | 6.8332 | .013 278 | 3536.7 | 4001.5 | 6.7450 |
| 900 | .021 045 | 3783.0 | 4309.1 | 7.1680 | .017 448 | 3768.5 | 4291.9 | 7.0718 | .014 883 | 3754.0 | 4274.9 | 6.9886 |
| 1000 | .023 10 | 3990.9 | 4568.5 | 7.3802 | .019 196 | 3978.8 | 4554.7 | 7.2867 | .016 410 | 3966.7 | 4541.1 | 7.2064 |
| 1100 | .025 12 | 4200.2 | 4828.2 | 7.5765 | .020 903 | 4189.2 | 4816.3 | 7.4845 | .017 895 | 4178.3 | 4804.6 | 7.4057 |
| 1200 | .027 11 | 4412.0 | 5089.9 | 7.7605 | .022 589 | 4401.3 | 5079.0 | 7.6692 | .019 360 | 4390.7 | 5068.3 | 7.5910 |
| 1300 | .029 10 | 4626.9 | 5354.4 | 7.9342 | .024 266 | 4616.0 | 5344.0 | 7.8432 | .020 815 | 4605.1 | 5333.6 | 7.7653 |
| <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <i>P</i> = 40.0 MPa <i>P</i> = 50.0 MPa <i>P</i> = 60.0 MPa </div> | | | | | | | | | | | | |
| 375 | .001 640 7 | 1677.1 | 1742.8 | 3.8290 | .001 559 4 | 1638.6 | 1716.6 | 3.7639 | .001 502 8 | 1609.4 | 1699.5 | 3.7141 |
| 400 | .001 907 7 | 1854.6 | 1930.9 | 4.1135 | .001 730 9 | 1788.1 | 1874.6 | 4.0031 | .001 633 5 | 1745.4 | 1843.4 | 3.9318 |
| 425 | .002 532 | 2096.9 | 2198.1 | 4.5029 | .002 007 | 1959.7 | 2060.0 | 4.2734 | .001 816 5 | 1892.7 | 2001.7 | 4.1626 |
| 450 | .003 693 | 2365.1 | 2512.8 | 4.9459 | .002 486 | 2159.6 | 2284.0 | 4.5884 | .002 085 | 2053.9 | 2179.0 | 4.4121 |
| 500 | .005 622 | 2678.4 | 2903.3 | 5.4700 | .003 892 | 2525.5 | 2720.1 | 5.1726 | .002 956 | 2390.6 | 2567.9 | 4.9321 |
| 550 | .006 984 | 2869.7 | 3149.1 | 5.7785 | .005 118 | 2763.6 | 3019.5 | 5.5485 | .003 956 | 2658.8 | 2896.2 | 5.3441 |
| 600 | .008 094 | 3022.6 | 3346.4 | 6.0114 | .006 112 | 2942.0 | 3247.6 | 5.8178 | .004 834 | 2861.1 | 3151.2 | 5.6452 |
| 650 | .009 063 | 3158.0 | 3520.6 | 6.2054 | .006 966 | 3093.5 | 3441.8 | 6.0342 | .005 595 | 3028.8 | 3364.5 | 5.8829 |
| 700 | .009 941 | 3283.6 | 3681.2 | 6.3750 | .007 727 | 3230.5 | 3616.8 | 6.2189 | .006 272 | 3177.2 | 3553.5 | 6.0824 |
| 800 | .011 523 | 3517.8 | 3978.7 | 6.6662 | .009 076 | 3479.8 | 3933.6 | 6.5290 | .007 459 | 3444.5 | 3889.1 | 6.4109 |
| 900 | .012 962 | 3739.4 | 4257.9 | 6.9150 | .010 283 | 3710.3 | 4224.4 | 6.7882 | .008 508 | 3681.0 | 4191.5 | 6.6805 |
| 1000 | .014 324 | 3954.6 | 4527.6 | 7.1356 | .011 411 | 3930.5 | 4501.1 | 7.0146 | .009 480 | 3906.4 | 4475.2 | 6.9127 |
| 1100 | .015 642 | 4167.4 | 4793.1 | 7.3364 | .012 496 | 4145.7 | 4770.5 | 7.2184 | .010 409 | 4124.1 | 4748.6 | 7.1195 |
| 1200 | .016 940 | 4380.1 | 5057.7 | 7.5224 | .013 561 | 4359.1 | 5037.2 | 7.4058 | .011 317 | 4338.2 | 5017.2 | 7.3083 |
| 1300 | .018 229 | 4594.3 | 5323.5 | 7.6969 | .014 616 | 4572.8 | 5303.6 | 7.5808 | .012 215 | 4551.4 | 5284.3 | 7.4837 |

FUENTE: Reproducido con autorización, de Joseph H. Keenan, Frederick G. Kayes, Philip G. Hill y Joan G. Moore, *Steam Tables* (Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 1969).

