# II.- TRANSFORMACIONES TERMODINÁMICAS

pfernandezdiez.es


| | |
|---|---|
| *Introducción* | *43* |
| *Propiedades de los gases y vapores* | *44* |
| *Propiedades de los vapores* | *44* |
| *Propiedades de los gases* | *45* |
| *Conservación de la masa y energía* | *46* |
| *Algunas aplicaciones de la ecuación de la energía* | *48* |
| *Turbina de vapor* | *48* |
| *Caldera de vapor* | *48* |
| *Flujo a través de un orificio* | *49* |
| *Flujo de un fluido compresible a través de un orificio* | *49* |
| *Compresor* | *49* |
| *Bomba* | *50* |
| *Concepto de entropía* | *50* |
| *Procesos reversibles* | *50* |
| *Procesos irreversibles* | *51* |
| *Ciclos* | *52* |
| *Ciclo de Carnot* | *52* |
| *Ciclo Rankine* | *53* |
| *Ciclo Rankine regenerativo* | *55* |
| *Extracciones y sangrías de vapor* | *57* |
| *Ciclo Rankine normal* | *57* |
| *Temperatura óptima de la primera extracción de vapor* | *58* |
| *Temperaturas de extracción para dos y tres extracciones de vapor* | *59* |
| *Energía utilizable* | *61* |
| *Rendimiento y consumo calorífico del ciclo Rankine* | *62* |
| *Ciclos de vapor en plantas nucleares* | *63* |
| *Ciclos de vapor supercríticos* | *66* |
| *Aplicaciones del vapor a procesos* | *67* |
| *Ciclo elemental de turbina de gas* | *68* |
| *Ciclos combinados* | *71* |
| *Calderas de recuperación* | *71* |
| *Cogeneración* | *73* |
| *Procesos de combustión* | *74* |
| *Energía libre* | *75* |
| *Tablas de propiedades termodinámicas del vapor de agua* | *78* |
| *Referencias* | *91* |

## II.1- INTRODUCCIÓN

La Termodinámica describe y define las transformaciones de una forma energética a otra: química a térmica, térmica a mecánica y mecánica a térmica. Se fundamenta en los principios Primera y Segunda Ley de la Termodinámica siguientes:

- *El principio de Conservación de la Energía*
- *Sólo parte de la energía disponible puede pasar a energía útil o trabajo*

que aparecen como consecuencia del desarrollo de la máquina de vapor y de los esfuerzos para formular las observaciones de conversión del calor del vapor en trabajo mecánico.

Independientemente del tipo de trabajo o forma energética que se considere, los conceptos calor, trabajo y energía tienen significado práctico cuando se refieren a sistemas, procesos, ciclos y sus medios exteriores. En el caso de un trabajo de expansión, el sistema está constituido por un fluido que se puede expansionar o comprimir modificando su presión y temperatura.

Un ciclo es una determinada secuencia de procesos, capaz de producir un flujo neto de calor o de trabajo, cuando éste se dispone entre una fuente energética y un sumidero de energía. El medio exterior reúne todas las fuentes y sumideros de energía que puedan existir, para procurar los intercambios de masa, calor y trabajo, hacia o desde el sistema.

El vapor es un sistema termodinámico que se utiliza en la $\begin{cases} \text{- } \textit{generación de energía eléctrica} \\ \text{- } \textit{transferencia térmica} \end{cases}$, y tiene las siguientes características:

- *Elevada capacidad térmica*
- *Temperatura crítica muy elevada*
- *Amplia disponibilidad*
- *Naturaleza no tóxica*

Cuando la capacidad térmica de un fluido de trabajo es elevada, se puede aplicar siempre un determinado trabajo o una transferencia de calor, con equipos de tamaño más reducido. La gama de temperaturas útiles del agua, y su elevado calor específico, satisfacen las necesidades de muchos procesos industriales y las limitaciones de temperatura que presentan la práctica totalidad de los equipos de conversión energética.

## II.2.- PROPIEDADES DE LOS VAPORES Y GASES

***Propiedades de los vapores.-*** Para analizar un proceso, o un ciclo, se necesitan propiedades del fluido de trabajo, como la entalpía, entropía y volumen específico.

- *La entalpía es una medida de la energía interna almacenada, por unidad de masa del flujo de vapor*
- *La entropía es una medida del potencial termodinámico de un sistema*

*- El volumen específico es el volumen por unidad de masa del fluido*

Las dos primeras columnas de las Tablas de vapor de agua definen una relación biunívoca entre presión y temperatura, en condiciones de saturación, en las que ambas fases, líquida y gaseosa, siempre coexisten en equilibrio termodinámico.

