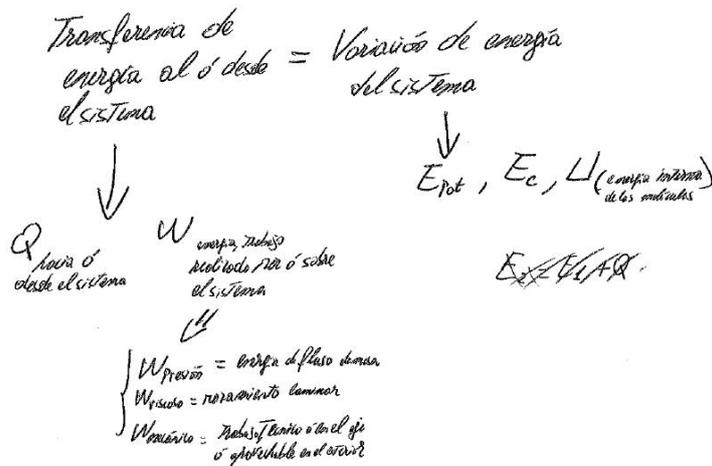


Estado termodinámico

Está definido por los valores que toman las variables de estado, presión, volumen específico, temperatura, entalpía y entropía. Normalmente sabiendo el valor de 2 de ellas, se puede conocer el valor que tienen las otras, es decir se puede conocer el estado termodinámico. Con solo cambiar de valor una de ellas, las otras deben cambiar de valor. Es decir con solo variar una variable se producirá un cambio de estado.

Conservación de la energía.

La variación en la energía de un sistema tiene el mismo valor que la transferencia neta (lo que entra menos lo que sale) de energía a dicho sistema.



1 PPIO genérico:

La energía del sistema en un instante 2 es del mismo valor que la que tenía en un instante anterior 1 MAS el calor en sentido entrante ($Q_{neto\ ent}$) MENOS el trabajo en sentido saliente del sistema ($W_{neto\ saliente}$).

Poner ecuación de 2 bis bis atrás

$$E_2 = E_1 + Q_{\text{entra}} - W_{\text{sale}}^{\text{trabajo}}$$

Siendo en esta ecuación:

- $Q_{neto\ ent} = Q_{ent\ ext} - Q_{sal\ ext} + Q_{ent\ int} = Q_{neto\ ent\ ext} + Q_{ent\ int} = Q_{neto\ ent\ ext} + W_{roz\ visco}$. Esta expresión se lee: Q entrante del exterior + Q entrante proveniente del mismo sistema (roz viscoso laminar) MENOS el saliente del sistema al exterior.
- $W_{neto\ saliente} = W_{roz\ visco} + W_{perds} + W_{util} + W_{presion} = W_{roz\ visco} + W_{eje\ tec} + W_{presion}$

$$+ (W_{\text{rot}} + W_{\text{trab}}) = + W_{\text{esc}}^{\text{técnico}}$$

El trabajo invertido en vencer resistencias pasivas es la energía perdida: W_{perdidas}
 La energía del sistema dedicada a vencer los esfuerzos viscosos laminares se transforman en calor que queda en el sistema ($Q_{\text{ent int}}$).

El trabajo de presión, es la energía que se ha de emplear para mantener la presión que el fluido externo al sistema ejerce sobre la masa del sistema en estudio. En caso de sistemas cerrados es cero, pues no tiene contacto con el exterior.

Con las anteriores expresiones podemos tener que para un sistema cerrado:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q_{\text{neto entrante exterior}} - W_{\text{tec/eje}} = Q_{\text{neto entrante exterior}} - (W_{\text{util}} + W_{\text{perd resist pasivas}}) = Q_{\text{neto entrante exterior}} - \int_1^2 p dv$$

Haciendo diversos cambios en la anterior expresión, obtenemos las siguientes.