Tabla A.8 Agua como Líquido Comprimido

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|----------|---------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|----------|
| | <i>P</i> = 5 MPa (263.99) | | | | <i>P</i> = 10 MPa (311.06) | | | | <i>P</i> = 15 MPa (342.24) | | | |
| Sat. | .001 285 9 | 1147.8 | 1154.2 | 2.9202 | .001 452 4 | 1393.0 | 1407.6 | 3.3596 | .001 658 1 | 1585.6 | 1610.5 | 3.6848 |
| 0 | .000 997 7 | .04 | 5.04 | .0001 | .000 995 2 | .09 | 10.04 | .0002 | .000 992 8 | .15 | 15.05 | .0004 |
| 20 | .000 999 5 | 83.65 | 88.65 | .2956 | .000 997 2 | 83.36 | 93.33 | .2945 | .000 995 0 | 83.06 | 97.99 | .2934 |
| 40 | .001 005 6 | 166.95 | 171.97 | .5705 | .001 003 4 | 166.35 | 176.38 | .5686 | .001 001 3 | 165.76 | 180.78 | .5666 |
| 60 | .001 014 9 | 250.23 | 255.30 | .8285 | .001 012 7 | 249.36 | 259.49 | .8258 | .001 010 5 | 248.51 | 263.67 | .8232 |
| 80 | .001 026 8 | 333.72 | 338.85 | 1.0720 | .001 024 5 | 332.59 | 342.83 | 1.0688 | .001 022 2 | 331.48 | 346.81 | 1.0656 |
| 100 | .001 041 0 | 417.52 | 422.72 | 1.3030 | .001 038 5 | 416.12 | 426.50 | 1.2992 | .001 036 1 | 414.74 | 430.28 | 1.2955 |
| 120 | .001 057 6 | 501.80 | 507.09 | 1.5233 | .001 054 9 | 500.08 | 510.64 | 1.5189 | .001 052 2 | 498.40 | 514.19 | 1.5145 |
| 140 | .001 076 8 | 586.76 | 592.15 | 1.7343 | .001 073 7 | 584.68 | 595.42 | 1.7292 | .001 070 7 | 582.66 | 598.72 | 1.7242 |
| 160 | .001 098 8 | 672.62 | 678.12 | 1.9375 | .001 095 3 | 670.13 | 681.08 | 1.9317 | .001 091 8 | 667.71 | 684.09 | 1.9260 |
| 180 | .001 124 0 | 759.63 | 765.25 | 2.1341 | .001 119 9 | 756.65 | 767.84 | 2.1275 | .001 115 9 | 753.76 | 770.50 | 2.1210 |
| 200 | .001 153 0 | 848.1 | 853.9 | 2.3255 | .001 148 0 | 844.5 | 856.0 | 2.3178 | .001 143 3 | 841.0 | 858.2 | 2.3104 |
| 220 | .001 186 6 | 938.4 | 944.4 | 2.5128 | .001 180 5 | 934.1 | 945.9 | 2.5039 | .001 174 8 | 929.9 | 947.5 | 2.4953 |
| 240 | .001 226 4 | 1031.4 | 1037.5 | 2.6979 | .001 218 7 | 1026.0 | 1038.1 | 2.6872 | .001 211 4 | 1020.8 | 1039.0 | 2.6771 |
| 260 | .001 274 9 | 1127.9 | 1134.3 | 2.8830 | .001 264 5 | 1121.1 | 1133.7 | 2.8699 | .001 255 0 | 1114.6 | 1133.4 | 2.8576 |
| 280 | | | | | .001 321 6 | 1220.9 | 1234.1 | 3.0548 | .001 308 4 | 1212.5 | 1232.1 | 3.0393 |
| 300 | | | | | .001 397 2 | 1328.4 | 1342.3 | 3.2469 | .001 377 0 | 1316.6 | 1337.3 | 3.2260 |
| 320 | | | | | | | | | .001 472 4 | 1431.1 | 1453.2 | 3.4247 |
| 340 | | | | | | | | | .001 631 1 | 1567.5 | 1591.9 | 3.6546 |