Para una presión determinada, el vapor calentado a mayor temperatura que la de saturación es el vapor sobrecalentado y el agua enfriada a menor temperatura que la de saturación es agua subenfriada. En condiciones de sobrecalentamiento o de subenfriamiento, las propiedades del fluido termodinámico (entalpía, entropía y volumen específico) son función de la temperatura y de la presión. Sin embargo, en condiciones saturadas en las que coexisten las mezclas de agua y vapor, la situación es más compleja; para definir las propiedades exactas se requiere otro parámetro que se conoce como calidad termodinámica de equilibrio, o título $x$, que se define como el tanto por uno en peso de vapor saturado en la mezcla líquido-vapor, es decir:

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_l} \quad siendo: \begin{cases} m_v \ \text{la masa de vapor saturado} \\ m_l \ \text{la masa de agua} \end{cases}$$

La entalpía $i$ de la mezcla (vapor húmedo), su entropía $s$ y su volumen específico $v$, se pueden calcular conocido el título $x$, por las ecuaciones: $\begin{cases} i = i_l + x\,(i_v - i_l) \\ s = s_l + x\,(s_v - s_l) \\ v = v_l + x\,(v_v - v_l) \end{cases}$

Los problemas de Ingeniería se plantean sobre diferencias de entalpía o entropía. Las Tablas de vapor de agua indican un cero arbitrario de referencia para la energía interna y para la entropía, el punto triple, correspondiente a la temperatura de 0,01ºC y presión de vapor 0,6112 kPa. En el punto triple coexisten en equilibrio los tres estados (sólido, líquido y vapor).

***Propiedades de los gases***.- El aire es un fluido de trabajo muy común en algunos ciclos termodinámicos y se precisan del mismo unas propiedades bien definidas y fiables para analizar los procesos y los ciclos. El aire y otros muchos gases utilizados en aplicaciones de ciclos energéticos, se consideran como gases ideales que cumplen la ley fundamental de los gases perfectos:

$$p\,v = R\,T$$

en la que p y T son la presión y temperatura absoluta del gas, y R es una constante propia del gas de que se trate; para el aire seco, R = 0,287 kJ/kgºK.

La ley de los gases perfectos se utiliza para realizar un primer análisis aproximado del proceso o del ciclo de que se trate, ya que implica cálculos simples. Los cálculos finales, más precisos, se realizan utilizando propiedades tabuladas de los gases.

## II.3.- CONSERVACIÓN DE LA MASA Y ENERGÍA

Los diferentes procesos termodinámicos vienen regulados por las leyes de conservación de la masa y de la energía, con excepción de las reacciones nucleares; las leyes de conservación establecen que la masa total y la energía total (en cualquiera de sus formas), no se pueden crear ni destruir en un proceso.

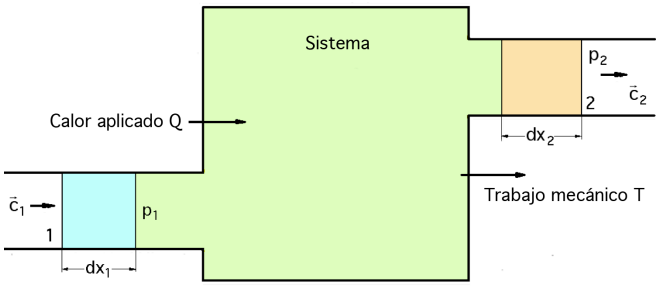



*Fig II.1.- Balance energético en un sistema*

Para un sistema energético de flujo abierto, en el que continuamente entra y sale masa, Fig II.1, estas leyes se expresan en la forma:

- *Conservación de la masa:* $m_1 - m_2 = \Delta m$

- *Conservación de la energía:* $E_2 - E_1 + E(t) = Q - T$

en las que: $\begin{cases} m \text{ es el flujo de masa, y } \Delta m \text{ es la variación de la masa del sistema} \\ E \text{ es la energía total fluyendo hacia o desde el proceso} \\ E(t) \text{ es la variación de energía almacenada en el sistema} \\ Q \text{ es el calor que entra o sale del sistema} \\ T \text{ es el trabajo que sale o entra en el sistema} \\ (1) \text{ y } (2) \text{ son las condiciones de entrada y salida, respectivamente} \end{cases}$

En régimen estacionario, los parámetros $\Delta m$ y $E(t)$ son iguales a cero.