1 ppio: sistm cerrado:

En estos sistemas el trabajo neto saliente del sistema es la integral p dv. Este está invertido en: Wroz viscoso y W eje/tec. Y este último es igual al Wutil más el W de perdidas en resistencias pasivas.

$$W_{\text{neto saliente}} = \int_1^2 p dv$$

Expresión 1: De la ecuación genérica, aplicada a un sistema cerrado, sabiendo que la parte de la energía que el sistema desarrolla (integral p dv) se invierte en vencer los esfuerzos viscosos y que ello genera un calor por rozamiento de igual valor que entra en el sistema llamado calor interno, ambos se anulan y tendremos que: la energía interna en estado 2=U1 mas el calor neto entrante (Q_{neto ent ext}) menos el trabajo técnico. El anterior calor normalmente no tiene calor cedido por el sistema y se queda la componente entrante exterior (Q_{ent ext})

$$U_2 = U_1 + Q_{\text{ext}} - W_{\text{ese}}^{\text{tecnico}}$$

Expresión 2: tenemos en esta expresión para poder calcular las transformaciones termodinámicas el trabajo tecnico es igual al que el sistema hace menos el de rozamiento viscoso. Entonces la variación de energía interna es igual al calor que viene del exterior del sistema (Q_{ent ext}) menos el trabajo realizado por el sistema (integral p dv, W_{neto saliente}) mas el trabajo de rozamiento viscoso.

$$\boxed{\Delta U = Q_{\text{ext}} - W_{\text{ese}} + W_{\text{roz viscoso}}} \quad \text{Ec. 2.4 Apéndice}$$

$$\Delta U = Q_{\text{ext}} - \int_1^2 p dv + W_{\text{roz viscoso}} \quad \text{Ec. 2.7 Apéndice}$$

1 ppio sistema abierto:

El trabajo realizado por el sistema tiene ahora un nuevo componente=el trabajo de presión o de flujo. Usando la expresión genérica, tenemos:

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{\text{sistema}} = \underbrace{Q_{\text{neto entrante sistema}}}_{\text{calor}} - \underbrace{(\dot{W}_{\text{ese}} + \dot{W}_{\text{presión}} + \dot{W}_{\text{roz viscoso}})}_{\text{trabajo}}$$

$$\Delta E_{\text{ext}} = Q_{\text{neto entrante}} - W_{\text{neto saliente}}$$

La energía del sistema tiene las siguientes formas: interna, de presión, cinética y potencial. El trabajo de presión y la energía interna conforman la entalpía.

Expresión 1: Calor neto entrante ($Q_{\text{neto ent}} = Q_{\text{ent ext}} + Q_{\text{sal ext}} + Q_{\text{ent int}} = Q_{\text{neto ent ext}} + Q_{\text{ent int}}$) menos el W eje/tec menos el trabajo viscoso = la variación de entalpía mas la variación de e cinet mas la de potencial gravitatoria.

$$\frac{P_{\text{eje}} + \text{entropía}}{P} \quad Q_{\text{ent}} - W_{\text{eje}} - W_{\text{visc}} = \dot{m} (\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{\text{pot}}) \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

\dot{m} : velocidad de flujo en el eje, flujo de entropía
 \dot{m} : masa por unidad de tiempo

$$Q_{\text{ent}} - W_{\text{eje}} - W_{\text{visc}} = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_{\text{pot}} \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

En esta expresión q_{ent} , es el calor neto entrante.

Expresión 2: calor neto entrante exterior menos W eje/tec = a la variación de entalpía mas la variación de e cinética mas la de potencial gravitatoria. La e potencial se desprecia.

$$q_{\text{ent ext}} - W_{\text{eje}} = h_2 - h_1 + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} + 0$$

Donde este calor es el neto entrante del exterior del sistema: $Q_{\text{neto ent ext}}$, dado que el calor interno y el trabajo de roz viscoso se anulan entre si al tener el mismo valor. Si el sistema no cede calor, como ya se ha dicho este término puede ser el $Q_{\text{ent ext}}$.

Aplicada esta ecuación de sistema abierto para una turbina, vemos el trabajo es energía que saca de la energía térmica (entalpía= energía interna térmica y de presión) y de la energía cinética.

Tendremos mas trabajo en el eje a base de reducir al máximo h_2 (teniendo mucha expansión) y reduciendo C_2 (velocidad absoluta de la vena fluida).

Expresión del trabajo técnico desarrollado en un sistema abierto o cerrado.

