

RUIZ MARCOS - MAQUINAS TERMICAS. -

UNIDAD TEMATICA N° 5: Turbinas de Vapor. -

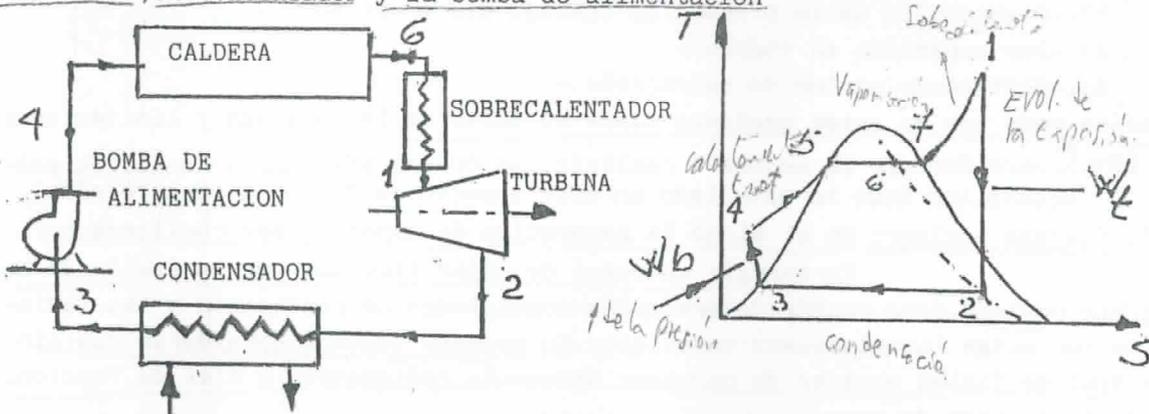
5-1).-GENERALIDADES: Las Turbinas de Vapor son Máquinas Térmicas de Fluidos y dentro de las mismas TURBOMAQUINAS MOTORAS. La sustancia de trabajo es vapor de agua sobrecalentado o recalentado. Esta condición es de fundamental importancia, porque si el vapor fuera saturado húmedo, al expandirse en la turbina se forman gotas de agua, cuya implosión tiene un efecto abrasivo sobre los álabes de la misma. -

Una turbina de vapor, es uno de los elementos físicos necesarios para la realización de un Ciclo de Trabajo, que permite transformar la energía en forma de calor en energía en forma de trabajo, que se entrega al medio exterior, precisamente a través del eje de la misma (trabajo de circulación, técnico o en el eje). -

Si bien en la bibliografía existente sobre el tema se refieren a "Ciclos Convencionales y Nucleares", es más racional considerar "Sistema convencional" y "Sistema Nuclear", ya que en ambos la Turbina funciona según el ciclo de Rankine o de Hirn. La diferencia entre ambos sistemas, es que en el primero, se produce vapor utilizando energía en forma de calor liberada por combustión de un combustible industrial y en el segundo por la fisión de un combustible nuclear

5-1-1).-Sistema Convencional: Se lo utiliza para: a) generar únicamente energía eléctrica, en las denominadas "Centrales Electricas" y b) para generar energía eléctrica y procesos industriales, que en este caso se denominan "Centrales Combinadas; Mixtas ó Termoeléctricas. -

Los elementos físicos básicos del sistema convencional son los indicados en la Unidad Temática n° 1 (lámina 1-7), es decir la caldera; el sobrecalentador la turbina; el condensador y la bomba de alimentación



De acuerdo a lo estudiado en Termodinámica Técnica, en un diagrama T-S el área encerrada por el ciclo, representa la energía en forma de calor que se entrega como trabajo al medio exterior a través de la Turbina. En el diagrama anterior tenemos: 1-2 evolución de la expansión teórica; 2-3, el proceso de condensación; 3-4, la elevación de la energía en forma de presión; 4-5, el calentamiento del agua hasta la temperatura de saturación; 5-6, el proceso de vaporización; 6-7, la finalización del proceso de vaporización; 7-1, el sobrecalentamiento. El área a-3-2-b, indica la energía en forma de calor no utilizada, es decir la que se transforma en energía. Este calor se lo puede utilizar en procesos de acondicionamiento de aire (calefacción en invierno), y/o en procesos industriales. En ambos casos el condensador se sustituye por lo que se denomina "Unidad de Utilización", específica para cada caso (calefactor; evaporador, etc) Con esta disposición, si bien no aumenta el rendimiento térmico del ciclo, se aumenta el "coeficiente de utilización", que se expresa por la relación entre el total de energía en forma de calor utilizada y la aportada al ciclo:

...///

$$K = \frac{\text{Calor utilizado}}{\text{Calor aportado}}$$

Su valor puede llegar hasta el 80 %. En los establecimientos industriales, donde se genera energía eléctrica y el vapor se utiliza para determinados procesos de transformación, se debe realizar un balance técnico-económico, para establecer si no es conveniente "comprar energía eléctrica" y únicamente generar la que de el vapor de escape necesario para el proceso industrial, o directamente no hacer funcionar la turbina y generar vapor humedo a baja presión.-

De acuerdo a lo estudiado en Termodinamica Tecnica en la práctica, la expansión (ciclo real) en la turbina NO es adiabática-isoentrópica, sino adiabática-no isoentrópica, debiendo considerar en esta caso un rendimiento interno de la máquina termica, llamado tambien rendimiento entalpico, que se expresa por la relación entre el trabajo realmente obtenido y el teórico.-

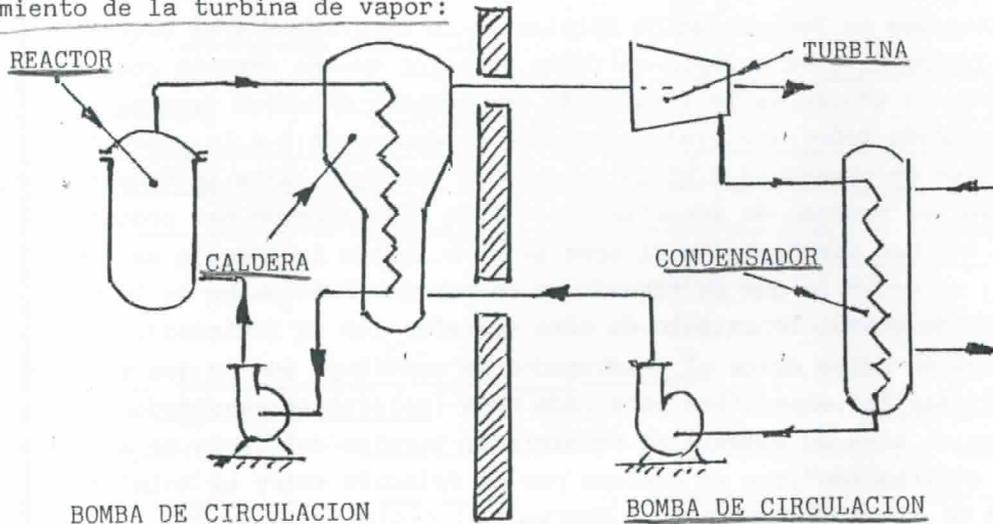
En las centrales que funcionan según el sistema convencional, el costo del combustible, representa, en términos generales, el 40 % del costo de funcionamiento total. Por tal motivo toda acción que signifique reducción de su consumo, será un beneficio económico. A tal efecto se utilizan intercambiadores de calor que por la naturaleza de los fluido que intervienen se denominan "Economizadores", que aprovechan el calor que aún llevan los humos después de su paso por el sobrecalentador. Los más utilizados son los que se emplean para precalentar el agua de alimentación de la Caldera, hasta la temperatura de saturación, y para calentar el aire que se envia al hogar ,necesario para la combustión.

El rendimiento térmico del ciclo, como ya se estudio en Termodinamica Tecnica, puede lograrse por algunas de las siguientes acciones:

- a).-Aumento de la presión de trabajo en la caldera.-
- b).-Disminución de la presión de trabajo del condensador.-
- c).-Por expansión en etapas.-
- d).-Utilizando ciclos de extracción.-

Logicamente cada una de estas acciones tiene su costo de instalación y limitaciones. Por lo tanto para decidir la mejora a realizar, se deberá efectuar un análisis económico ( actualizar todo lo estudiado en este aspecto en Termodinamica Tecnica)

5-1-2 ).-Sistema nuclear: En el mismo la generación de vapor al ser realizada, por la energía en forma de calor liberada por la fisión de un combustible nuclear, debe reunir determinadas condiciones de protección a las radiaciones, lo que exige instalaciones especiales. En general debemos considerar dos circuitos: a) El de fisión nuclear de caracter altamente radioactivo y b) el de funcionamiento de la turbina de vapor:



Circuito de fisión nuclear

Circuito de funcionamiento de la turbina

...///a).-Circuito de fisión nuclear; Sus elementos básicos son: a) reactor nuclear b) caldera de vapor y c) bomba de circulación

a).-Reactor Nuclear: Es el dispositivo donde se inicia, mantiene y regula el proceso de fisión nuclear y se recupera el calor generado. En el mismo debemos considerar 1) el combustible nuclear utilizado 2) el moderador 3) el refrigerante 4) el regulador o sistema de control y 5) el sistema de protección. Como ya mencionamos anterior (U.T. n° 2 -apartado 2-10) existen distintos de reactores de acuerdo al tipo de moderador y/o refrigerante que utiliza.-

1-1)Combustible Nuclear: Se utiliza Uranio natural purificado en forma de dióxido de Uranio ( $UO_2$ ) o Uranio enriquecido (2 a 4% de  $U^{235}$ ).-

1-2)Moderador: Tiene por velocidad regular la velocidad de los neutrones generados en la fisión (pasarlos de neutrones rápidos a lentos o termicos) Se utiliza agua pesada (Deuterium) o grafito.-

1-3)Refrigerante: Tiene dos finalidades. Por una parte mantener la temperatura conveniente del reactor y elementos combustibles y por la otra absorber el calor generado en la fisión y transportarlo a la caldera, donde se lo utiliza para producir el vapor de agua. El refrigerante utilizado debe tener un alto coeficiente de transmisión térmica y alto calor específico, para que no sea necesario utilizar un gran caudal del mismo, y que no absorba electrones ni tampoco ser radioactivo, ni descomponerse. Los más utilizados con el agua pesada y el anhídrido carbónico. Puede utilizarse agua común, pero en este caso se debe extremar el mantenimiento de los equipos, ya que puede tener un carácter corrosivo al liberar oxígeno

1-4)Regulador o sistema de control: Su misión es disminuir o aumentar el proceso de fisión en función de la demanda, y en el caso extremo detener el proceso. Es decir se debe utilizar un elemento que absorba neutrones. A tal efecto los más utilizados son el cadmio y el cobalto, que se intercala en forma de barra entre los elementos combustibles (que contienen el combustible nuclear).-

1-5)Sistema de protección: Comprende todos los dispositivos que se utilizan para evitar los efectos de las radiaciones (protección biológica) utilizándose comunmente un muro de hormigón de gran espesor rodeado de un blindaje metálico.-

b).-Caldera de vapor: Reune características especiales que las hace diferente a las estudiadas anteriormente (U.T. n° 3) Normalmente son de tubos verticales por cuyo interior circula el refrigerante, y sin domo.

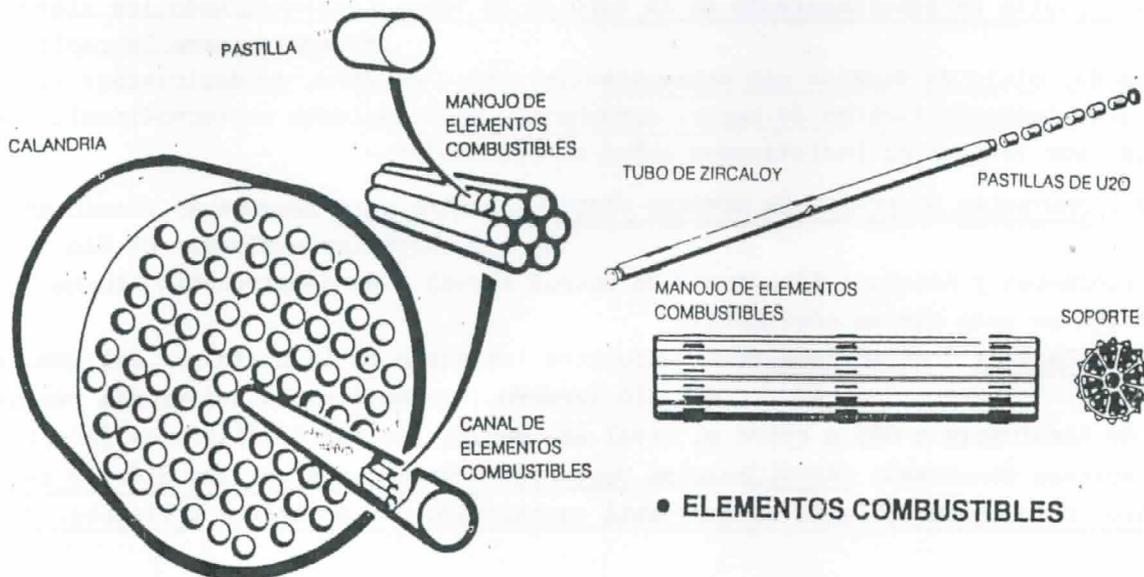
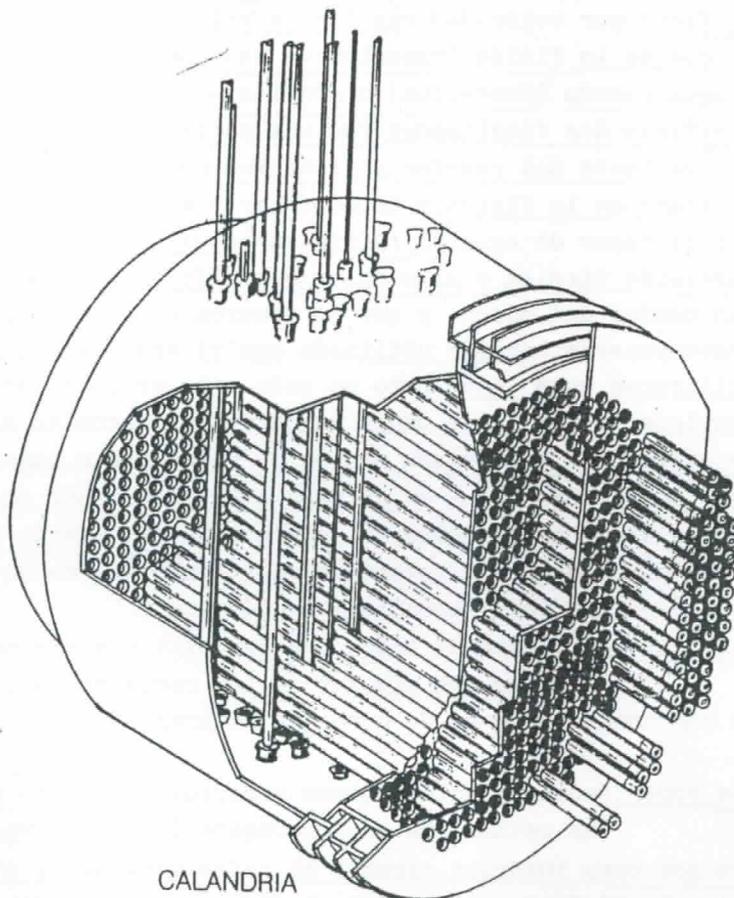
c).-Bombas de circulación Como su nombre lo indica tienen por finalidad el movimiento del refrigerante (Deben reunir condiciones especiales de protección) y del condensado

b).-Circuito de funcionamiento de la turbina de vapor: Comprende todo los elementos necesarios para la realización del ciclo de Rankine con sobrecalentamiento o de Hirn, es decir: sobrecalentador; recalentador; turbina de vapor, condensador, ya estudiados en termodinámica técnica, por lo cual no insistiremos sobre el particular.-

5-2).-CENTRALES NUCLEARES EN NUESTRO PAIS: En nuestro país tenemos en funcionamiento las centrales nucleares de Rio Tercero (Cordoba) y Atucha I (provincia de Buenos Aires) y en construcción Atucha II, también en esta última provincia.-

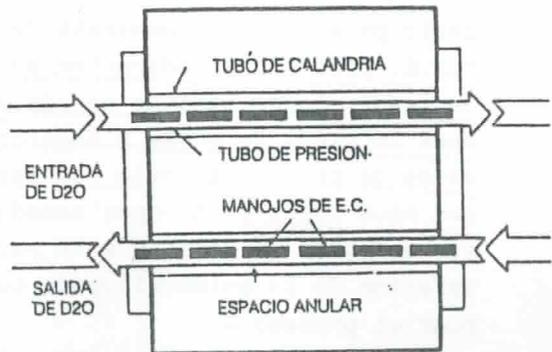
5-2-1)-Central Nuclear Embalse: Se encuentra instalada en la costa sur del Embalse del Río Tercero (Cordoba), en la denominada península de Almafuerte a 665 m sobre el nivel del mar. El reactor utilizado es de origen Canadiense denominado CANDU (Canadiam Deuterium Uranium), que utiliza dióxido de Uranio, como combustible. El reactor está constituido por un tanque cilíndrico, dis-