Tabla A.8 Agua como Líquido Comprimido (continuación)

| <i>T</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|----------|----------------------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|
| | <i>P</i> = 20 MPa (365.81) | | | | <i>P</i> = 30 MPa | | | | <i>P</i> = 50 MPa | | | |
| Sat. | .002 036 | 1785.6 | 1826.3 | 4.0139 | | | | | | | | |
| 0 | .000 990 4 | .19 | 20.01 | .0004 | .000 985 6 | .25 | 29.82 | .0001 | .000 976 6 | .20 | 49.03 | .0014 |
| 20 | .000 992 8 | 82.77 | 102.62 | .2923 | .000 988 6 | 82.17 | 111.84 | .2899 | .000 980 4 | 81.00 | 130.02 | .2848 |
| 40 | .000 999 2 | 165.17 | 185.16 | .5646 | .000 995 1 | 164.04 | 193.89 | .5607 | .000 987 2 | 161.86 | 211.21 | .5527 |
| 60 | .001 008 4 | 247.68 | 267.85 | .8206 | .001 004 2 | 246.06 | 276.19 | .8154 | .000 996 2 | 242.98 | 292.79 | .8052 |
| 80 | .001 019 9 | 330.40 | 350.80 | 1.0624 | .001 015 6 | 328.30 | 358.77 | 1.0561 | .001 007 3 | 324.34 | 374.70 | 1.0440 |
| 100 | .001 033 7 | 413.39 | 434.06 | 1.2917 | .001 029 0 | 410.78 | 441.66 | 1.2844 | .001 020 1 | 405.88 | 456.89 | 1.2703 |
| 120 | .001 049 6 | 496.76 | 517.76 | 1.5102 | .001 044 5 | 493.59 | 524.93 | 1.5018 | .001 034 8 | 487.65 | 539.39 | 1.4857 |
| 140 | .001 067 8 | 580.69 | 602.04 | 1.7193 | .001 062 1 | 576.88 | 608.75 | 1.7098 | .001 051 5 | 569.77 | 622.35 | 1.6915 |
| 160 | .001 088 5 | 665.35 | 687.12 | 1.9204 | .001 082 1 | 660.82 | 693.28 | 1.9096 | .001 070 3 | 652.41 | 705.92 | 1.8891 |
| 180 | .001 112 0 | 750.95 | 773.20 | 2.1147 | .001 104 7 | 745.59 | 778.73 | 2.1024 | .001 091 2 | 735.69 | 790.25 | 2.0794 |
| 200 | .001 138 8 | 837.7 | 860.5 | 2.3031 | .001 130 2 | 831.4 | 865.3 | 2.2893 | .001 114 6 | 819.7 | 875.5 | 2.2634 |
| 220 | .001 169 3 | 925.9 | 949.3 | 2.4870 | .001 159 0 | 918.3 | 953.1 | 2.4711 | .001 140 8 | 904.7 | 961.7 | 2.4419 |
| 240 | .001 204 6 | 1016.0 | 1040.0 | 2.6674 | .001 192 0 | 1006.9 | 1042.6 | 2.6490 | .001 170 2 | 990.7 | 1049.2 | 2.6158 |
| 260 | .001 246 2 | 1108.6 | 1133.5 | 2.8459 | .001 230 3 | 1097.4 | 1134.3 | 2.8243 | .001 203 4 | 1078.1 | 1138.2 | 2.7860 |
| 280 | .001 296 5 | 1204.7 | 1230.6 | 3.0248 | .001 275 5 | 1190.7 | 1229.0 | 2.9986 | .001 241 5 | 1167.2 | 1229.3 | 2.9537 |
| 300 | .001 359 6 | 1306.1 | 1333.3 | 3.2071 | .001 330 4 | 1287.9 | 1327.8 | 3.1741 | .001 286 0 | 1258.7 | 1323.0 | 3.1200 |
| 320 | .001 443 7 | 1415.7 | 1444.6 | 3.3979 | .001 399 7 | 1390.7 | 1432.7 | 3.3539 | .001 338 8 | 1353.3 | 1420.2 | 3.2868 |
| 340 | .001 568 4 | 1539.7 | 1571.0 | 3.6075 | .001 492 0 | 1501.7 | 1546.5 | 3.5426 | .001 403 2 | 1452.0 | 1522.1 | 3.4557 |
| 360 | .001 822 6 | 1702.8 | 1739.3 | 3.8772 | .001 626 5 | 1626.6 | 1675.4 | 3.7494 | .001 483 8 | 1556.0 | 1630.2 | 3.6291 |
| 380 | | | | | .001 869 1 | 1781.4 | 1837.5 | 4.0012 | .001 588 4 | 1667.2 | 1746.6 | 3.8101 |

FUENTE: Reproducido con autorización, de Joseph H. Keenan, Frederick G. Kayes, Philip G. Hill y Joan G. Moore, *Steam Tables* (Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 1969).