Diferenciado la ecuación del 1 ppio y la entalpía obtenemos: $Q_{\text{neto ent ext}} = \Delta h - \int_1^2 v dp$

Igualando con la expresión 2, obtenemos que el W que un sistema abierto puede sacar al exterior es = a la perdida ($-\Delta$) de energía cinética menos la integral $v dp$ menos la energía perdida en ineficiencias (resistencias pasivas). Ec 2,33.

$$W_{\text{util}} = \frac{C_1^2 - C_2^2}{2} - \int_1^2 v dp - W_{\text{perd}}$$

Este trabajo útil se suele identificar con el trabajo efectivo o el propio técnico.

Luego el trabajo se obtiene de coger del flujo energía q este tiene forma de velocidad y presión. Si hay perdida de presión ($dp < 0$, y menos por menos es mas) y de energía cinética, se obtiene trabajo en el eje. Si observamos la ecuación anterior a esta, vemos

que el trabajo dependía de la entalpía y de la e. cinética, es lógico pues entalpía está formada por energía interna y presión, luego ambas expresiones dicen lo mismo.

FUERZA Y PAR

El flujo por llevar velocidad se llama cantidad de movimiento. La variación de esta magnitud vectorial, en modulo o en dirección solamente, necesita que al flujo se le aplique una fuerza. Esta es hecha por un elemento que desvía el flujo, la fuerza es la misma que el fluido ejerce sobre dicho elemento, según 2 Ley Newton. Según el TTR, las fuerzas aplicadas a un flujo se invierten en cambiar la cantidad de movimiento y en soportar la presión del fluido externo al VC.

$$\sum \vec{F} = \rho_2 \vec{h}_2 + \rho_1 \vec{h}_1 + \rho \vec{v} (\vec{C}_2 - \vec{C}_1)$$

Lo que nos interesa es tener un par en el eje. Según teoría de momentos, el momento sobre un eje es la proyección del momento de cada fuerza calculado respecto cualquier punto de del eje, pues vale lo mismo. Por esta teoría resulta que solo la componente tangencial de las fuerzas contribuye al valor del momento sobre el eje. Por lo que el par total sobre el eje solo se calcula con las componentes tangenciales. Como la velocidad interviene en el cálculo, solo su parte tangencial nos interesa. Por otro lado las fuerzas de presión no generan pares sobre el eje, luego tendremos que el par neto sobre el eje es:

$$\sum \vec{M}_{net} = \sum \vec{M}_x + \sum \vec{M}_y + \sum \vec{M}_z$$

$$\sum \vec{M}_{net} = \rho \vec{v} (\vec{r}_2 \cdot \vec{e}_2 - \vec{r}_1 \cdot \vec{e}_1)$$

ese B → al del eje de giro

DERRAME

Usando la segunda expresión del 1 ppio y la encontrada de trabajo para un sistema abierto, tenemos:

$$W_E = 0 \quad \left(\begin{array}{l} \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} = - \int_1^2 v \cdot dp - W_{roz} \\ \rho_{int} = h_2 - h_1 + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} \end{array} \right)$$

Las ecuaciones son normalmente en Jul/kg, energía por unidad de masa, si se multiplica por el caudal másico (kg/sg), obtenemos potencia o flujo de energía(jul/sg).

-Tubería. En ella debido a la conservación de la masa, $C_1=C_2$, el rozamiento de las resistencias pasiva, hace que haya una perdida de presión, es decir un dp negativo. Si hay una entrada de calor, habrá un aumento de entalpía, sin importar en ello si hay o no rozamientos, es decir los rozamientos no influyen en la entalpía.(de momento).

Derrames adiabáticos: $W_t=0$, $q=0$, o isoentropico. Conversión entre energía cinética y energía potencial de flujo(entalpía)

$$h_1 - h_2 = \frac{C_2^2 - C_1^2}{2}$$

-Tobera= elemento donde la velocidad del fluido aumenta, destrucción de energía potencial.

-Difusor=elemento donde el fluido se frena, debido a su forma y no a perdidas por rozamiento.

2 PPIO TERMODINAMICA

Cuando en un proceso termodinámico existen irreversibilidades, se puede medir su importancia, con una variable de estado llamada entropía. Estas son fenómenos como:

- Que haya resistencias pasivas.
- Q en un transferencia de calor entre dos sistemas sus temperaturas no sean infinitesimalmente iguales.
- Que los procesos no sean cuasiestáticos.