...///puesto horizontalmente denominado "calandria", de acero inoxidable, que interiormente lleva 380 canales, constituidos por dos tubos concéntricos, entre los que existe un espacio anular. El tubo interior se denomina de presión y el exterior tubo de calandria. El espacio anular se llena con anhídrido carbónico, que actúa como aislamiento térmico. En el tubo interior se colocan los elementos combustibles, que contienen las pastillas de dióxido de Uranio. Exteriormente los canales se encuentran rodeados del moderador (agua pesada). Por el tubo interior y embebiendo exteriormente los manojos de elementos combustibles, circula el refrigerante (agua pesada), que efectúa la transferencia térmica desde el combustible nuclear cuando éste fisiona, hacia el sistema secundario de generación de vapor.-



...///

**CORTE LONGITUDINAL DE LOS CANALES**

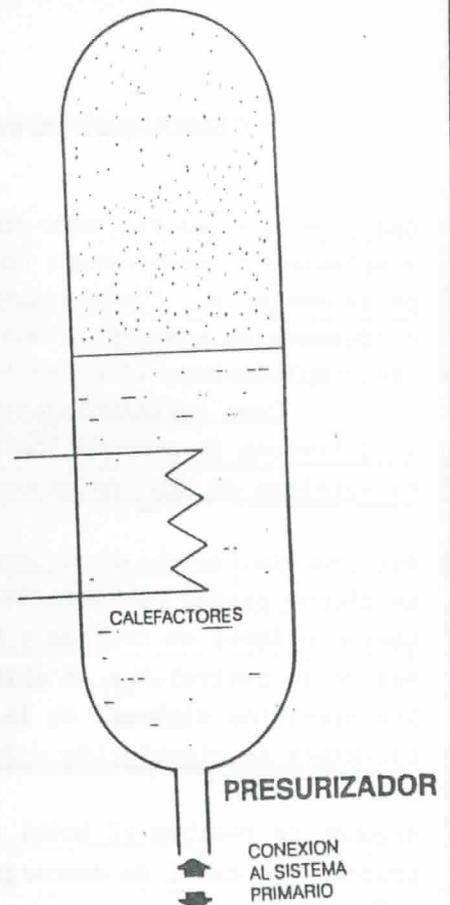


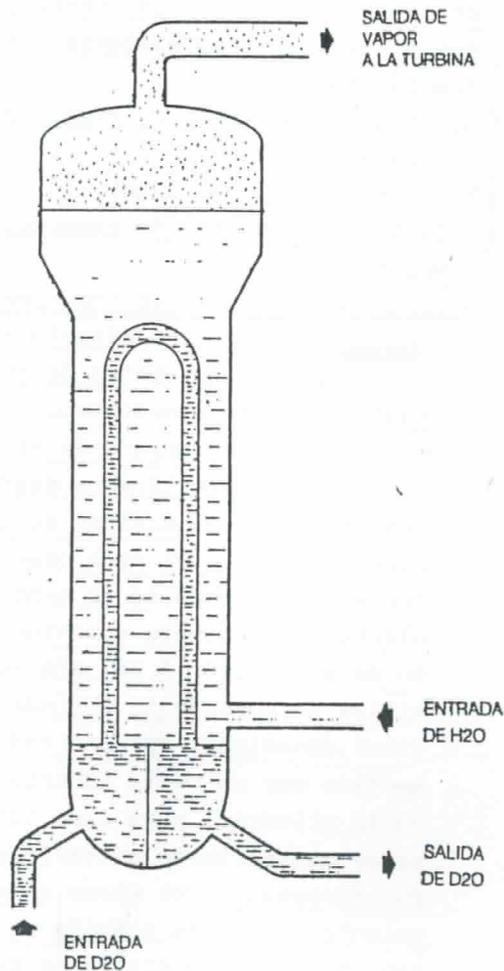
En la instalación de la Central, debemos distinguir tres sistemas o circuitos básicos:

- a).-Sistema primario de transporte de calor.-
- b).-Sistema del moderador.-
- c)Sistema secundario de generación de vapor.-

a).-Sistema primario de transporte de calor: Es por donde circula el agua pesada que actúa de refrigerante, que como mencionamos anteriormente, es la encargada de efectuar la transferencia térmica desde el reactor hacia el sistema secundario. Para evitar que el agua pesada entre en ebullición, se la mantiene a cierta presión, para aumentar su punto de ebullición. A tal efecto se utiliza un recipiente cilíndrico vertical, denominado "presurizador", conectado por su parte inferior al circuito primario, y en cuyo interior posee calefactores eléctricos. El funcionamiento del mismo es el siguiente: Cuando la presión en el sistema primario desciende, se conectan

automáticamente los calefactores eléctricos y parte del agua pesada, contenida en el presurizador, se vaporiza. El vapor generado, forma un "colchón" en la parte superior, manteniendo la presión en el circuito. Cuando la presión adquiere su valor normal, se desconectan los calefactores y el vapor, se descarga automáticamente, a través de válvulas especiales, hacia un recipiente denominado "desgasificador-condensador", de donde se lo envía al circuito primario. El agua pesada que absorbe el calor de fisión se envía a las calderas, que son recipientes cilíndricos, que en su interior tienen tubos en U. Por el interior de los mismos circula el agua pesada y a través de sus paredes se realiza la transferencia térmica hacia el agua del sistema secundario que los rodea exteriormente. Desde la parte inferior de la caldera, el agua pesada que ya ha entregado su energía térmica es impulsada nuevamente hacia los canales de los elementos combustibles, completando su recorrido, dentro de un circuito que lo denominan "loop" del sistema primario.-





**GENERADOR DE VAPOR**

b).-Sistema del moderador:El sistema del moderador,es un circuito cerrado por donde circula el agua pesada que rodea a los tubos concéntricos de la calandria.Como el material de los tubos concéntricos practicamente no absorben neutrones,los generados en la fisión los atraviesan alcanzando el agua pesada, produciendose el efecto moderador.Con el nivel adecuado de energía (neutrones térmicos) vuelven a incidir sobre los elementos combustibles y de esta manera continuar el proceso de fisión,necesario para el funcionamiento del reactor.El proceso de moderación aumenta la temperatura del agua pesada,por lo cual la misma se envia a intercambiadores de calor,que están refrigerados con agua del lago.EL agua pesada una vez enfriada es enviada a la parte / inferior de la calandria,para continuar el proceso.-

c).-Sistema secundario de generación de vapor:Comprende todos los dispositivos por donde circula agua común des mineralizada,que reúne esta condición para evitar la corrosion del material que se encuentra en contacto con la misma.Esta agua en transformada en la caldera en vapor para el funcionamiento de la turbina,que tiene una etapa de alta presión y tres de baja presión.Entre una y otras están colocados separadores de hume

dad y recalentadores,para disminuir el contenido porcentual de humedad del vapor y aumentar su temperatura entre etapas,El vapor luego de su expansión en cada etapa se envia a condensadores verticales,refrigerados por agua del lago.El agua condensada es bombeada a una serie de economizadores y posteriormente a las calderas,completándose el circuito del sistema secundario.-

Como instalaciones complementarias se tiene:a)Sistema de agua de procesos y b) Sistema de circulación y canal de descarga.-

a).-Sistema de agua de procesos:Es el agua que se toma del lago y se hace circular por circuito cerrado y abiertos,según la necesidad del proceso.Los abiertos desagotan en el canal de descarga.En el circuito cerrado un cierto caudal proveniente de la línea principal es enviado a la planta de tratamiento,donde es tratada y desmineralizada, y luego enviada a los distintos sistemas de la central.Por el abierto circula el agua de refrigeración que se envia a los distintos sistemas de la central, que por su índole,así lo requieren.-

b).-Siste de circulación y descarga:En el primera circula el agua que se extrae del lago y se envía a los condensadores.En el segundo se reciben el total de agua procedentes del sistema de circulación y de procesos.El canal de descarga tiene una longitud de 7 km,para lograr el descenso

...///de la temperatura del agua que ha pasado por la central cumpliendo la acción de refrigerar equipos. Esta construido a cielo abierto.-

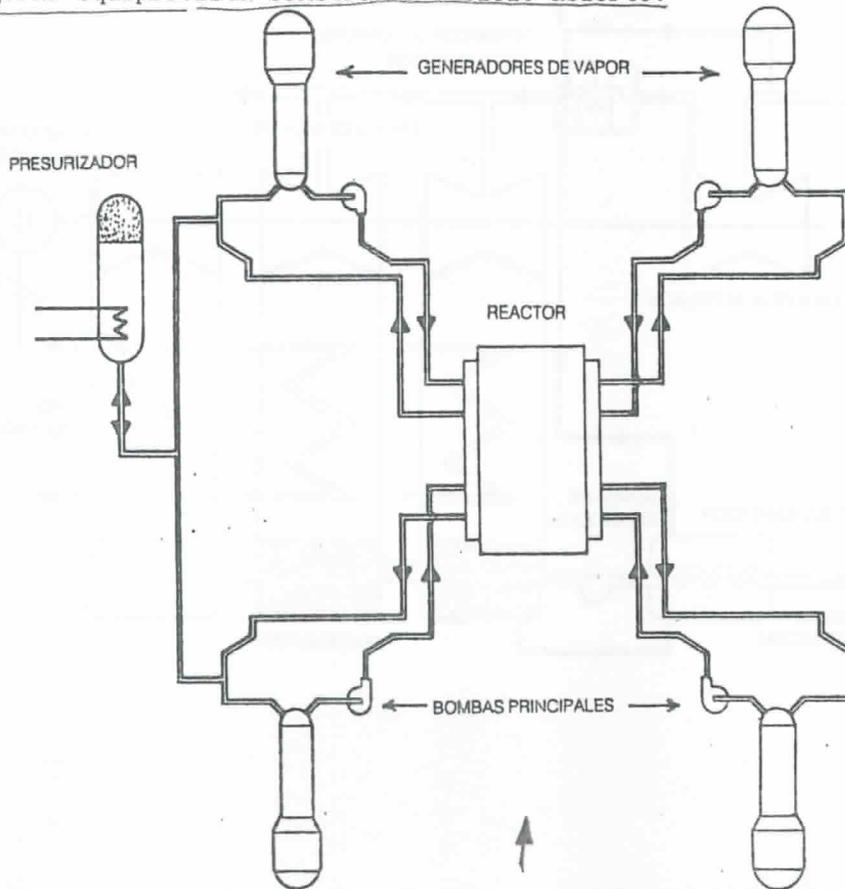


DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL SISTEMA PRIMARIO

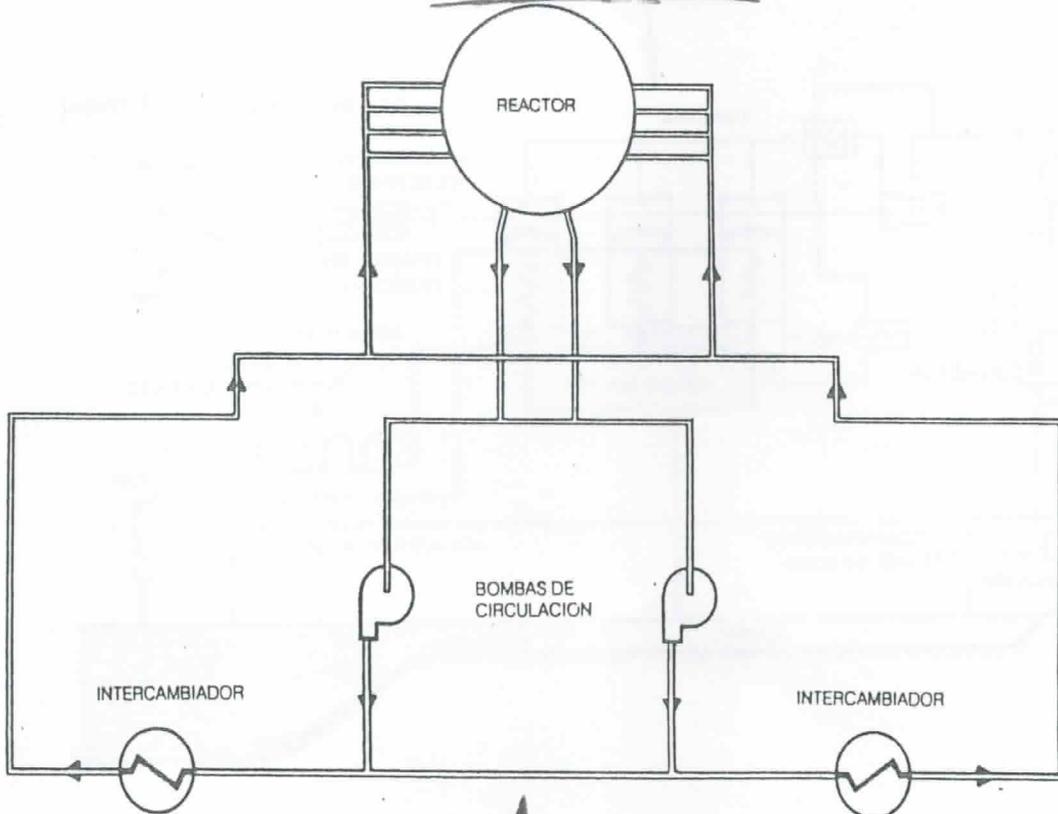
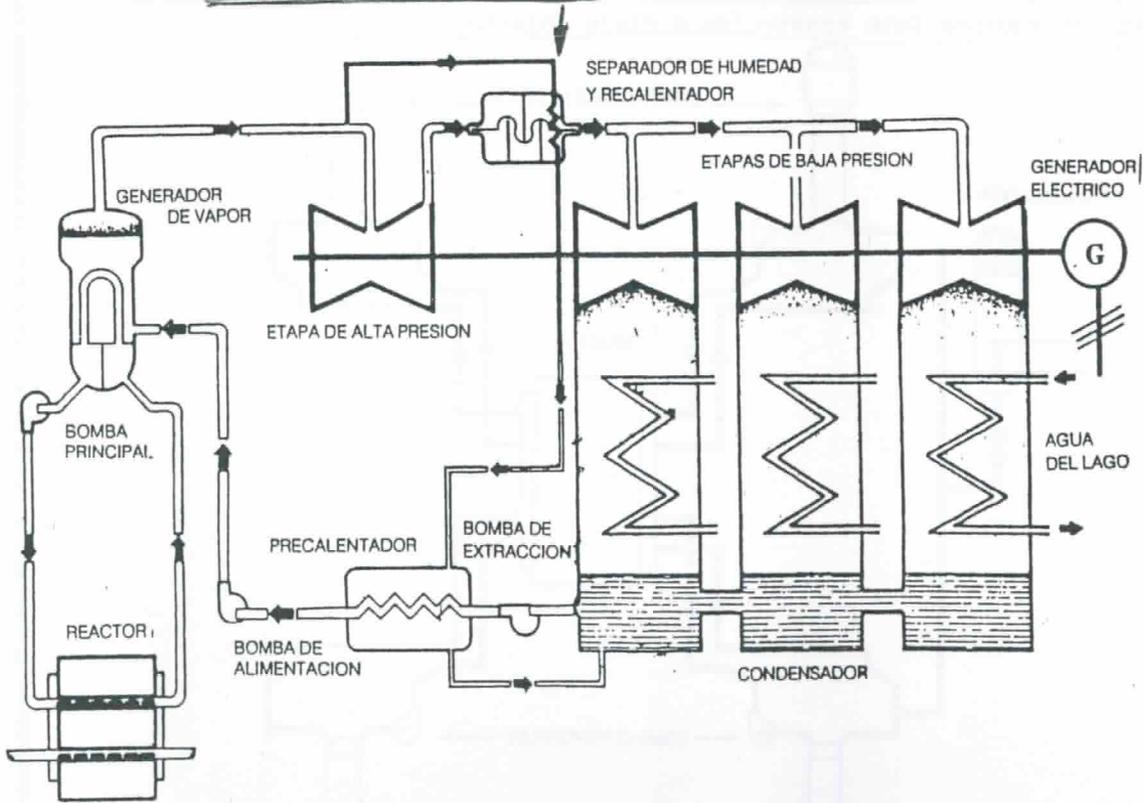


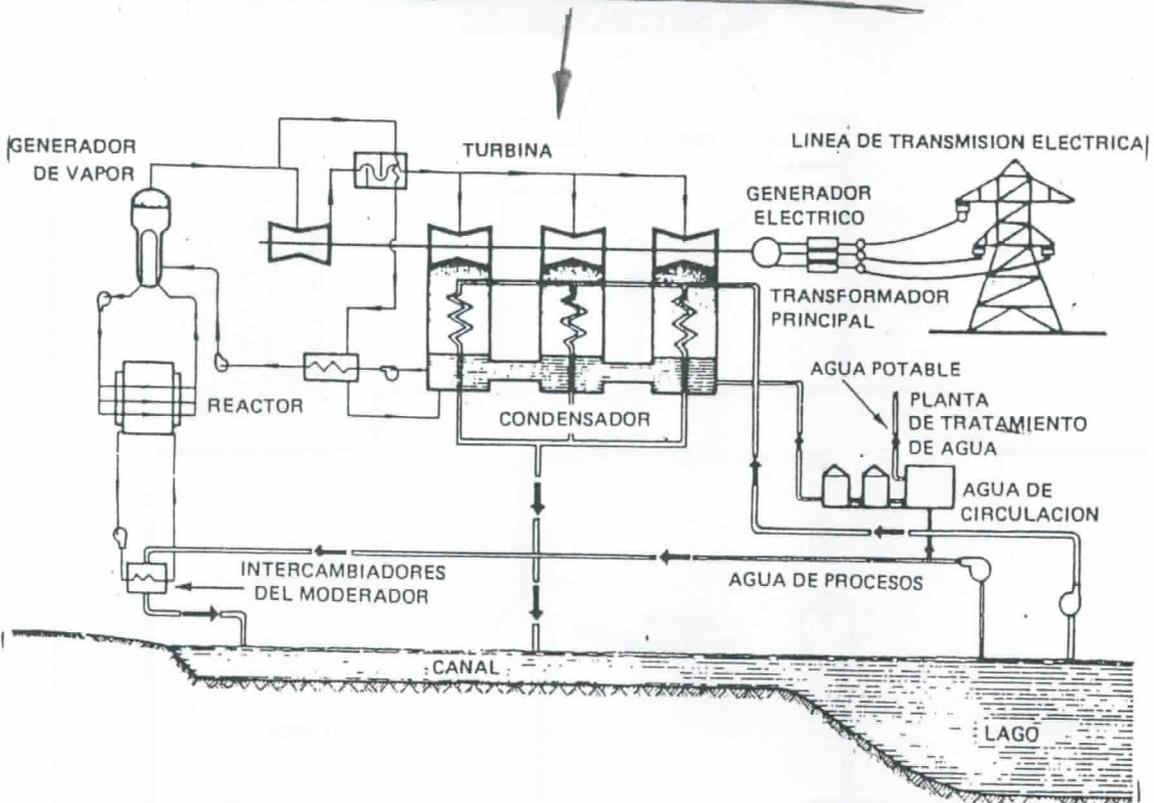
DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL MODERADOR