Mide por tanto la destrucción de exergía, dado que en un proceso de transferencia en el que los focos de calor tengan una diferencia de temperatura infinitesimal, no se destruye exergía. Y la diferencia del valor de entropía entre sus estado inicial y final es cero.

Siendo Q el calor transferido a un cierta temperatura de un sistema, la variación de entropía se expresa como:

$$ds = \frac{dQ}{dT}$$

Pero ocurre que esta diferencial es exacta solo en procesos reversibles. Y el ser exacta conlleva que es igual a cero, es decir que en un proceso de este tipo la entropía permanece constante.

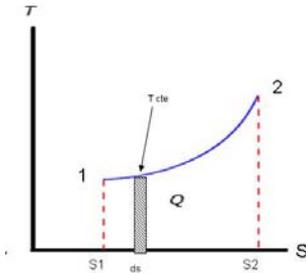
En los irreversibles no se puede calcular, al no ser exacta la diferencial. Pero se sabe que siendo los estados 1 y 2 por los que el sistema evoluciona de forma irreversible, la integral siguiente es mayor de cero, pero no se puede calcular (Clausius).

$$\int_1^2 \frac{dq_i}{T} > 0$$

Lo que se hace entonces es calcular la integral por un proceso reversible mas una constante que es la llamada entropía generada.

$$\int_1^2 \frac{dq_i}{T} = \int_1^2 \frac{dq_r}{T} + S_g = \Delta S = (S_2 - S_1) + S_g > 0$$

En la práctica para conocer el calor intercambiado en una transformación termodinámica, dado que esta integral no se puede calcular, se recurre a tablas. Como la entropía es una variable de estado, puede ser calculada sabiendo otras dos. Por lo tanto se han construido tablas T-S, que dan el valor de s para cada temperatura y para los diferentes fluidos de trabajo habituales.



Si se expresa el 1 ppo en función de la entropía usando para ello 2 expresiones ya vistas:

$$Q_{\text{neto ent ext}} = \Delta h - \int_1^2 v dp = Q_{\text{neto ent}} - W_{\text{roz visco}}$$

$$\Delta U = Q_{\text{ext}} - \int_1^2 v dp + W_{\text{roz}} \quad \text{Ec. 9.7 Apilua}$$

Donde Q_{ext} es el $Q_{\text{neto ent ext}}$, luego de ambas expresiones podemos despejar e igualar el $Q_{\text{neto ent}}$ quedando la expresión:

Quedando:

$$Q_{\text{neto ent}} = Q_{\text{neto ent ext}} + W_{\text{roz visco}} = \int T ds = u_2 - u_1 + \int p dv = h_2 - h_1 - \int v dp$$

EXERGIA destruida en un derrame.

Se puede demostrar usando el teorema de Carnot que la Exergía destruida en un proceso $= T_a S_g$.

En un derrame adiabático tenemos que el rozamiento en resistencias pasivas genera una pérdida de presión (sin tener en cuenta la velocidad). La exergía destruida en este proceso puede calcularse con el concepto entropía generada por la energía perdida enviada al exterior a causa de las resistencias pasivas.

$$Ed = T_a S_g = T_a \int_1^2 \frac{dW_{\text{perd}}}{T} = T_a \int_1^2 \frac{-v dp}{T}$$

Sabemos que a mayores presiones de trabajo v es menor, por tanto para una misma pérdida de presión en un derrame adiabático la exergía destruida es menor si se trabaja con presiones altas.

$$\text{Para un derrame isoentropico: } h_1 - h_2 = \frac{C_2^2 - C_1^2}{2}$$

Cuando en un derrame hay resistencias pasivas, la variación de entropía es menor que en el caso isoentrópico dado que el flujo se frenará algo más y por tanto la velocidad real final es menor $C_2 < C_2$. Luego un derrame real visto en diagrama T-S, hace que no sea una línea vertical ($S=0$), si no inclinada, para que así haya una variación de entropía. En un diagrama de Mollier, el caso real hará que la entalpía final sea más grande que en el ideal sin rozamientos. Ver pag 200 Agüera y poner dos expansiones en T-S y en Mollier del otro libro español.

ELEMENTOS CONVERSORES DE ENERGÍA TÉRMICA O POTENCIAL EN CINÉTICA: TOBERAS Y DIFUSORES

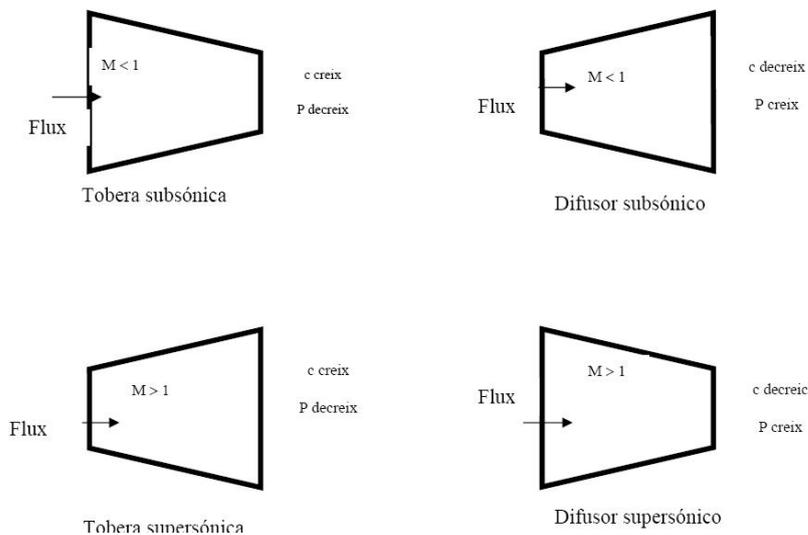
La forma de estos elementos viene dada por la velocidad del flujo a la entrada, medido en Mach (tanto por uno sobre la velocidad del sonido en el elemento que forma el flujo), las toberas y difusores pueden ser convergentes o divergentes. La ecuación que rige la

forma de un elemento de derrama es: $\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \frac{dc}{c}$

.dc<0 la velocidad decrece (c₂-c₁), dA<0 forma convergente. Flujo subsónica Ma<1.

Tobera es el elemento que aumenta la velocidad, difusor es el que lo reduce.

Las formas de estos elementos dependen de la velocidad de entrada y de lo que queramos conseguir.



Por ejemplo un elemento si es convergente y divergente, si quiero que sea tobera deberá entrar subsónico y en el cuello conseguir la velocidad del sonido para que así la zona divergente se comporte al completo como tobera. En caso contrario la parte divergente será un difusor, pues dado que se comporta como difusor la velocidad se reduce y ya no alcanzará la supersónica que se necesita para que un elemento divergente se comporte como tobera.

Para conseguir que haya flujo debe haber un diferencial de presión entre la entrada y la salida.

En un elemento de estos, la zona en donde se alcanza la velocidad del sonido (en el caso de que se alcance), se le denomina sección crítica. Que se alcance o no dependerá exclusivamente de las presiones a la entrada y la salida.

La presión crítica depende del valor de la presión de entrada. Conociendo este valor y comparándolo con la presión real a la salida, sabremos como se comporta el flujo.

$$\frac{P_C}{P_T} = \left(\frac{T_C}{T_T} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \rightarrow \left(\frac{P_C}{P_T} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \frac{2}{k+1}$$

Por ejemplo, en una tobera (C↑ y P↓, ver ec de derrame) si a la salida la presión es menor a la crítica, significa que dentro se ha alcanzado esa presión. Si la tobera es convergente solamente cuando llegue a la sección crítica, donde alcanza la velocidad del sonido, pasará a comportarse como un difusor. Si quiero que sea tobera deberé poner una sección divergente después de la sección crítica, siendo en este caso dicha sección la sección mínima o cuello, teniendo entonces una tobera convergente-divergente.><

Cuando en un elemento puro como una tobera convergente, cuando se llega a la velocidad crítica debe conseguirse en la sección final pues de lo contrario a partir de esa zona se comportará como difusor y la velocidad se reducirá, aumentando la presión. Este fenómeno generará ondas de choque de presión que luego se verán.