38

### ESQUEMA SIMPLIFICADO DEL SISTEMA SECUNDARIO



### ESQUEMA DE LOS SISTEMAS COMPLEMENTARIOS



.....////

SISTEMAS DE PROTECCION DE LA CENTRAL: Tienen por finalidad: a) Protección de los equipos, b) Protección del personal profesionalmente expuesto, c) Protección de los miembros del público visitante d) Protección del medio ambiente. Estos objetivos se cumplen con los siguientes sistemas: 1) Sistema de contención del edificio del reactor, 2) Sistema de rociado y reducción de la presión, 3) Sistema de refrigeración de emergencia del Núcleo, 4) Sistema de parada del reactor 5) Sistema asegurado de suministro de energía, 6) Sistema de suministro de energía de emergencia, 7) Sistema de suministro de agua de emergencia, 8) Sistema de aire de instrumentación, 9) Sala de Control Secundaria y 10) Área de exclusión.-

1) Sistema de contención del edificio del reactor: La construcción que contiene los componentes nucleares de mayor importancia (reactor, generadores de vapor y la mayoría de los auxiliares) opera, como se ha dicho, en depresión con respecto a la presión atmosférica, ya que forma parte de la zona controlada de la central. Al verificarse el mayor accidente previsible, descrito en (c), un conjunto de sensores, especialmente dispuestos, lo detectan. Como el edificio del reactor es un cilindro de hormigón hermético, ante esta situación se cierran mediante un sistema doble de válvulas todos los conductores desde y hacia el edificio del reactor, quedando así confinados los productos radioactivos que puedan producirse como consecuencia del accidente.

2) Sistema de rociado y reducción de la presión: El edificio del reactor presenta, en su parte superior, un gran tanque que contiene agua desmineralizada. Ocurrido el accidente una parte es inyectada en el núcleo del reactor para posibilitar su refrigeración y el resto es lanzada por tuberías, en forma de lluvia, para disminuir la temperatura y presión del edificio del reactor. Al mismo tiempo se logra el arrastre de una considerable cantidad de productos de fisión, removiendo los de la atmósfera del edificio.

3) Sistema de refrigeración de emergencia del Núcleo: En el caso que se viene describiendo también actuará un sistema que se denomina de Refrigeración de Emergencia del Núcleo y Recolección, que inyecta agua liviana a presión, para posibilitar la refrigeración de los elementos combustibles contenidos en el reactor.

El agua que ha pasado por el núcleo, cumpliendo su misión refrigerante, sale por la rotura del conducto del sistema primario y cae al fondo del edificio del reactor en un foso, desde donde se recolecta por medio de bombas y se inyecta nuevamente, en el núcleo del reactor, posibilitándose, de esta manera, la refrigeración del mismo en forma continua.

4) Sistema de parada del reactor: Los sistemas de parada ya descritos intervendrán, asimismo, para evitar que prosiga en forma autosostenida el proceso de fisión.

5) Sistema asegurado de suministro de energía: Está diseñado física y eléctricamente separado del resto de las fuentes de energía que alimentan los sistemas especiales de seguridad. Abastece a algunos lazos y controles de instrumentación necesarios para el control de los sistemas de la central en condiciones de emergencia. Está constituido por cuatro motores Diesel de 3550 KVA cada uno, redundantes al 100%.

6) Sistema de suministro de energía de emergencia: Está constituido por dos pequeños motores Diesel de arranque manual que proveen energía en el caso que se haya perdido totalmente el suministro de energía.

Esto podría ocurrir en caso de terremoto muy intenso. Tienen una potencia de 75 KVA cada uno y son redundantes.

7) Sistema de suministro de agua de emergencia: Está constituido por una fuente físicamente separada que suministra agua a los generadores de vapor en caso de que falle el agua de alimentación de reposición normal y que, simultáneamente, se produzca la rotura de un conducto principal del sistema primario de transporte de calor.

8) Sistema de Aire de Instrumentación: Alimenta los dispositivos que lo requieran y para su funcionamiento continuo el sistema cuenta con tanques pulmones que permiten una provisión ininterrumpida de aire, que suple las eventuales fallas de los suministros normales.

9) Sala de Control Secundaria: Está constituida por un área físicamente separada, desde la cual pueden controlarse los sistemas especiales de seguridad, en caso que un accidente severo torne inhabilitable la Sala de Control Principal.

10) Área de exclusión, restricciones al dominio: Por último, y con fines de protección, es de práctica establecer un área de exclusión, o restricciones al dominio de un radio aproximado de 1 km., con centro en el Edificio del Reactor.

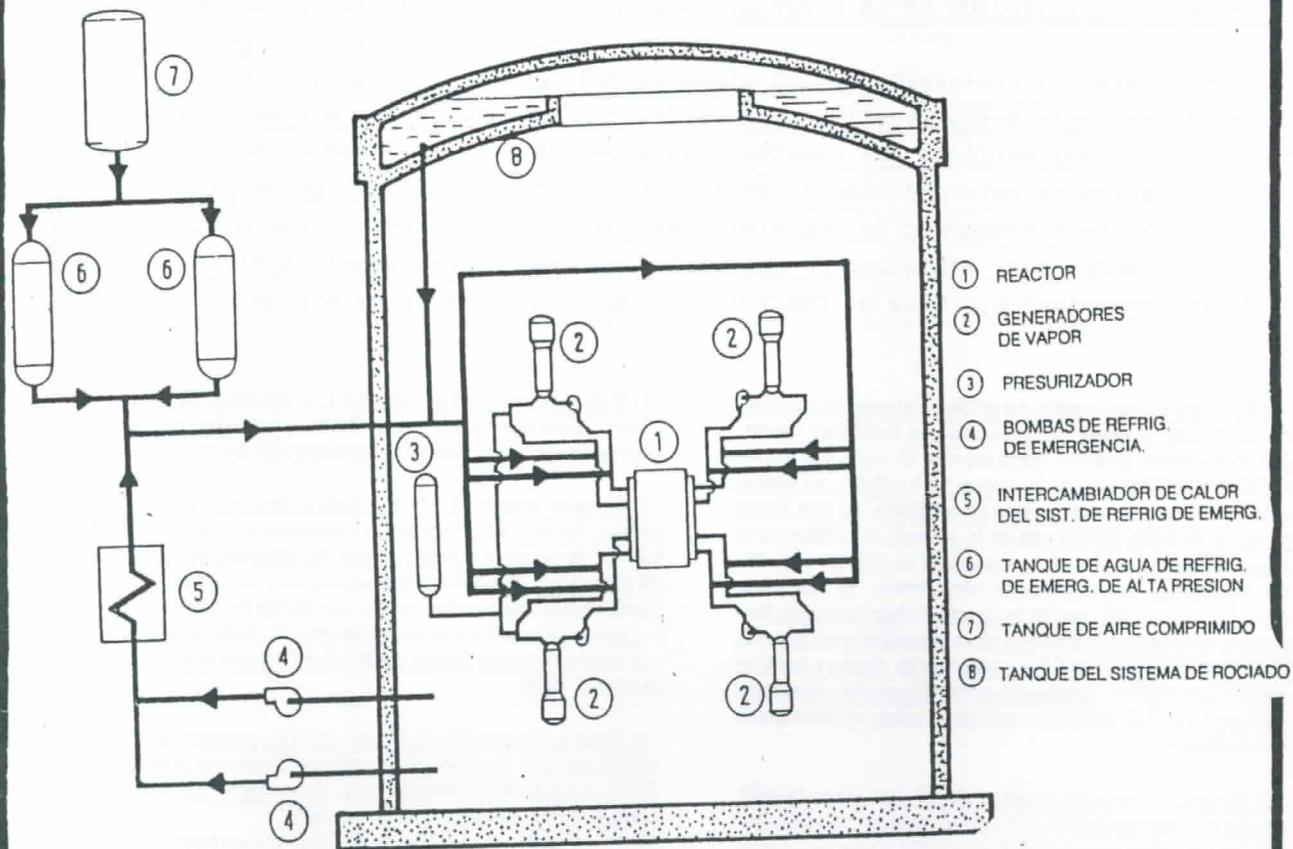
5-2-2).- Central Nuclear Atucha I: Esta instalada, en el pueblo de Lima, sobre el Paraná de las Palmas, a 100 km de la Capital Federal

Se trata de una central del tipo PHWR (pressurized water reactor) de agua a presión que trabaja con Uranio natural. El reactor con sus accesorios y el circuito primario, están instalados en un edificio de doble confinamiento, constituido por una esfera de acero a prueba de presión de 50 m. de diámetro, cubierta a su vez por una

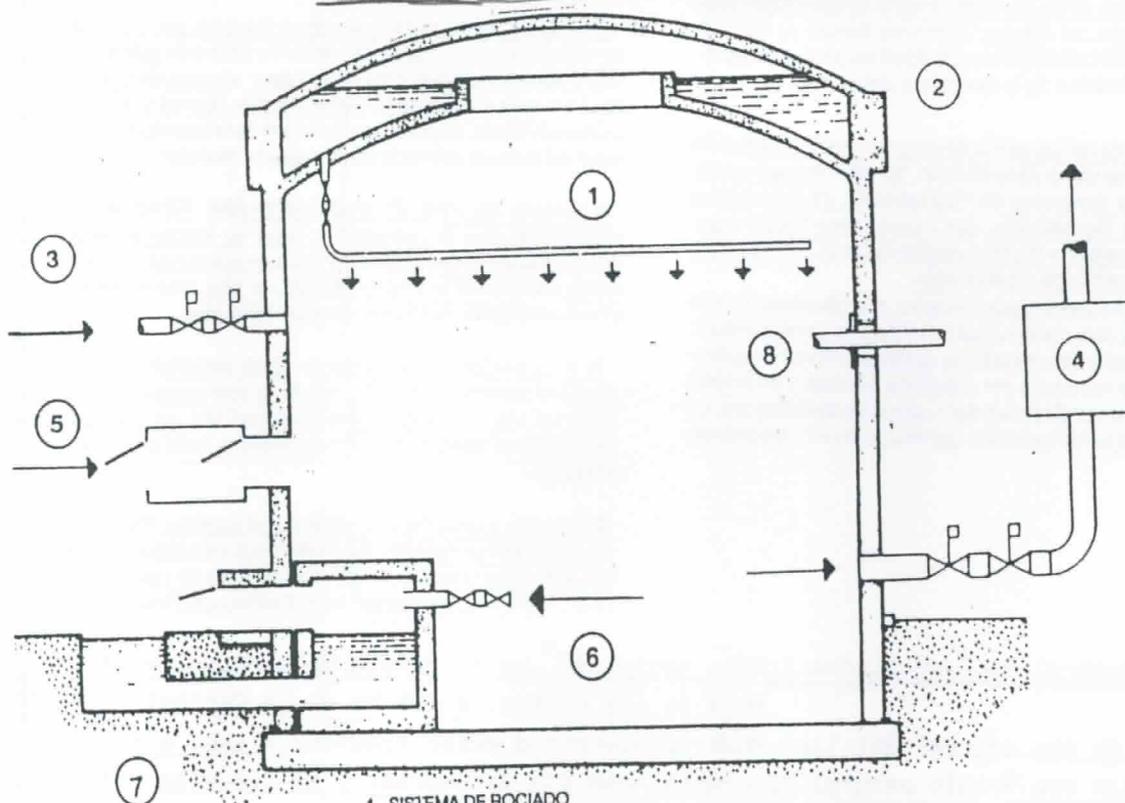
(continúa en pag.12)

100

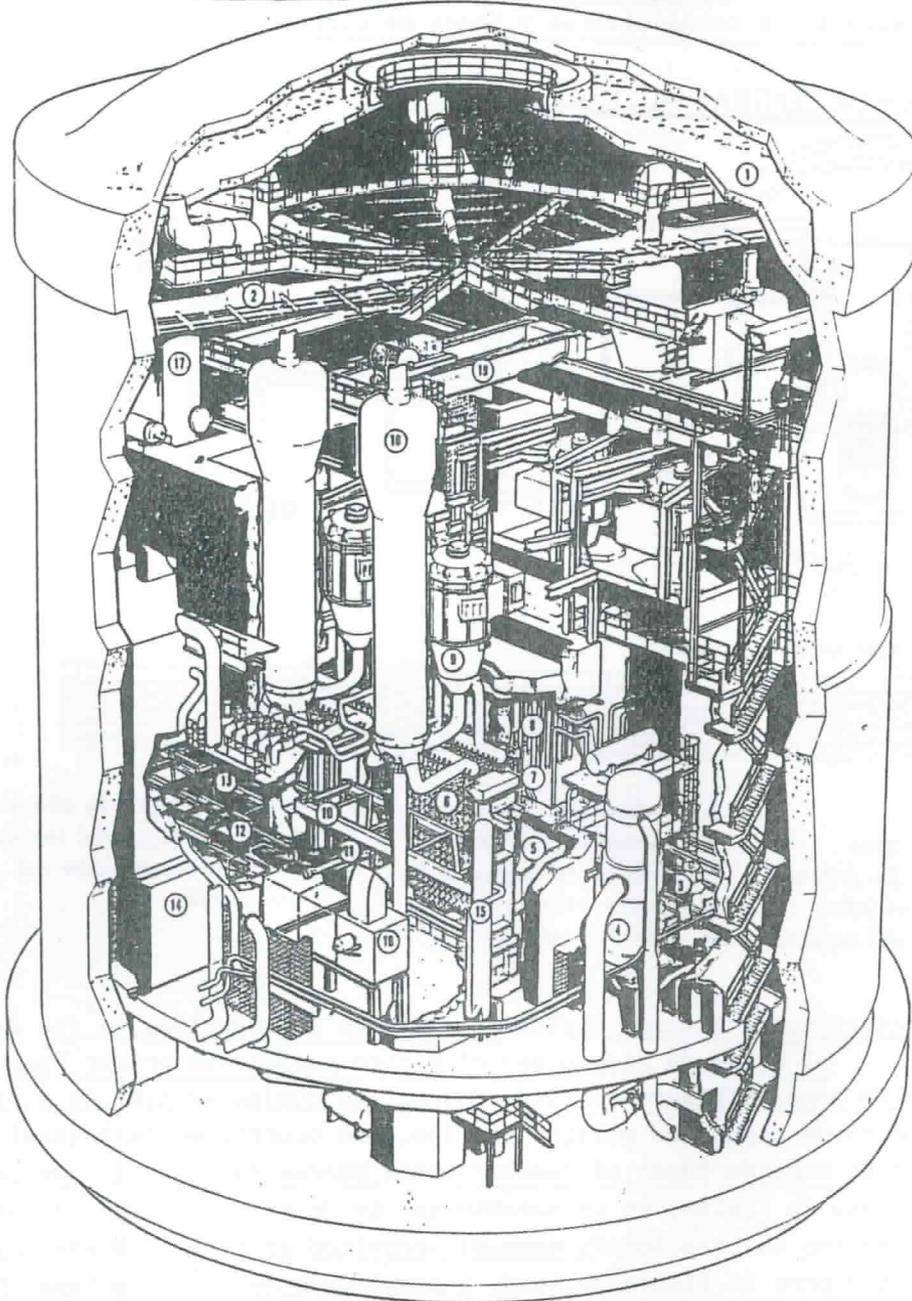
### SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE EMERGENCIA DEL NUCLEO



### SISTEMAS DE ROCIADO Y CONTENCIÓN



VISTA INTERIOR DEL EDIFICIO DEL REACTOR

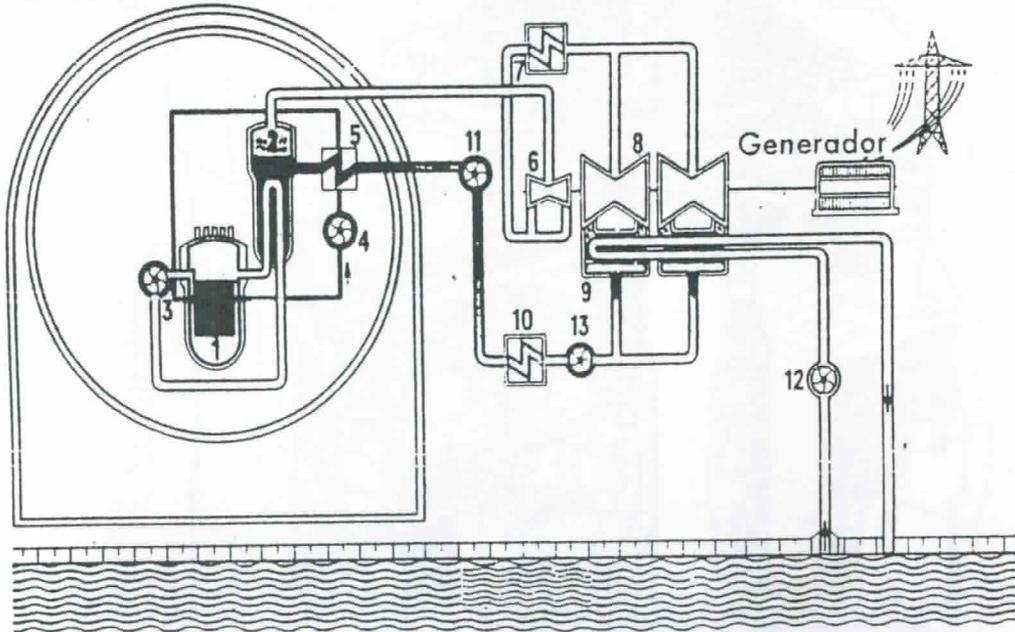


- 1) TANQUE DEL SISTEMA DE ROCIADO.
- 2) VALVULAS DEL SISTEMA DE ROCIADO.
- 3) BOMBA DEL MODERADOR.
- 4) INTERCAMBIADOR DE CALOR DEL MODERADOR
- 5) GABINETE DE ALIMENTADORES.
- 6) CARA DEL REACTOR
- 7) REACTOR
- 8) MECANISMOS DE REACTIVIDAD.
- 9) BOMBAS DEL SISTEMA PRIMARIO DE TRANSPORTE DE CALOR.
- 10) CARRO DE LA MAQUINA DE RECAMBIO.
- 11) MAQUINA DE RECAMBIO
- 12) CATENARIA DE LA MAQUINA DE RECAMBIO.
- 13) RECINTO DE MANTENIMIENTO DE LA MAQUINA DE RECAMBIO.
- 14) PUERTAS DEL RECINTO DE LA MAQUINA DE RECAMBIO.
- 15) TANQUE DE DECAIMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACION DE BLINDAJE
- 16) ENFRIADOR LOCAL DE AIRE
- 17) PRESURIZADOR.
- 18) GENERADOR DE VAPOR.
- 19) PUENTE GRUA.