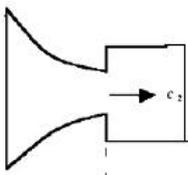
Si se consigue la máxima velocidad en la parte de sección mínima el elemento estará vehiculando el máximo caudal, ya que en la sección menor tenemos la máxima velocidad (Caudal=área sección x velocidad)

Variación de la contrapresión (presión en la región de escape)

La presión a la entrada es la atmosférica y la de salida es variable.

-Caso 1: elemento convergente.

Si fuera regulando la presión a la salida, iría consiguiendo variar el flujo que pasa de un lado a otro.



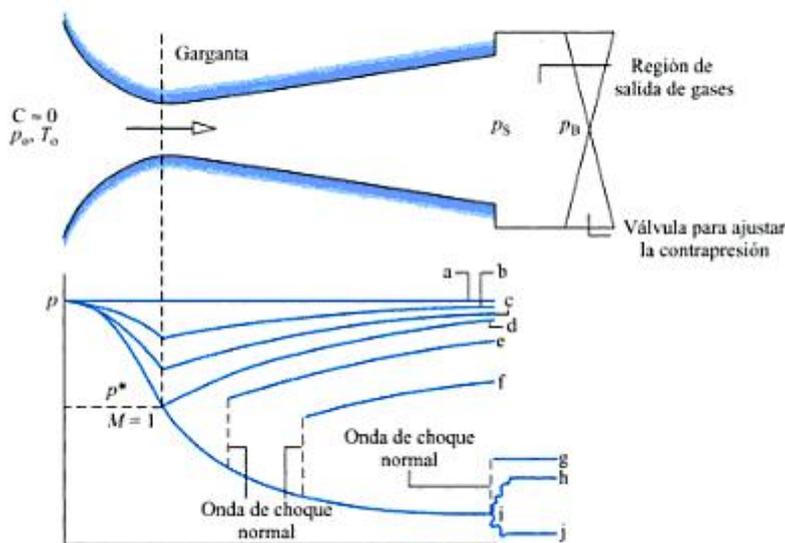
Cuando las presiones son iguales no hay paso. Según voy reduciendo la presión aumenta el flujo, va aumentando la velocidad. Eso significa que el elemento funciona como tobera.

- En el caso de que la velocidad del sonido se alcanzase en un punto intermedio el resto de elemento sería difusor y el flujo se frenaría, luego no tendría el máximo caudal (mayor velocidad debe darse en la sección más pequeña)
- En el caso que la presión crítica se alcance justo en el final, tendríamos el mayor caudal.
- Si seguimos bajando la presión ya no se acelera más (pues debería tener forma divergente para que se siguiera comportando como tobera) entonces se da una libre expansión al salir dado que el exterior se encuentra a menos presión. Se oye una “explosión”. Es decir cuando oyes el “pet”, ya no bajes más la presión

has llegado al máximo caudal. Ninguna variación de presión hace aumentar el caudal, la tobera está “estrangulada”.

Caso 2: elemento convergente-divergente

Vamos bajando la contrapresión según diferentes valores. Si la contrapresión es igual que la entrada, no hay caudal. Al bajar un poco la presión, aumenta un poquito la velocidad, empieza a pasar algo de caudal. La parte convergente es tobera y la divergente es difusor ($c \downarrow$ y $p \uparrow$), debido a que entra en ella a velocidad subsónica, casos b, c y d. Mientras en el cuello haya velocidad subsónica estamos en estos casos. La velocidad en la parte convergente va de menos a más, al ser tobera. Al bajar un poco la velocidad en las diferentes partes de la zona convergente va aumentando. La zona más rápida es la del cuello, al tener menor sección. Luego esta será la primera en alcanzar la velocidad del sonido. En ese momento, (caso i) la parte divergente pasa a comportarse como tobera, ocurriendo que se alcancen en esta parte velocidades superiores a la del sonido y que la presión caiga en toda ella. Es el caso bueno. Si se sigue reduciendo la contrapresión la tobera estará estrangulada y el caudal no variará. El caudal es el máximo ya que en la menor sección hay la mayor velocidad posible. Pero experimentalmente se ha demostrado que reduciendo más la presión (e, f, g) llega un momento en que de estar estrangulado, aparece un fenómeno llamado onda de choque normal que se genera que en un punto de la parte divergente y se manifiesta con una expansión repentina cayendo la velocidad por debajo de la sónica pasando a ser el resto del elemento un difusor subsónico, por ello decelera y aumenta la presión hasta alcanzar el valor de la exterior, casos e y f. A mayores reducciones, la onda de choque se va alejando del cuello hasta que se sitúa a la salida, (caso g,h,j), donde vuelve a comportarse todo el elemento como tobera.