(29)

...///, estructura de hormigón. El circuito secundario está constituido está constituido por una turbina de alta presión y dos de baja presión, con un recalentador intermedio; sus respectivos condensadores y bombas de circulación.

### CIRCUITOS DE LA CENTRAL NUCLEAR ATUCHA



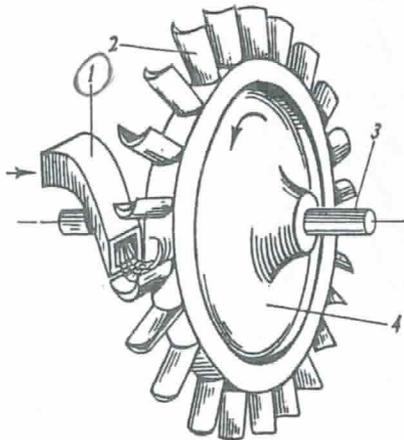
- |                                |                           |                                       |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 Reactor                      | 6 Turbina de alta presión | 11 Bomba de agua de alimentación      |
| 2 Generador de vapor           | 7 Separador de humedad    | 12 Bomba principal del refrigerante   |
| 3 Bomba del circuito primario  | 8 Turbina de baja presión | 13 Bomba de extracción del condensado |
| 4 Bomba del moderador          | 9 Condensador             |                                       |
| 5 Intercambiador del moderador | 10 Precalentador          |                                       |

Seguridad del reactor: Atucha I tiene distintos sistemas de seguridad, a fin de que el nivel de riesgo, sea el mínimo posible. En primer lugar el utilizar agua pesada como refrigerante, queda descartado cualquier tipo de accidente, que puede producirse cuando se utiliza grafito, como ocurrió en la central Ucraniana de Chernobyl. En segundo lugar el reactor tiene barras de control, que permite interrumpir el proceso de fisión, en el momento que se desee o lo ordene un sistema automático de protección del reactor. En caso de necesidad extrema se puede inyectar boro, que es un veneno para la fisión nuclear, y finalmente se puede también inundar el reactor con agua desmineralizada.-

5-2-3).-Central Nuclear Atucha II; También instalada en la localidad de Lima, todavía se encuentra (mayo 2000) en construcción. Será similar a Atucha I, pero con una Potencia Neta de 692 MW, en lugar de las 335 MW, que posee la primera.-

5-3).-TURBINAS DE VAPOR: Los antecedentes-registrados indican que el principio de funcionamiento de la turbina de vapor, ya que no existen referencia a que se obtuviera trabajo útil, fúe establecido por HERON utilizando un / dispositivo que consistía en un recipiente esférico, con dos salidas, opuestas entre si (toberas) que podía girar sostenida por dos soportes verticales. A través de estos últimos hacia llegar vapor obtenido en un recipiente, sometido a fuego directo. El vapor al salir por las toberas de la esfera, variaba su cantidad de movimiento y producía una reacción que hacía girar la esfera.-El segundo antecedente es la rueda de BRANCA, que hizo incidir vapor producido por calentamiento directo en un "busto" mélico, sobre una rueda dentada, provocando el giro de la misma.-

...///La primer turbina de vapor, de la que sí se obtuvo trabajo fué la inventada por el Ingeniero Sueco DE LAVAL, ante la necesidad de contar con un motor de accionamiento de elevada velocidad (no existían a esa fecha, porque los existentes tenían movimiento rectilíneo alternativo), para un "desnatador centrífugo", también de su invención. La misma consistía en un elemento fijo, a través del cual hacia incidir vapor a alta velocidad sobre aletas, que el lo denominaba "cazoletas o cangilones", fijas sobre la periferia de un elemento móvil (rotor). De acuerdo a lo estudiado en Termodinámica Técnica, el elemento fijo es una tobera, que transforma energía de presión en energía de velocidad, por disminución del contenido calorífico o entalpía del vapor:



-Turbina Laval o turbina de vapor de acción: 1) tobera; 2. álabes; 3. eje; 4. disco.

por a alta velocidad sobre aletas, que el lo denominaba "cazoletas o cangilones", fijas sobre la periferia de un elemento móvil (rotor). De acuerdo a lo estudiado en Termodinámica Técnica, el elemento fijo es una tobera, que transforma energía de presión en energía de velocidad, por disminución del contenido calorífico o entalpía del vapor:

$$H_2 - H_1 = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2}$$

la velocidad de entrada  $c_1$  es despreciable con respecto a la salida  $c_2$ . Con esta consideración se toma:

$$\frac{c_2^2}{2} = H_2 - H_1 \quad \text{de donde:}$$

$$c_2 = \sqrt{2 \Delta H}$$

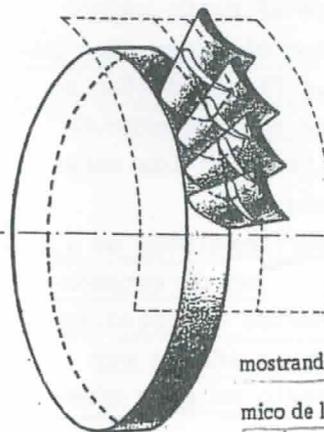
La forma constructiva de la turbina De Laval fue evolucionando con el avance de la tecnología hasta llegar a las turbinas actuales donde la tobera única fue sustituida por una corona fija, provista de álabes, donde el espacio comprendido entre dos consecutivos, constituye una tobera.

La primera modificación a la turbina De Laval, fue realizada por el ingeniero Ingles PEARSON, para que la expansión del vapor, que en la turbina de De Laval se produce únicamente en la tobera, continuara en la corona móvil (rotor). Con esta modificación, parte de la fuerza impulsora es provocada por variación de la cantidad de movimiento de la vena fluida y parte por reacción de la misma sobre el rotor.-

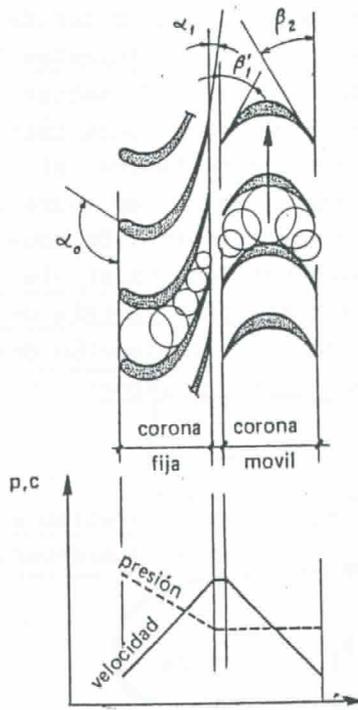
5-3-1) CLASIFICACION DE LAS TURBINAS DE VAPOR: El hecho que el movimiento del rotor se produzca por la fuerza impulsora generada por la variación de la cantidad de movimiento de la vena fluida exclusivamente (turbina de De Laval), o por reacción de la misma sobre los álabes del rotor (turbina de Pearson), llevo a clasificar a la misma en a) Turbina de ACCION, cuando la variación de presión (expansión), se produce únicamente en la tobera, permaneciendo constante en el rotor y b) Turbina de REACCION, cuando su variación continua en el rotor.-

Si consideramos un plano cilíndrico coaxial al eje de la turbina, lo desarrollamos y trazamos con respecto al mismo un diagrama que lleve en ordenadas valores de presión y de velocidad, y en abcisa de longitud axial del conjunto corona fija-corona móvil, que se denomina "escalonamiento", obtendremos la representación gráfica indicada en la pagina siguiente.-

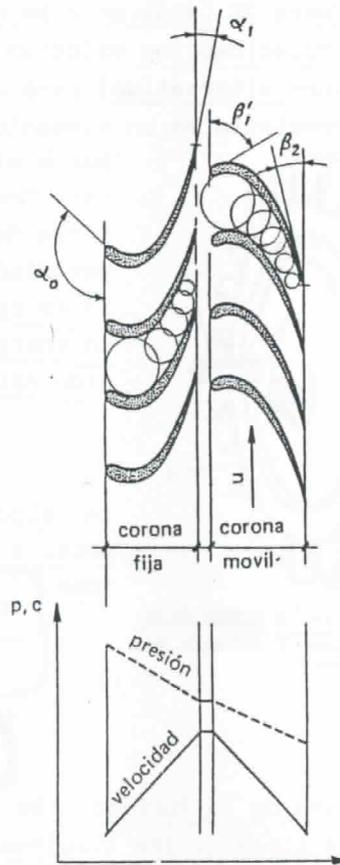
En las turbinas de acción al mantenerse constante el valor de la presión, la admisión del vapor puede ser parcial, a través de un determinada número de toberas del ar-



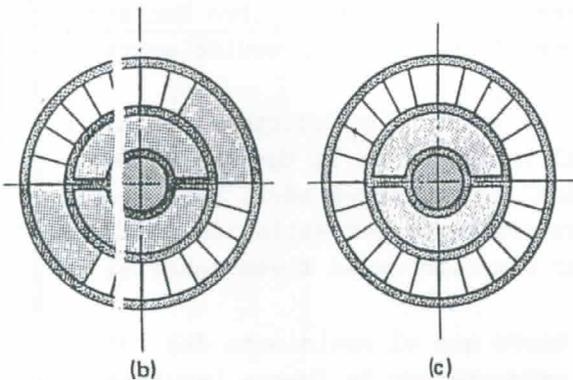
-Corona móvil de un escalonamiento de turbina axial, mostrando el perfil aerodinámico de los álabes.



-Desarrollo cilíndrico de un escalonamiento de acción: la corona móvil trabaja a presión constante.



...Desarrollo cilíndrico de un escalonamiento de reacción: La presión disminuye tanto en la corona fija como en la móvil, que no trabaja por tanto a presión constante.



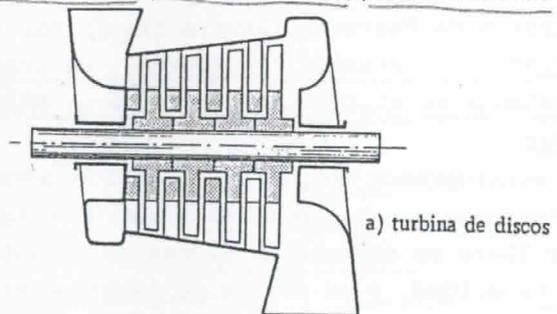
b) admisión parcial; c) admisión total.

pueden ser a) de disco y b) de tambor.-  
a).-Turbina de discos: en las mismas los álabes se fijan a discos individuales, montados en forma independiente sobre el eje. Los discos se separan entre sí, están separados por diafragma, con el juego mínimo para que pase el eje, a fin de evitar el pase del vapor entre eje y discos. Es el sistema más utilizado en los escalonamientos de acción.-

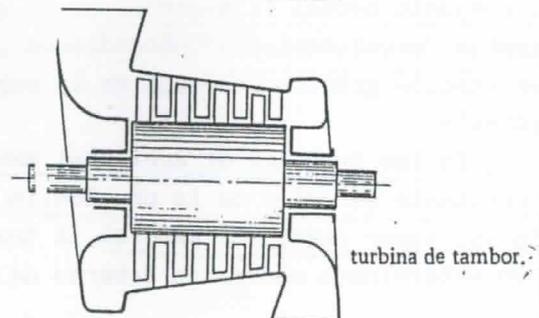
b).-Turbina de tambor: Los álabes se fijan directamente a un tambor cilíndrico o cónico. Este tipo de construcción se adapta muy bien cuando es necesario un gran número

...///,  $c_0$  de circunferencia, que se denomina "segmento de tobera". En las de acción la admisión es total, es decir en toda la circunferencia.-

Según como se fijan los álabes en el rotor (corona móvil), las turbinas



a) turbina de discos



turbina de tambor.

...//ro de escalonamiento, por lo cual este tipo de construcción se utiliza preferentemente en los escalonamientos de reacción.-

Tanto las turbinas de acción como las de reacción, se las agrupa también, sin que ello sea excluyente de las siguientes maneras:

a).-Según la presión de salida:

- de condensación, cuando la presión de salida de las mismas es menor que la presión atmosférica. Son las de mayor rendimiento y las que se utilizan preferentemente en las centrales eléctricas.-
- de escape libre, cuando la presión de salida es igual a la atmosférica.-
- de contrapresión: cuando la presión de salida es mayor que la atmosférica. Se las utiliza cuando el vapor de escape va a ser utilizado en otro proceso (industrial, de calefacción, etc)

b).-Según su conexión a la red de servicios:

- de superposición, cuando la entrada de la turbina esta conectada directamente a la red de alta presión.-
- de escape, cuando se utiliza vapor de baja presión proveniente de otro proceso

c).-Según la finalidad del vapor que se extrae de la turbina:

- de extracción no automática, cuando el vapor extraído se utiliza en la misma instalación,-
- de extracción automática: cuando el vapor se utiliza en otro proceso.-

5-3-2).-ECUACIONES DE EULER PARA LAS TURBINAS (de vapor y de gas) Al ser las TURBINAS, turbomáquinas motoras son válidas para las mismas, las Ecuaciones de Euler, deducidas anteriormente ( U.T.nº 1- apartado 1-5), es decir tendremos para:

a).-Turbinas Radiales:

1).-Ecuacion General;  $E = u_1 c_1 \cos \alpha_1 - u_2 c_2 \cos \alpha_2$

2).-Ecuacion Reducida:  $E = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}$

3).-2da. Ecuación de Euler:  $E = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2}$

Las ecuaciones anteriores son equivalentes entre si; luego será:

$$u_1 c_1 \cos \alpha_1 - u_2 c_2 \cos \alpha_2 = u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2} = \frac{u_1^2 - u_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2}$$

b).-Turbinas Axiales:

1).-Ecuacion General:  $E = u (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2)$

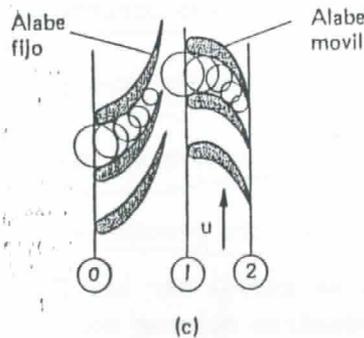
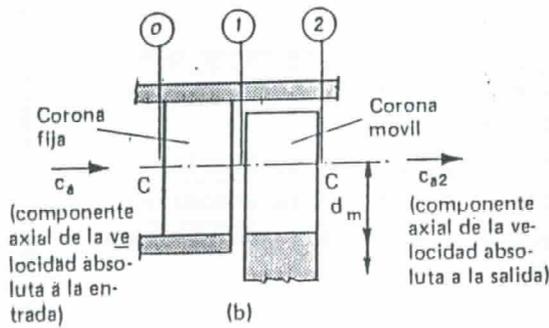
2).-Ecuación Reducida:  $E = u (c_{u1} - c_{u2})$

3).-2da. Ecuacion de Euler  $E = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} + \frac{c_1^2 - c_2^2}{2}$

que tambien son equivalentes.-

5-3-3).-ECUACION DE EULER Y PRIMER PRINCIPIO: La mayor parte de las Turbinas de vapor y de gas son axiales. Por tal motivo nos referiremos a las mismas para establecer la relación que existe entre las

...///Ecuaciones de Euler y el Primer Principio de la Termodinámica.,ya que al producirse intercambio de energía,debe cumplirse lo que indica dicho principio.Si consideramos un corte meridional de un escaalonamiento tendremos la siguiente representación gráfica;



De acuerdo a la nomenclatura internacional adoptada, indicaremos con los sub-índices:

- 0 la entrada a la corona fija
- 1 la salida de la corona fija y la entrada a la corona móvil
- 2 la salida de la corona móvil.

La sustancia de trabajo (vapor) contenida en un escaalonamiento, constituye un "volumen de control", que consideraremos en circulación a regimen permanente.El Primer Principio de la Termodinámica indica que debe cumplirse el siguiente balance de energías:

$$q = h + W_t + E_c + E_p$$

que aplicado al escaalonamiento axial indicado será:

$$q = h_2 - h_0 + W_t + \frac{c_2^2 - c_0^2}{2}$$

Por el aislamiento térmico que se realiza sobre la turbina, se puede considerar, sin cometer mayor error, que el proceso se realiza en condiciones adiabáticas (q=0). Además la altura geodésica permanece constante (z<sub>1</sub>=z<sub>2</sub>), por lo que E<sub>p</sub> = 0, y por razones de rendimiento, la velocidad de salida de la rueda móvil debería igual a la de entrada (c<sub>2</sub> = c<sub>0</sub>) (óptimo de conversión de velocidad en trabajo). Con estas consideraciones, la ecuación anterior se reduce a

$$h_2 - h_0 + W_t = 0$$

de donde la energía intercambiada será:

$$E = W_t = -(h_2 - h_0) = h_0 - h_2 = (h_0 - h_1) + (h_1 - h_2)$$

debiendo cumplirse, de acuerdo al Primer Principio, que:

$$E = u(c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) = u(c_{u1} - c_{u2}) = w_2 - w_1 = \frac{c_1^2}{2} - \frac{c_2^2}{2} = (h_0 - h_1) + (h_1 - h_2)$$

Si el mismo razonamiento lo aplicamos unicamente a la corona fija, tendremos:

$$q_f = h_1 - h_0 + W_t + \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = 0$$

Como en la corona fija no se entrega trabajo sera tambien W<sub>t</sub> = 0, luego,

$$h_1 - h_0 + \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = 0 \text{ de donde } \frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_1 = \Delta H_{CF}$$

como por razones de eficiencia c<sub>0</sub> = c<sub>2</sub> resulta finalmente que:

$$\frac{c_1^2 - c_0^2}{2} = h_0 - h_1 = \Delta H_{CF}$$

con lo que queda demostrado desde el punto de vista termodinámico, que el aumento de velocidad del flujo de vapor se logra en la corona fija o tobera, por una varia-

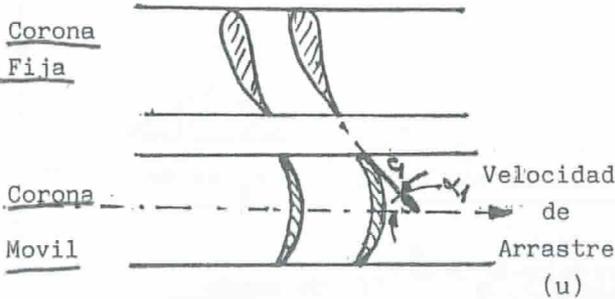
.../// ción de entalpía. Como

$$E = (h_0 - h_1) + (h_1 - h_2) = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

es evidente que la variación de entalpía en la corona móvil es consecuencia única-  
mente es provocada por efectos de rozamiento:

$$E_r = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = h_1 - h_2 = \Delta H_{CM}$$

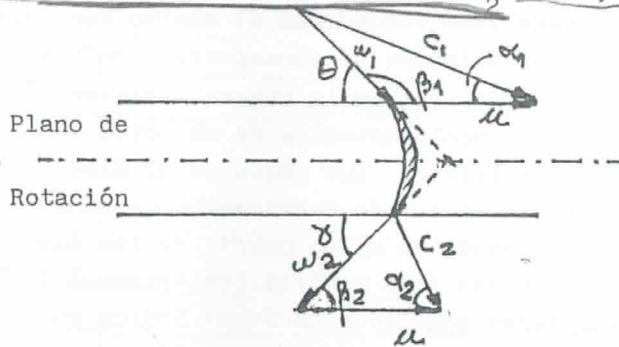
5-3-4).-TRIANGULO DE VELOCIDADES: Por ser las turbinas turbomáquinas debemos conside-  
rar los triangulos de velocidades de entrada y de  
salida de los álabes para relacionar las distintas velocidades definidas anterior-  
mente. Si consideramos el desarrollo del escalonamiento en un plano cilíndrico coa-  
xial al eje de la turbina tendremos:



El flujo de vapor proveniente de la corona fija incide sobre la corona móvil con una alta velocidad absoluta  $c_1$ , que forma con la velocidad tangencial del rotor denominada también "de arrastre" ( $u$ ) un ángulo  $\alpha_1$  variable entre  $15^\circ$  a  $20^\circ$ . La composición de ambas velocidades (restando  $u_1$  a  $c_1$ ) indica el valor de la velocidad relativa  $w_1$  del triángulo de velocidades de entrada. Esta última a su vez forma con el plano de rotación un ángulo  $\theta$  que varía entre  $20^\circ$  y  $21^\circ$ . El flujo de vapor

sale de la corona móvil con una velocidad relativa  $w_2$  según un ángulo  $\delta$  que se toma de igual valor que  $\theta$ , con respecto al plano de rotación, que al componerse con la velocidad de arrastre  $u$ , da el valor de la velocidad absoluta de salida  $c_2$ . Para que

el flujo de vapor penetre al rotor con el mínimo de turbulencia, la forma del álabes debe ser tal, que su superficie lateral sea tangente al vector representativo de la velocidad relativa  $w_1$ . Por razones de costo los álabes de la corona móvil se construyen simétricos entre sí, de esta manera resulta el ángulo  $\theta =$   
Para el caso ideal  $w_2 = w_1$ . Para el real  $w_2 < w_1$ , diferencia que se expresa por un factor o coeficiente de fricción. Lo mismo ocurre entre  $c_2$  y  $c_1$ . Es decir tendremos:

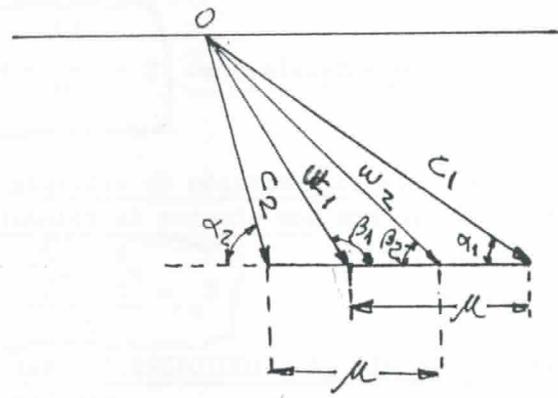
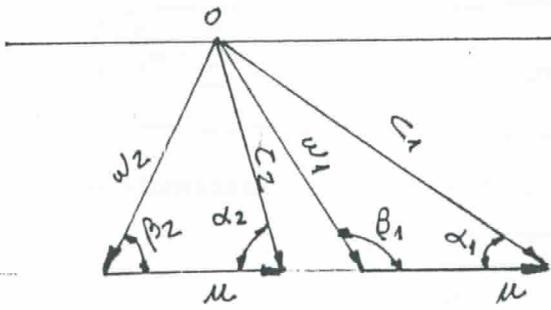


$$\eta_c = \frac{c_2}{c_1}$$

$$\eta_w = \frac{w_2}{w_1}$$

La representación grafica de los triángulos de velocidades puede realizarse, uno a continuación de otro, haciendo coincidir el final del vector que representa a  $w_1$  con el inicial de  $w_2$ ; partiendo de un mismo origen siguiendo la orientación de  $w_1$  y  $w_2$  o rebatiendo el triángulo de salida sobre el de entrada

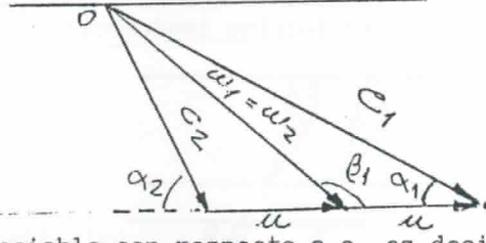
49



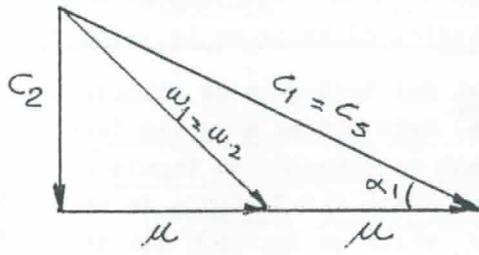
Si consideramos un escalonamiento ideal, es decir que no existe rozamiento en la corona móvil, tendremos para un escalonamiento de acción que:

$$\Delta H_{CM} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = 0 \text{ luego } w_2 = w_1$$

Los triángulos de velocidades serán los indicados en la figura.-



Para las condiciones ideales  $c_0$  es despreciable con respecto a  $c_1$  es decir se-

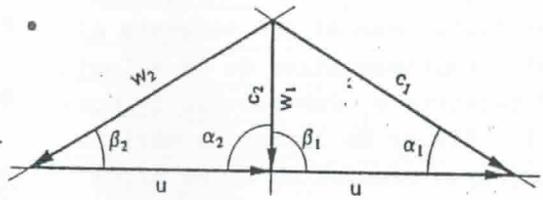


$$\frac{c_1^2}{2} = h_1 - h_0 = \Delta H_{CF} \text{ de donde}$$

$$c_1 = \sqrt{2 \Delta H_{CF}} = c_s$$

que se denomina "velocidad adiabática-isentropica o hipotética", y que sería la que adquiriría el vapor/gas si todo el salto entálpico se transformase en velocidad sin pérdida de energía cinética. Además el máximo rendimiento de conversión se obtendrá cuando  $c_2$  es mínimo, lo que se conseguira cuando  $\alpha_2 = 90^\circ$ . Los triángulos de velocidades serán los indicados en la figura anterior.-

Los escalonamientos de reacción a fin de simplificar los cálculos de diseño y reducir los costos de fabricación, se construyen utilizando el mismo perfil de los álabes de la corona fija y móvil. Los triángulos de velocidades adquieren la forma indica en la figura, en los cuales se ha considerado además  $c_2$  mínimo a la salida. Las relaciones entre los ángulos y velocidades serán:



$$c_2 = w_1 ; w_2 = c_1 ; \alpha_2 = \beta_1 ; \beta_2 = \alpha_1$$

5-3-5).-GRADO DE REACCION: Se denomina de esta manera a la relación entre el salto entálpico en la corona móvil y el salto entálpico

total 
$$\sigma = \frac{\Delta H_{CM}}{\Delta H_T}$$

Si el grado de reacción es igual a cero la turbina es de acción. Caso contrario de reacción.- En las de reacción al ser los álabes de la corona fija y móvil de igual perfil, el salto entálpico se reparte por igual en ambas, por lo que el grado de reacción resulta igual  $\frac{1}{2}$ .-

$$\Delta H_T = \Delta H$$

...///, ya que en esta caso  $\Delta H_{CF} = \Delta H_{CM}$ , como  $H = \Delta H_{CF} + \Delta H_{CM}$

será tambien  $H = 2 \Delta H_{CM}$  luego  $\eta = \frac{H_{CM}}{2 \Delta H_{CM}} = \frac{1}{2}$

cumplendose además que

$$\frac{c_2^2 - c_1^2}{2} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

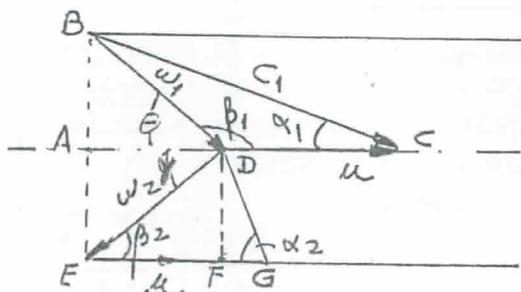
5-3-6).-TRABAJO A PARTIR DEL PRINCIPIO IMPULSO-CANTIDAD DE MOVIMIENTO; La fuerza impulsora que actúa sobre los álabes se expresa por:

$$F \text{ (kg)} = \frac{G}{g} (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) \left( \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{seg}} \cdot \frac{1}{\text{seg}} \cdot \frac{1}{\frac{\text{m}}{\text{seg}^2}} = \text{kg} \right)$$

el trabajo desarrollado por la misma resulta:

$$W_t = F \cdot u = \frac{G u}{g} (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) \left( \frac{\text{kgm}}{\text{seg}} \right)$$

En base a los triángulos de entrada y de salida, podemos establecer las siguientes relaciones:



En el ABC es  $AC = c_1 \cos \alpha_1$  (1)

a su vez  $AC = AD + DC = w_1 \cos \theta + u$  (2)

igualando (1) y (2) será

$$c_1 \cos \alpha_1 = w_1 \cos \theta + u$$
 (3)

En el FDG es  $FG = c_2 \cos \alpha_2$  (4)

$FG = EG$   $EF = u - w_2 \cos \delta$  (5)

igualando (4) y (5) resulta:

$$c_2 \cos \alpha_2 = u - w_2 \cos \delta$$
 (6)

reemplazando (6) en la expresión que indica el trabajo desarrollado tendremos:

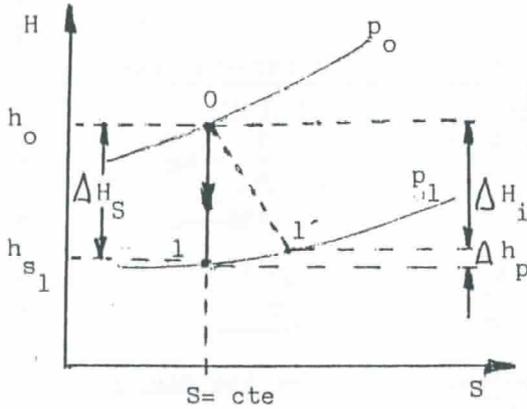
$$W_t = \frac{G u}{g} \left[ (w_1 \cos \theta + u) - (u - w_2 \cos \delta) \right]$$

$$= \frac{G u}{g} (w_1 \cos \theta + w_2 \cos \delta)$$

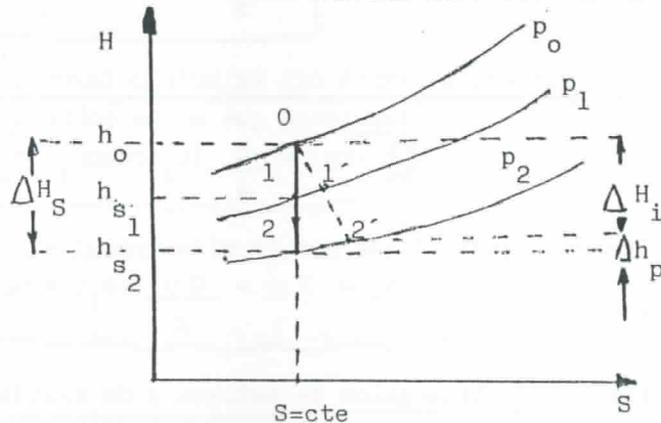
Esta ultima ecuación expresa el trabajo desarrollado por los álabes de la corona móvil en función de las velocidades relativas  $w_1$  y  $w_2$ , por la sustancia de trabajo (vapor o gas) en su paso a través del rotor.-

5-3-7).-RENDIMIENTO INTERNO DE UN ESCALONAMIENTO: Estudiamos anteriormente que la transformación de la energía de presión en energía de velocidad, se produce con una disminución de la entalpía del vapor, y que en las turbinas de acción dicha transformación se realizaba unicamente en la corona fija, permaneciendo constante la presión en la corona móvil. y en las de reacción dicha transformación continua en la corona móvil. Si consideramos un diagra H-S, en el cual las isobaras son divergentes tendremos la siguiente representación grafica para ambos tipos de escalonamientos:

ESCALONAMIENTO



$$\Delta H_S = \Delta H_{cf}$$



$$\Delta H_S = \Delta H_{cf} + \Delta H_{cm} = 2 \Delta H_{cf}$$

En ambos escalonamientos el punto "0" indica la entrada del vapor a la tobera (corona fija), y "1" la salida de la misma; 0-1 representa la evolución adiabática-isoentrópica; la expansión real es adiabática-no isoentrópica y esta representa por la evolución 0-1' en la de acción y 0-2' en la de reacción. Luego tendremos:

ACCION

$$\Delta H_{CF} = \Delta H_S = h_0 - h_{s1}$$

Expansión real:

$$\Delta H_{CF} = \Delta H_i = h_0 - h_{1'}$$

Las pérdidas en la expansión real son

$$\Delta h_p = \Delta h_s - \Delta h_i$$

El rendimiento interno del escalonamiento se obtendrá por la relación entre el trabajo real suministrado y el ideal:

$$\eta_e = \frac{w_t}{w_t} = \frac{h_0 - h_{1'}}{h_0 - h_{s1}}$$

REACCION

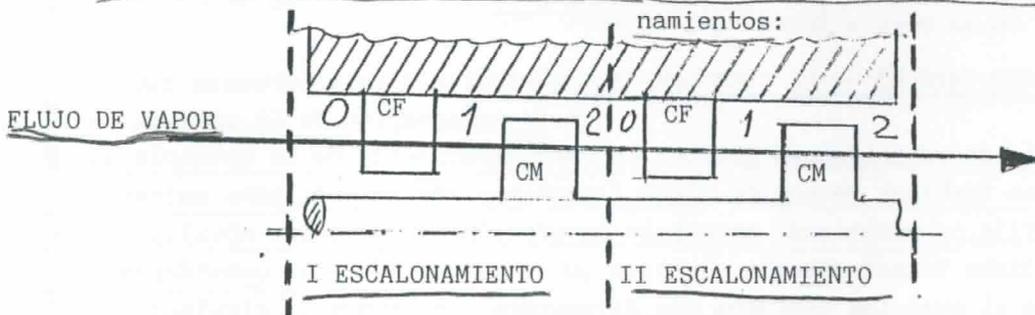
Para  $\sigma = 1/2 \dots \Delta H_{CF} = \Delta H_{CM} = \frac{\Delta h_s}{2} = \frac{h_0 - h_{s2}}{2}$

$$\Delta H_{CF} + \Delta H_{CM} = \frac{\Delta H_i}{2} = \frac{h_0 - h_{2'}}{2}$$

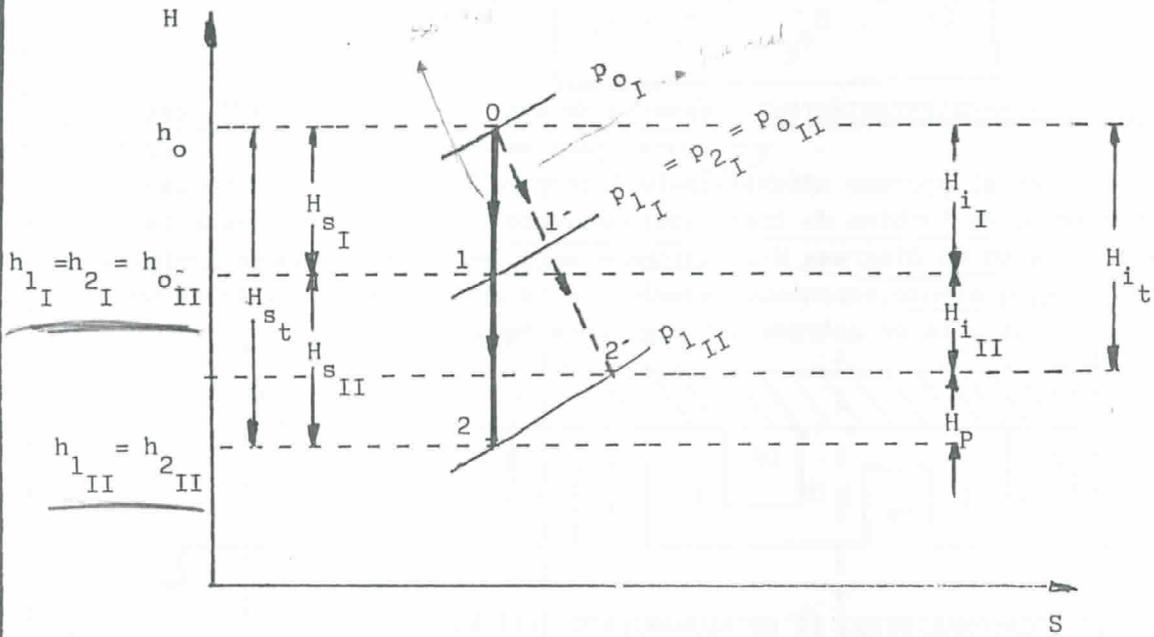
$$\Delta h_p = \Delta H_S - \Delta H_i$$

$$\eta_e = \frac{h_0 - h_{2'}}{h_0 - h_{s2}}$$

5-3-8).-RENDIMIENTO INTERNO DE LA TURBINA: Consideraremos un turbina de dos escalonamientos:

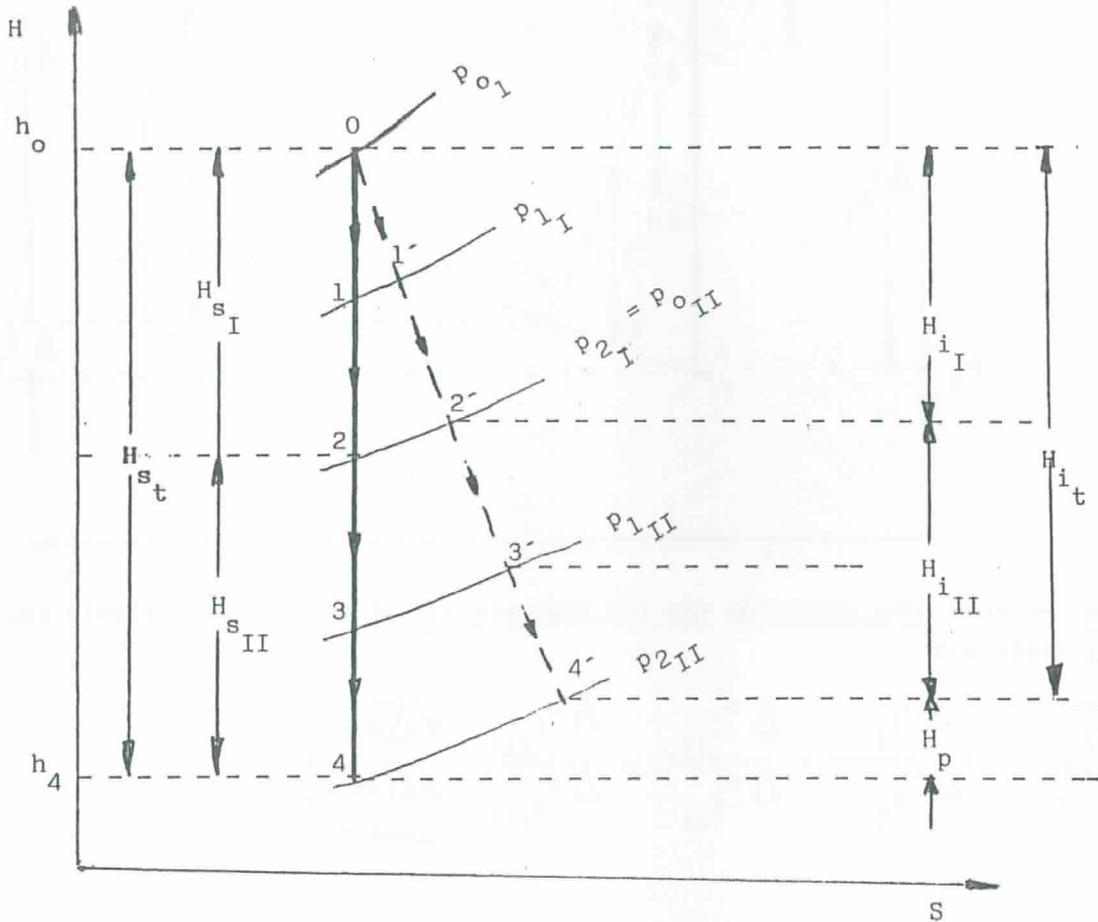


ACCION



$$\eta_t = \frac{H_{it}}{H_{st}} = \frac{h_0 - h_{2'}}{h_0 - h_2}$$

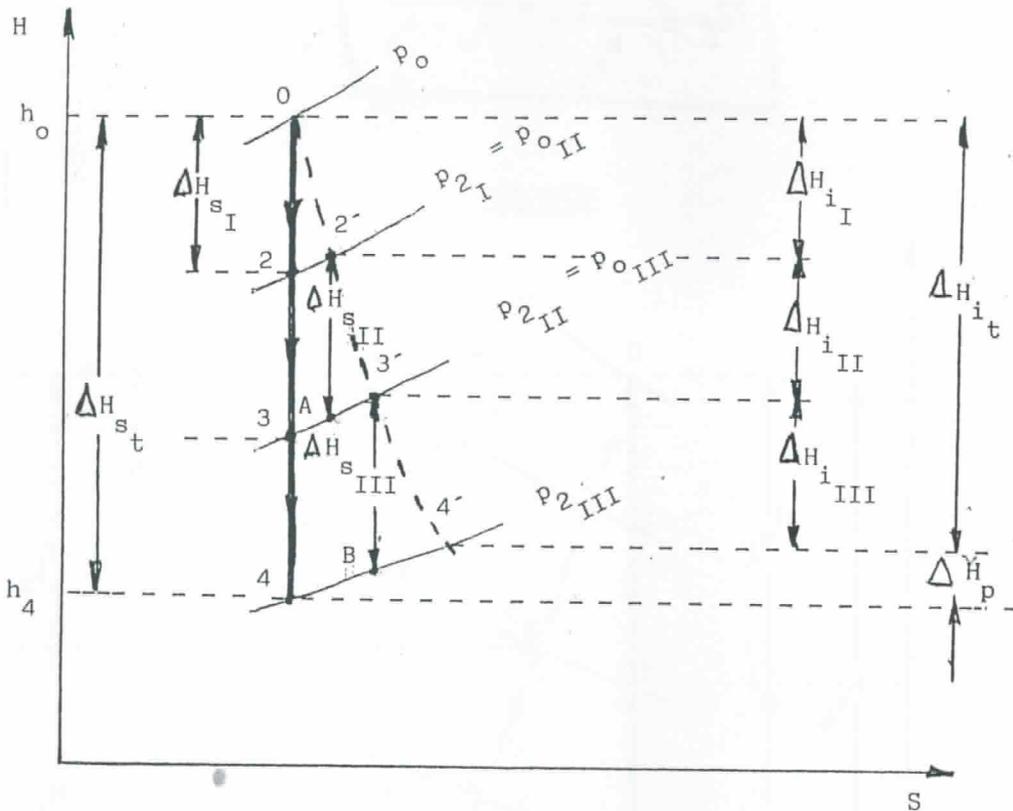
REACCION



...///

$$\eta_t = \frac{H_{i_t}}{H_{s_t}} = \frac{h_o - h_{4'}}{h_o - h_4}$$

5-3-9).-FACTOR DE RECALENTAMIENTO: Se denomina de esta manera a un coeficiente mayor que 1, que tiene en cuenta la diferencia entre el salto entálpico en el proceso adiabático-isoéntropico y el adiabático-No isoentrópico. Si consideramos un turbina de tres escalonamiento, y para no complicar la representación gráfica en el diagrama H-S, indicamos únicamente las isobaras inicial y final de cada escalonamiento, suponiendo además que la presión a la salida de un escalonamiento es igual a la de entrada del siguiente, tendremos:



Estableciendo como condición que los rendimientos de cada escalonamiento son iguales, tendremos:

$$\eta_e = \frac{\Delta h_{i_I}}{\Delta h_{s_I}} = \frac{\Delta h_{i_{II}}}{\Delta h_{s_{II}}} = \frac{\Delta h_{i_{III}}}{\Delta h_{s_{III}}} = \frac{\sum \Delta h_i}{\sum \Delta h_{s_i}}$$

-23-

.../// donde  $\Delta h_{s_I}$ ;  $\Delta h_{s_{II}}$  y  $\Delta h_{s_{III}}$  indican el salto adiabático-isoentrópico

a partir de las condiciones de entrada del vapor en cada escalonamiento. Al ser las isobara divergentes resulta  $\overline{2-3} = \Delta h_{s_{II}} > \overline{2-3}$  y  $\overline{3-4} = \Delta h_{s_{III}} > \overline{3-4}$

luego será:  $\sum \Delta h_{s_i} = \Delta h_{s_I} + \Delta h_{s_{II}} + \Delta h_{s_{III}} > \overline{0-2} + \overline{2-3} + \overline{3-4}$

es decir que al considerar las condiciones que presenta el vapor a la entrada de cada escalonamiento la variación de entalpía en condiciones adiabáticas-isoentrópicas es mayor que considerando la variación entre la entrada y salida de la turbina en las mismas condiciones. Si designamos como  $\Delta h_r$  un valor positivo que indique la diferencia entre ambos términos de la desigualdad anterior, podemos establecer que:

$$\sum \Delta h_{s_i} = \Delta h_{s_t} + \Delta h_r$$

como  $\sum \Delta h_{s_i} = \Delta h_{i_t}$  reemplazando en la expresión del rendimiento de un escalonamiento y operando tendremos:

$$\eta_e = \frac{\Delta h_{i_t}}{\Delta h_{s_t} + \Delta h_r} = \frac{\Delta h_{i_t}}{\Delta h_{s_t} \left( 1 + \frac{\Delta h_r}{\Delta h_{s_t}} \right)}$$

la relación  $1 + \frac{\Delta h_r}{\Delta h_{s_t}}$  representa el factor de recalentamiento  $R > 1$

como  $\frac{\Delta h_{i_t}}{\Delta h_{s_t}} = \eta_t$  es también  $\frac{\eta_t}{R} = \eta_e$

de donde

$$\eta_{i_t} = R \eta_{i_e}$$

expresión que indica que el rendimiento total de la turbina es mayor que el rendimiento de un escalonamiento y que por lo tanto podemos aumentar el rendimiento total de la turbina aumentando el número de escalonamiento. Esta condición ha permitido aprovechar los altos saltos entálpicos que se pueden obtener con los generadores actuales, con rendimientos muy favorables.-

5-3-10).-COEFICIENTE OPTIMO IDEAL DE VELOCIDAD PERIFERICA: En general la relación entre una velocidad cualquiera del flujo de fluido que pasa a través de la turbina (vapor o gas) y la velocidad adiabática-isoentrópica definida anteriormente, se lo denomina coeficiente de velocidad. Así por ejemplo tenemos:

$$\frac{c_2}{c_s} = \text{coeficiente de velocidad absoluta a la salida de la corona móvil}$$

$$\frac{c_m}{c_s} = \text{coeficiente de velocidad meridional a la entrada de la corona móvil}$$

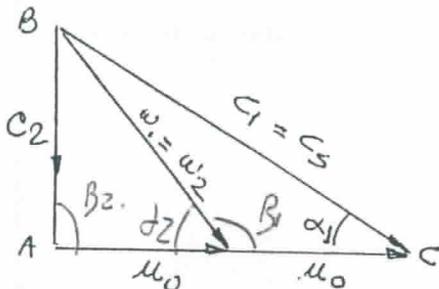
....///

Dentro de estos coeficientes el de mayor importancia desde el punto de vista del funcionamiento de la turbina es el coeficiente de velocidad periférico que se define como la relación entre la velocidad tangencial de la corona móvil y la velocidad adiabática-isoentrópica

$$\sqrt{o} = \frac{u}{c_s}$$

su valor es un parámetro característico de cada escalonamiento que permite al diseñador de una turbina establecer la conveniencia de que tipo de escalonamiento se debe utilizar, es decir si conviene uno de acción o uno de reacción.-

a) Escalonamiento de acción: El mayor rendimiento de conversión de velocidad en trabajo mecánico se obtendrá cuando  $c_2$  tienda a igual al valor  $c_0$  ( $c_2$  mínimo). En dichas condiciones el coeficiente de velocidad periférico definido anteriormente se denominan "óptimo ideal". Si consideramos los triángulos de velocidades de entrada y de salida ideales, podemos establecer las siguientes relaciones:



$$\sqrt{o}_A = \frac{u_0}{c_s}$$

en el triángulo ABC es:

$$c_s \cos \alpha_1 = 2 u_0 \text{ ; reemplazando en la anterior}$$

$$\sqrt{o}_A = \frac{u_0}{\frac{2 u_0}{\cos \alpha_1}} = \frac{\cos \alpha_1}{2}$$

El ángulo  $\alpha_1$  es por lo general muy pequeño ( $18^\circ$ )

y en el caso límite  $\alpha_1 = 0$  con lo que resulta  $\cos \alpha_1 = 1$ . En estas condiciones el "coeficiente de velocidad periférico óptimo ideal", resulta:

$$\sqrt{o}_a = \frac{u_0}{c_s} = \frac{1}{2}$$

b) Escalonamiento de reacción; Considerando los triángulos ideales como en el caso anterior tendremos:

$$u_0 = c_1 \cos \alpha_1 \quad (1)$$

vimos anteriormente que siendo  $c_0$  de escaso valor, podemos tomar directamente:

$$H_{CF} = \frac{c_1^2}{2} \text{ . Para un grado de reacción } 1/2 \text{ es}$$

$$H_{CF} = \frac{\Delta h_s}{2} \text{ ; a su vez } \Delta h_s = \frac{c_s^2}{2}$$

resulta  $H_{CF} = \frac{c_s^2}{2 \cdot 2} = \frac{c_1^2}{2}$  de donde  $c_1 = \frac{c_s}{\sqrt{2}}$

reemplazando en (1)  $u_0 = \frac{c_s}{\sqrt{2}} \cos \alpha_1$  . Luego  $\sqrt{o}_R = \frac{u_0}{c_s} = \frac{\cos \alpha_1}{\sqrt{2}}$

para  $\alpha_1 = 0$  resulta finalmente

$$\sqrt{o}_R = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

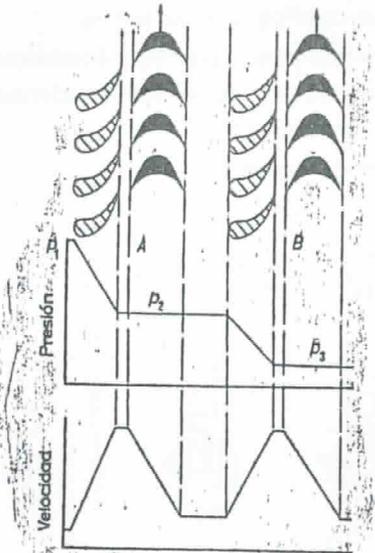
.../// El coeficiente de velocidad periférica optimo real sólo puede obtenerse experimentalmente. Dentro de ciertos límites puede estimarse, aplicando la formula propuesta por Pfleiderer que se expresa por :

$$\sqrt{0} = \frac{u_o}{c_s} = (0,37 \text{ a } 0,48) \cdot (1 + 0,8 \sqrt{\quad})$$