Escalonamiento de una turbina

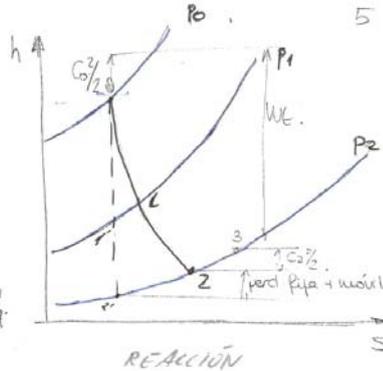
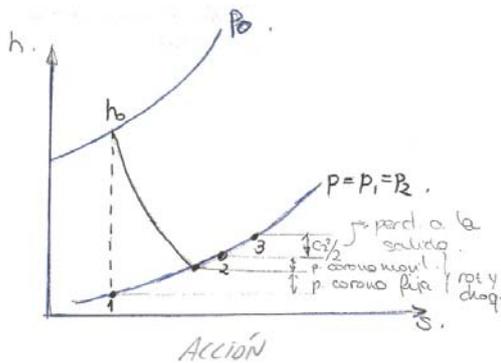
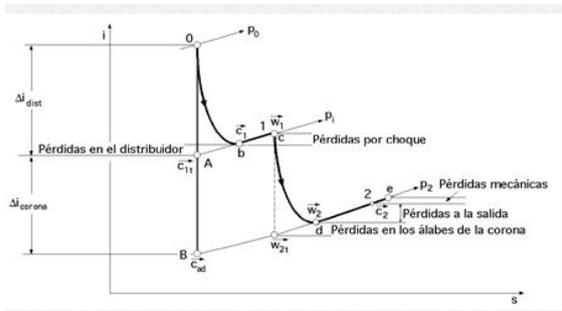
Esta formado por la expansión en estator (0-1) y en el rotor (1-2).

Estator=derrame, conversión de entalpía en energía cinética $h_0 - h_1 = \frac{C^2_1 - C^2_0}{2}$

Rotor= donde se obtiene trabajo $w = h_1 - h_2 + \frac{C^2_1 - C^2_2}{2}$

Sustituyendo $h_1 + c^2_1/2$, tenemos que el trabajo técnico en un escalonamiento=util+perdidas:

$w = \frac{c_0^2}{2} + h_0 - h_2 - \frac{c_2^2}{2}$: contra mas expansión Δh , menor h_2 , luego mayor trabajo, también a menor velocidad de salida, mas trabajo, ya la energía cinética a la salida es energía no convertida en trabajo. Si hay rozamiento irreversibilidades, la expansión no es isentrópica (línea vertical), y se genera entropía, la línea es oblicua y la entalpía, h_2 , es algo mayor, es decir al haberse destruido exergía no se puede aprovechar todo, y el flujo sale con mas energía que no se ha podido transformar en trabajo, es decir anergia.



El máximo trabajo que se puede conseguir en un escalonamiento es cuando la expansión es isentrópica(no se destruye exergía $\Delta S=0$) y cuando la velocidad de salida es cero.

$$W_{mx} = \frac{c_0^2}{2} + \Delta h_s$$

Por otro lado usando el TTR tenemos que el par sobre el eje es:

$$M = \dot{m} c_{1u} r_1 - \dot{m} c_{2u} r_2$$

La velocidad angular de giro del eje es igual a la velocidad radial o tangencial a eje en un punto por la distancia al centro de dicho punto.

$$Pot = M \cdot \omega = \dot{m}(c_{1u} u_1 - c_{2u} u_2)$$

$$Wt = pot / \dot{m} = (c_{1u} u_1 - c_{2u} u_2) = u_1 \cos \alpha_1 - u_2 \cos \alpha_2$$

El fluido a de salir perpendicular para optimizar el trabajo, asi la parte que resta seria nula, $\cos 90^\circ=0$