Ruiz:  
MAR 2007

5-3-11).-TURBINAS MULTIPLES:La teconología actual ha permitido la construcción de calderas que suministran vapor de agua a elevadas presiones, con lo cual se logra en su expansión, elevados saltos entálpicos, Esta circunstancia permite disponer de altas velocidades de rotación a la salida de la corona fija, En la práctica, como es lógico, estos saltos entálpicos disponibles no se puede utilizar en una turbina de un solo escalonamiento, por las dimensiones que tendría que tener la misma. Además, en el caso hipótetico que puedan ser construídas las altas velocidades tangenciales que se originan, someterían a grandes esfuerzos a los extremos de los álabes de la corona móvil, que afectarían la constitución física de los mismos. La velocidad máxima admisible en los extremos de los álabes por razones de resistencia de los materiales con que se construyen los mismos, no debe ser superior a 450-550 m/seg. Por tal motivo para utilizar los elevados saltos entálpicos posible de obtener se recurre a turbinas de más de un escalonamiento, que por motivo se denominan TURBINAS MULTIPLES. En las mismas el flujo de vapor puede variar su presión (escalonamiento de presiones) o su velocidad (escalonamientos de velocidades).-

a).-Escalonamiento de presiones:En este caso el salto entálpico total disponible se divide en un cierto número de saltos iguales, disponiéndose los escalonamiento en serie. Es decir el flujo de vapor pasa sucesivamente por un corona fija y una móvil, y luego a menor presión a una segunda corona fija y móvil (segundo escalonamiento) continuando de la misma manera si hubiera más escalonamientos. Si designamos con "z" el número de escalonamiento, la velocidad adiabática-isoentrópica para cada uno de ellos se expresará por:



$$C_{sz} = \sqrt{2 \Delta h_{sz}} = \sqrt{\frac{2 \Delta h_s}{z}} = \frac{C_s}{\sqrt{z}}$$

donde:  
 $C_{sz}$  = velocidad adiabática-isoentrópica de cada uno de los "z" escalonamientos dispuestos en serie.-  
 $C_s$  = velocidad adiabática-isoentropica de todo el escalonamiento.-

$\Delta h_{sz}$  = salto entálpico correspondiente a cada escalonamiento  
 $\Delta h_s$  = salto entálpico total disponible

Las turbinas que presentan escalonamientos de presión se las denomina de RATEAU, quien fué su inventor. En la figura anterior se indica dos etapas o salto de presión pero pueden existir más. En la zona indicada con la letra "A" existe mayor presión que en la "B". Por este motivo cada etapa de presión esta separada por un diafragma unido a la caja envolvente y que se extiende hasta el eje del rotor de la turbina. Como por razones constructivas debe quedar un cierto juego entre diafragma y eje se produce fugas de vapor, que se debe tratar se reduzca al mínimo posible.-

...///, Además como la caída de presión entre escalonamiento no es elevada, las toberas son convergentes. El escalonamiento de presión puede realizarse tanto en la de acción como en las de reacción, ya que en esta última la expansión continua en la corona móvil. La velocidad periférica óptima ideal se expresa por (teniendo en cuenta las ecuaciones vistas anteriormente (5-3-10; pág 24), serán respectivamente:

a) Para las de acción: 
$$\frac{u_o}{C_s} = \frac{1}{2} \text{ de donde } u_o = \frac{C_s}{2} \text{ como } C_{sz} = \frac{C_s}{\sqrt{z}}$$

resulta 
$$u_{o_{zA}} = \frac{C_{sz}}{2} = \frac{C_s}{2\sqrt{z_A}} < 450-550 \text{ m/seg}$$

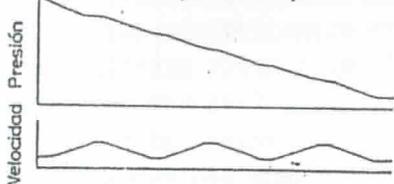
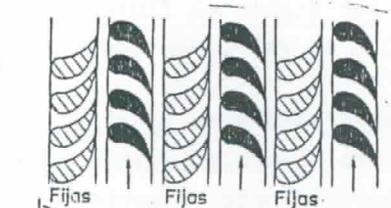
b) Para las de reacción: 
$$\frac{u_o}{C_s} = \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ de donde } u_o = \frac{C_s}{\sqrt{2}} ; \text{ como } C_{sz} = \frac{C_s}{\sqrt{z}}$$

resulta 
$$u_{o_{zR}} = \frac{C_{sz}}{2} = \frac{C_s}{\sqrt{2z_R}} < 450-550 \text{ m/seg}$$

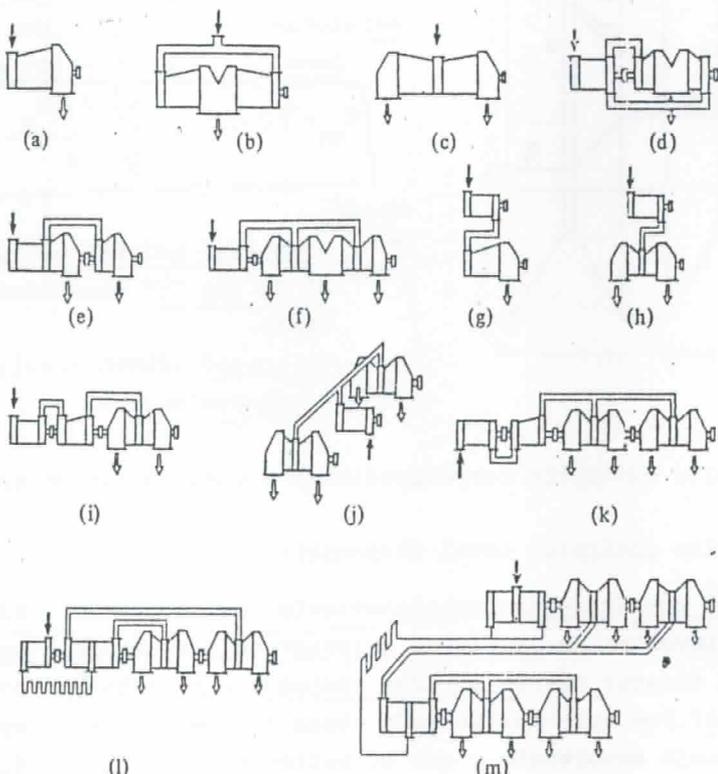
En las turbinas de reacción los perfiles de los álabes de la corona fija y móviles son iguales. Además a medida que disminuye la presión aumenta el volumen específico

Como consecuencia de ello el diámetro de la carcasa aumenta progresivamente y si los mismos son muy elevados, la turbina se construyen con más de cuerpo de acuerdo a las necesidades, que se acoplan en serie, en muy variada.

En la figura siguiente



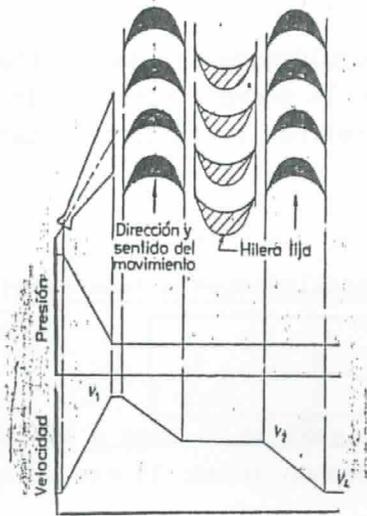
- a-turbina de un solo cuerpo-flujo único
- b-simple-doble flujo-escape único (un condensador)
- c-simple-doble flujo-dos escapes (dos condensadores)
- d-doble-doble flujo-un escape
- e-doble-flujo doble-dos escapes



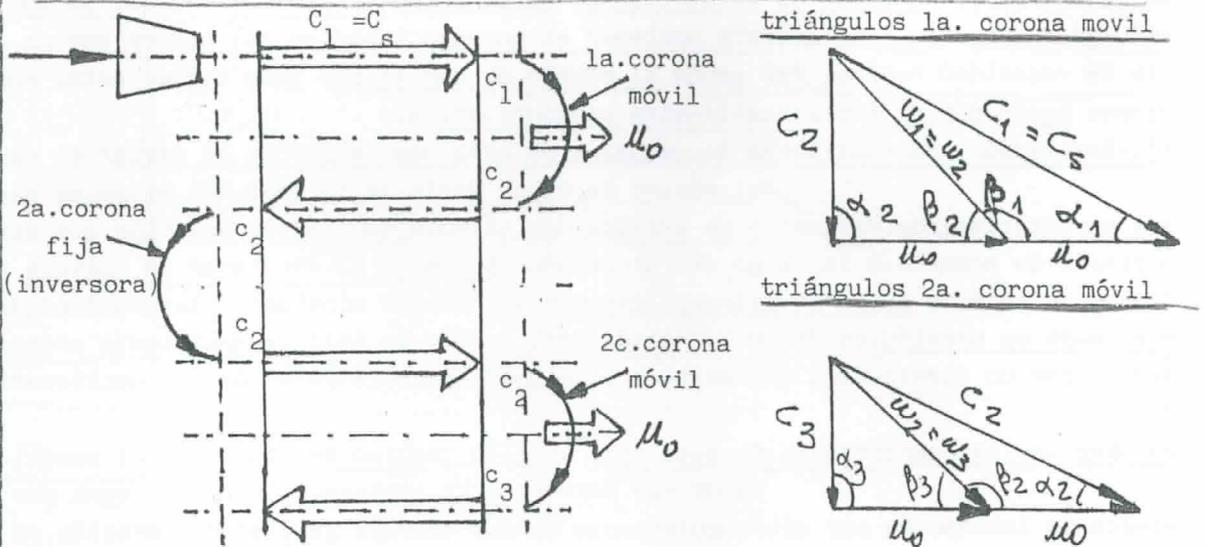
...///

- f - doble - flujo cuádruple - tres escapes
- g - cross-compound - vertical - doble - flujo único
- h - vertical - doble - doble flujo - dos escapes
- i - tandem-compound- triple - doble flujo - dos escapes
- j - vertical - triple - flujo cuádruple - cuatro escapes
- k - cuádruple - flujo cuádruple - cuatro escapes
- l - cuádruple - flujo cuádruple - cuatro escapes - un recalentamiento.-
- m - séxtuple - flujo óctuple- ocho escapes - un recalentamiento

b).-Escalonamiento de velocidades:Unicamente puede adoptarse en las turbinas de acción,al ser fija la primer corona de los escalonamientos.Esta disposición fue ideado por el ingeniero norteamericano CURTIS, y si bien el número de escalonamiento que puede adoptarse es ilimitado, en la actualidad, por razones de costo de construcción y rendimiento, se utiliza casi exclusivamente las turbinas de acción de "dos escalonamientos". Como la transformación de energía de presión en energía de velocidad se realiza unicamente en la corona fija del primer escalonamientos, la del segundo (y las de las siguientes), actúa unicamente como orientadora del fluido de trabajo (vapor o gas). Por ello y para disminuir costos se construyen de igual perfil que la de la corona móvil. En la turbina CURTIS, al producirse la expansión unicamente en la primer corona fija, la entalpía del fluido de trabajo permanece constante en la corona móvil del primer escalonamiento, y continúa en las mismas condiciones en la coronas fija (orientadora) y móvil del segundo escalonamiento. Para establecer la expresión del coeficiente de velocidad optimo ideal para este caso, consideraremos los triángulos de entrada y de salida de la 1a. y 2a. corona móvil.



te en la corona móvil del primer escalonamiento, y continúa en las mismas condiciones en la coronas fija (orientadora) y móvil del segundo escalonamiento. Para establecer la expresión del coeficiente de velocidad optimo ideal para este caso, consideraremos los triángulos de entrada y de salida de la 1a. y 2a. corona móvil.



Vectorialmente las relaciones entre las velocidades absolutas, relativas y tangencial se expresa, por:  $\vec{C} = \vec{U} + \vec{W}$ . Aplicando esta relación a los triángulos de entrada y de salida de la primer corona móvil, tendremos:

.../// 
$$\vec{W}_1 = \vec{W}_2 = \vec{C}_1 - \vec{U}_0 = \vec{C}_s - \vec{U}_0 ; \vec{C}_2 = \vec{C}_1 - 2 \vec{U}_0 \quad (1)$$

y para la segunda corona móvil:

$$\vec{W}_2 = \vec{W}_3 = \vec{C}_2 - \vec{U}_0 \quad (2) ; \vec{C}_3 = \vec{C}_2 - 2 \vec{U}_0 \quad (3)$$

reemplazando en (2) y (3) el valor de  $\vec{C}_2$  dado por (1) tendremos respectivamente:

$$y \quad \begin{cases} \vec{W}_2 = \vec{W}_3 = (\vec{C}_1 - 2 \vec{U}_0) - \vec{U}_0 = \vec{C}_1 - (2 \vec{U}_0 + \vec{U}_0) = \vec{C}_1 - 3 \vec{U}_0 \quad (4) \\ \vec{C}_3 = \vec{C}_2 - 2 \vec{U}_0 = (\vec{C}_1 - 2 \vec{U}_0) - 2 \vec{U}_0 = \vec{C}_1 - (2 \vec{U}_0 + 2 \vec{U}_0) = \vec{C}_1 - 4 \vec{U}_0 \end{cases}$$

el rendimiento será máximo cuando la velocidad absoluta de salida del fluido de trabajo se haya reducido a cero, lo que significa que la energía cinética de salida de la tobera  $c_1^2/2$  se habra aprovechado en forma total. Por lo tanto en estas condiciones será:

$$\vec{C}_3 = \vec{C}_1 - 4 \vec{U}_0 = \vec{C}_s - 4 \vec{U}_0 = 0$$

de donde

$$U_0 = \frac{C_s}{4}$$

y en general para "z" escalonamiento tendremos:

$$U_0 = \frac{C_s}{2z} \quad y \quad \sqrt{\frac{U_0}{C_s}} = \frac{1}{2z}$$

5-3-12 ).-REGULACION DE LAS TURBINAS DE VAPOR: Se realiza en base a lo que se desea obtener, siendo lo mas comunes, los

siguientes metodos:

- a).-Regulación para mantener constante el número de revoluciones.-
- b).-Regulación para mantener constante la presión de salida.-

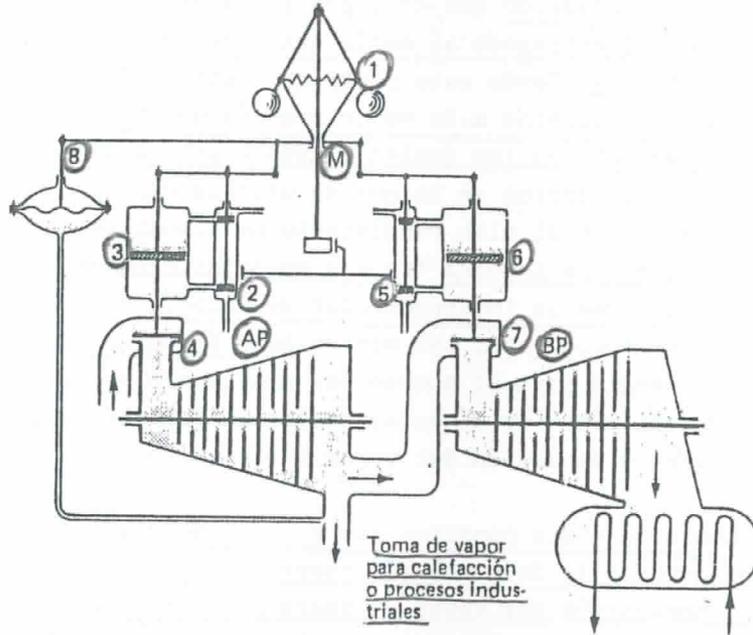
a).-Para mantener constante su número de revoluciones:Es el sistema de regulación que se utiliza normalmente en las centrales electricas, donde el grupo turboalternador debe girar a una determinada velocidad de sincronismo, independiente de la carga de la red de distribución de la energía eléctrica. La misión del regular es en este caso, abrir o cerrar automáticamente la admisión de vapor a la turbina, para mantener el momento motor, de tal manera que no varíe la velocidad nominal del grupo. El método de regulación para lograr estas condiciones puede ser de forma cualitativa o cuantitativa.-

1).-Regulación cualitativa:Se lo denomina de esta manera porque al variar el caudal máximo de vapor varía la calidad del mismo, es decir sus características. Para ello se utiliza una válvula general de admisión, que abre o cierra de acuerdo a la carga del alternador. El vapor al atravesar la válvula parcialmente abierta sufre un estrangulamiento a entalpía constante (laminación), disminuyendo su presión, es decir la calidad del vapor, lo cual se manifiesta principalmente por un disminución del salto entálpico disponible en el último escalonamiento.-

2).-Regulación cuantitativa:En esta caso si bien tambien se disminuye el caudal de vapor que penetra a la turbina, ello no se logra por un efecto de laminación por estrangulamiento de una valvula general de admisión, ya que se utilizan vañas, de esta manera al cerrarse una de ellas, unicamente el segmento de tobera correspondiente a la misma queda sin admitir vapor. Es decir no varía la calidad del vapor sino su cantidad.-

b).-Para mantener constante la presión de salida:En este tipo de regulación la presión se mantiene constante utilizando un regulador del tipo de membrana. Un esquema de este tipo de regulación pue-

...//de ser el siguiente:



.-Esquema de regulación combinada de la presión y número de revoluciones de una planta termoeléctrica y de vapor para calefacción o usos industriales.

El manguito (M) del regulador de Watt (1) mueve la corredera de la válvula de distribución de aceite (2) el aceite a presión mediante el servomotor (3) mueve la válvula de admisión de vapor (4) de la turbina; simultáneamente el manguito (M) mueve también la corredera (5) del servomotor (6), que mueve la válvula (7) que da paso al vapor después de la toma a la parte de baja presión de la turbina. Por otra parte el manguito de regulación está unido con el regulador de presión (8) del vapor de extracción. Al variar la potencia de la turbina o la cantidad de vapor extraído, varía simultáneamente la posición de las válvulas (4) y (7), y se establece la correspondencia entre la potencia de la turbina y la cantidad de vapor a presión que entra a la turbina y el vapor extraído en la toma.-

Cualquiera sea el sistema adoptado, que debe estar de acuerdo con las necesidades de regulación, todas las turbinas normalmente están equipadas de un mecanismo de protección contra el embalamiento (aumento brusco de la velocidad), que cierra por completo la admisión del vapor, si la velocidad excede un 5 a 6 % del valor de régimen adoptado.-

5-3-13).-MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCION DE LAS TURBINAS: Se utilizan aceros ferríticos y/o austeníticos. Los primeros son más económicos, pero sus propiedades físico-mecánicas se mantienen a un nivel aceptable por debajo de los 500-550°C. Esta situación limita la presión del vapor a la entrada de la turbina, y por consiguiente el salto entálpico disponible. Mayor resistencia tienen los aceros austeníticos, pero de mayor costo. El problema se puede solucionar utilizando en los primeros escalonamientos aceros austeníticos y en los últimos donde el vapor es más húmedo aceros ferríticos con aleación de cromo. El balance económico en base al salto entálpico disponible y la potencia a suministrar indicará en definitiva el tipo de material a utilizar.- Así por ejemplo para temperaturas mayores de 900 °C. se debe recurrir a superaleaciones especiales no férricas (Níquel y Cobalto como metales básicos) e incluso a materiales refractarios; grafito y materiales cerámicos.-

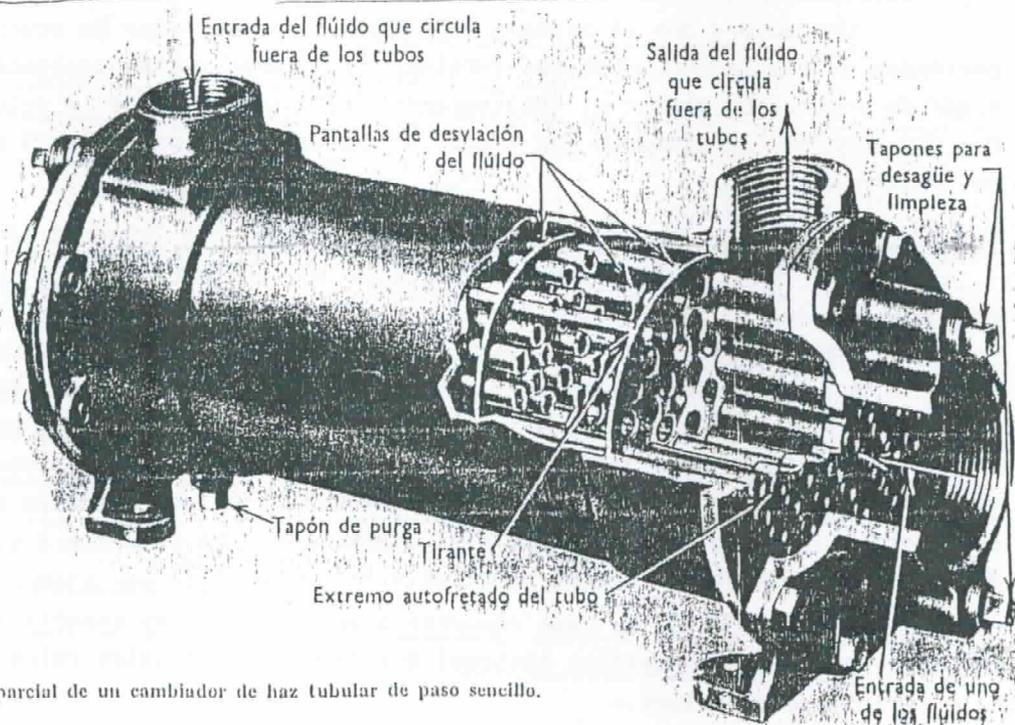
...///,

5-3-14).-CONDENSADORES:La termodinámica técnica indica que cuanto mayor es el salto entálpico que se logra en la expansión del vapor de agua, mayor será el trabajo útil entregado al medio exterior, y consecuentemente el rendimiento del ciclo de trabajo.Desde este punto de vista será conveniente por lo tanto que el vapor salga de la turbina a la menor presión posible.Esto se logra en las / turbinas de "condensación", en las cuales el vapor sale a una presión menor que la atmosférica.Este tipo de turbina es la que se utiliza casi exclusivamente en las / "centrales electricas", por el alto rendimiento de transformación de energía que se logra.Ahora bien para que la turbina trabaje en estas condiciones,es necesario colocar a la salida de la misma un intercambiador de calor, donde se produzca la condensación del vapor de escape,que por tal motivo se lo denomina "CONDENSADOR".Si bien existe consumo de energía para el bombeo del condensado y del agua de refrigeración del condensador,el mismo es de escaso valor en relación a la energía útil que se obtiene, al llevar la expansión del vapor hasta una presión menor que la atmosférica.

Desde el punto de vista constructivo y de funcionamiento existe dos tipos básicos de condensadores: a) de mezcla;de chorro o inyección y b) de superficie.En los primeros la condensación del vapor se logra por mezcla del mismo con agua a menor temperatura.En los segundo ,por intercambio de energía en forma de calor a través de una superficie metálica, que separa ambos fluidos.Teniendo en cuenta que el vapor que sale de la turbina, una vez condensado es prácticamente un agua "destilada",es conveniente desde el punto de vista económico que se reintegre al ciclo.Por motivo el condensador que se utiliza en las turbinas de vapor es el de superficie, por que no exista posibilidad de contaminación del vapor condensado.-

En términos generales un condensador de superficie esta constituido por un cuerpo cilíndrico de eje horizontal, en cuyo interior se dispone un haz de tubos fijo en sus extremos a placas denominadas "placas tubulares".La envoltura exterior esta unida en su extremo a un fondo convexo, denominada comunmente "cabezal del condensador".El espacio comprendido entre la placa de tubos y el extremo convexo puede dividirse en compartimientos, por medio de tabiques, a fin de que el agua de refrigeración realice más de un pasaje, dando lugar a los condensadores de dos ó más pasos.

En los condensadores de más de un paso el agua de enfriamiento circula en



Corte parcial de un cambiador de haz tubular de paso sencillo.

...///, un sentido en una parte y en sentido contrario en la otra, estando las conexiones de entrada y de salida, de la misma en el mismo extremo del cuerpo cilíndrico del condensador, Esta forma de circulación del agua de enfriamiento origina pérdida de energía por rozamientos, por lo que para decidir el tipo de condensador a utilizar se debe realizar un balance de los costos de bombeo y la cantidad de agua disponible, Por ello cuando se dispone de gran cantidad de agua de refrigeración es más conveniente utilizar condensadores de un solo paso. Normalmente no se utilizan más de dos pasos, porque el balance es generalmente negativo. El agua de refrigeración debe circular por el interior de los tubos, porque ante la eventualidad de depósito de "barros" (principalmente cuando el agua no tratada", es más fácil su limpieza:

La determinación de la superficie de intercambio calorífico, se realiza aplicando la ecuación general de la calorimetría, que como sabemos establece que el calor cedido (vapor), debe ser igual al absorbido (agua de enfriamiento)

$$Q_c = Q_a$$

$$G_v (h - h') = G_w c_m \Delta t = K S \Delta t_m$$

donde:

- $G_v$  = cantidad de vapor a condensar
- $h$  = entalpía del vapor a condensar ( a la salida de la turbina)
- $h'$  = " del agua condensada a la salida del condensador
- $G_w$  = cantidad necesaria de agua de refrigeración
- $c_m$  = calor específico medio del agua de refrigeración
- $S$  = superficie total necesaria para el intercambio calorífico
- $K$  = coeficiente total de transmisión del calor
- $\Delta t$  = incremento de temperatura del agua de refrigeración
- $\Delta t_m$  = incremento de temperatura media logarítmica entre los dos fluidos

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

cuyo valor dependerá de la forma en que circulen los fluidos (en igual o distinto sentido)

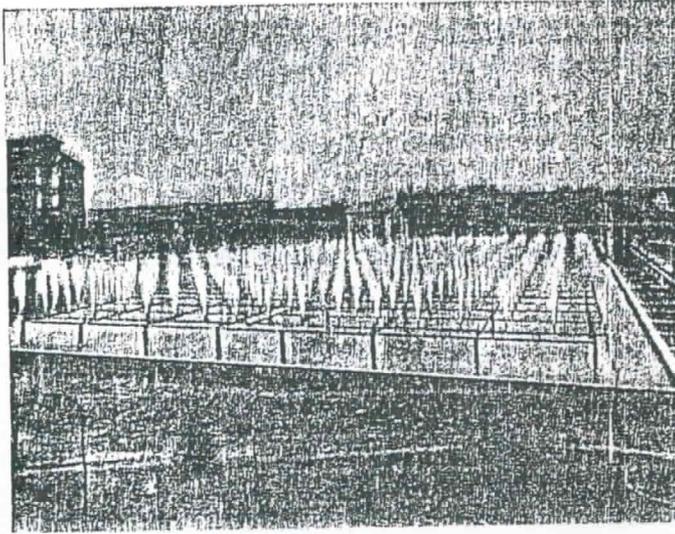
5-3-15).-TORRES DE ENFRIAMIENTO: La condensación del vapor de agua exige normalmente un gran caudal de agua de refrigeración. Por tal motivo y según la disponibilidad de la misma, su utilización puede realizarse en circuito abierto o cerrado.

a) Circuito abierto: Se denomina de esta manera cuando la fuente de agua disponible es de suficiente capacidad, que permite que la misma circule sin que se produzca variación de la temperatura de la fuente (rios, lagos, lagunas, etc) Normalmente es necesario un proceso de clarificación para que no produzca depósitos (barros) en el interior de los tubos del condensador.

b).-Circuito cerrado; Se utiliza cuando el agua disponible es limitada o cuando es necesario un acondicionamiento de la misma de cierto costo. En este caso se debe disponer una instalación que permita enfriar el agua utilizada después de su paso por el condensador, para que sea posible su recirculación. El enfriamiento se realiza por acción del aire atmosférico, que debe tener para ello un íntimo contacto con el agua caliente. Para que esto ocurra el agua se debe pulverizar, lo que se puede lograr por algunas de las siguientes instalaciones; a) enfriador de toberas; b) enfriador a cascada; c) enfriador mixto; d) enfriador con ventilador.-

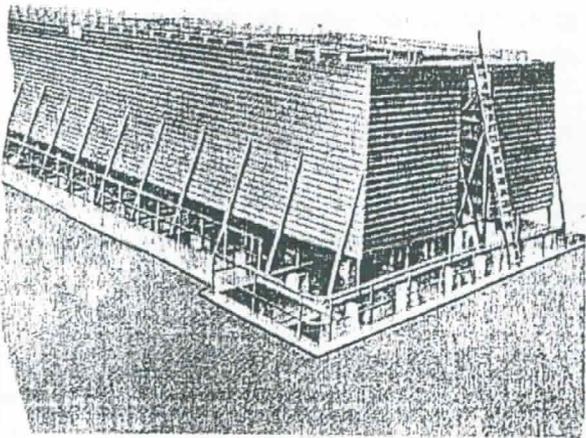
...///,

a).-Enfriador de toberas:El agua se pulveriza utilizando "toberas" dispersantes, a las cuales el agua llega una presión de 0,7-1 atm. Es necesario disponer de una gran superficie colectoras con laterales (piletas colectoras para evitar pérdida de agua, de alrededor de  $1 \text{ m}^2$  por  $\text{m}^3/\text{h}$  de agua. La mayor o menor aeración del agua pulverizada depende de las condiciones atmosférica.-

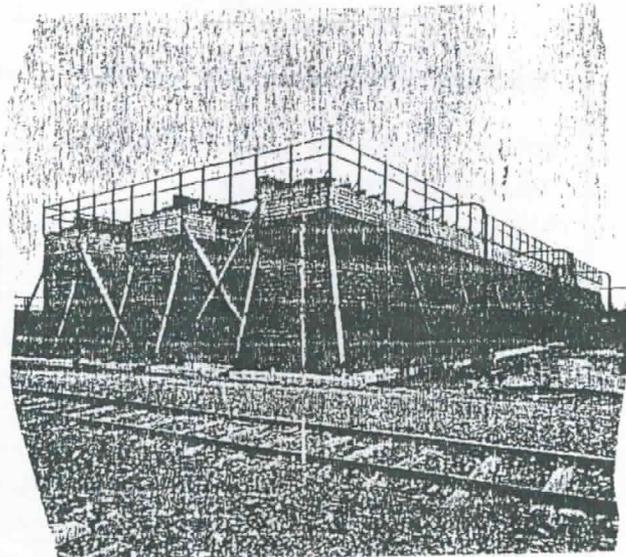


- Enfriador Hamon de toberas pulverizadoras

b).-Enfriador a cascadas:La dispersión del agua se logra vertiendo la misma a través de un andamiaje de madera, formado por un gran número de tablas y listones, de cierta altura. El andamiaje se construye de tal manera que el agua, está obligada a recorrer un camino sinuoso, disminuyendo su velocidad de circulación, escurriendo sobre las tablas y/o listones. En este caso, si bien también se necesita una superficie colectoras, la misma está en el orden de  $0,5-0,8 \text{ m}^2$  por  $\text{m}^3/\text{h}$  de agua. También su eficiencia depende de la velocidad del viento, por lo cual el cálculo debe realizarse un valor mínimo de la misma. Si las dimensiones del enfriador son fuciente y el mismo está montado en un lugar bien aireado, la temperatura del agua enfriada puede descender hasta un valor inferior a la temperatura ambiente.-



- Enfriador de cascadas

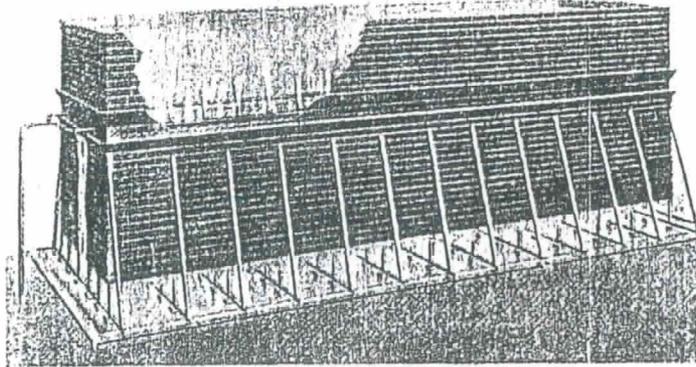


- Enfriador de cascadas

..///,

c) Enfriadores mixtos: Es una combinación de los enfriadores a toberas y de cascada.

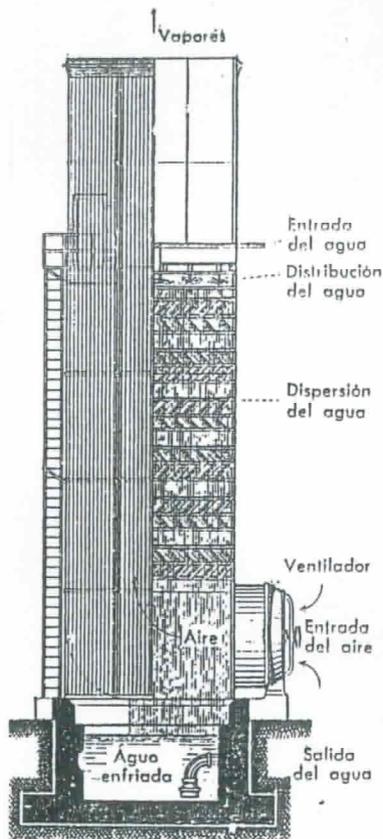
Es decir, la pulverización se realiza primero en las toberas, a donde llega el agua a presión, y luego se produce su escurrimiento a través del andamiaje de madera. Como consecuencia de ello tiene una superficie de contacto aire-agua pulverizada muy grande, lo que reduce la superficie a ocupar en comparación con un enfriador a cascada comun.-



Enfriador mixto de cascadas y toberas

d) -Enfriador con ventilador: Es el método más eficaz, porque independiza el funcionamiento del enfriador de las condiciones atmosféricas.

El aire impulsado por el ventilador, atraviesa el dispositivo de dispersión (toberas; tubo perforado, etc) produciendo el enfriamiento del agua pulverizada. La principal ventaja de este sistema es la reducida superficie que ocupan generalmente inferior a  $0,1 \text{ m}^2$  por  $\text{m}^3/\text{h}$ . Lógicamente aumenta el consumo de energía eléctrica por el accionamiento de los ventiladores. Por tal motivo el balance económico indicará el tipo de enfriador a utilizar



- Corte de un enfriador con aoplado mecánico

(52)