Los términos $E_2 - E_1 + E(t)$, representan la energía almacenada, que entra o sale del sistema como parte del flujo másico, y la acumulación de energía total almacenada dentro del sistema.

El término $Q$ es el calor transferido al sistema y el término $T$ el trabajo desarrollado por el mismo.

Los componentes de la energía almacenada $E$ son, las energías $\begin{cases} interna \\ cinética \\ potencial \end{cases}$

En un sistema abierto, se necesita un trabajo para mover la masa hacia el sistema, y un trabajo realizado por el sistema para mover la masa hacia el exterior; el trabajo total es el producto de la masa por la presión del sistema y por el volumen específico.

Si se separa este trabajo de los demás realizados por el sistema y se subdivide la energía al-

macenada, la conservación de la energía se expresa por la expresión:

$$m_2 (u + p\,v + \frac{c^2}{2\,g_c})_2 - m_1 (u + p\,v + \frac{c^2}{2\,g_c})_1 + E\,(t) = Q - T_k$$

siendo: $\begin{cases} u \text{ la energía interna almacenada} \\ p \text{ la presión del sistema} \\ v \text{ el volumen específico} \\ c \text{ la velocidad del fluido} \\ z \text{ la cota} \\ T_k \text{ la suma de los trabajos realizados por el sistema} \end{cases}$

Los términos de trabajo asociados al movimiento másico de entrada y salida del sistema *(p v)* se han agrupado con la energía almacenada que cruza la frontera del sistema, (trabajo de circulación); todos los demás trabajos realizados por el sistema se representan por el término $T_k$.

Para los procesos en régimen estacionario, la ecuación de la energía anterior se puede simplificar más. Como en un intervalo de tiempo dado la masa que entra es igual a la que sale del sistema, la ecuación anterior se puede dividir por $m_2$ ó por $m_1$ (que son iguales) obteniéndose un balance entre la energía almacenada, debida a los flujos de entrada y salida, y los términos de calor y trabajo, referidos a la unidad de masa; en este caso, el término de energía almacenada es cero y la conservación de la energía, se expresa en la forma:

$$\Delta u + \Delta\left(p\,v\right) + \Delta\,\frac{c^2}{2g_c} + \Delta(z\,\frac{g}{g_c}) = q - w_k$$

en la que cada término $\Delta$ es la variación de las propiedades del fluido entre la entrada y la salida.

*- El valor de $\Delta u$ es la variación de la energía interna almacenada, asociada a movimientos y fuerzas atómicas y moleculares, la energía interna comprende todas las formas energéticas, con excepción de la cinética y de la potencial*

*- El término $\Delta(pv)$ se puede interpretar como la energía almacenada externamente, en la que se refleja el trabajo requerido para mover la unidad de masa entrando o saliendo del sistema.*

*- Los restantes términos de energía almacenada externamente dependen de los aspectos físicos del sistema*

*- El término $\Delta(\frac{c^2}{2\,g})$ es la variación de la energía cinética total del fluido, entre la entrada y salida del sistema*

*- El término $\Delta(\frac{z\,g}{g_c})$ es la variación de la energía potencial, (diferencia de cotas)*

*- La aceleración de la gravedad $g = 9{,}8\ m/seg^2$*

*- La constante de proporcionalidad $g_c$ es propia del sistema anglosajón de unidades, y su valor se obtie-*

*ne de la expresión:* $Fuerza = \dfrac{Masa \, x \, Aceleración}{g_c}$

*En el sistema inglés de unidades, cuando se ejerce 1 libra fuerza (1* $lb_f$*), sobre 1 libra masa (1* $lb_m$*), ésta se acelera 32,17* $ft/seg^2$.

*En el sistema internacional SI de unidades, la fuerza de 1 N sobre 1 kg masa (1* $kg_m$*), la acelera en 1* $m/seg^2$*, por lo que los valores de* $g_c$ *son:* $\begin{cases} g_c = 32{,}17 \; lb_m ft/lb_f seg^2 \\ g_c = 1 \; Kgm/N \, seg^2 \end{cases}$ *y el término de energía potencial en el sistema internacional de unidades SI se puede poner como* $\Delta(z\,g)$.

La aplicación de la ecuación de la energía requiere siempre de una congruencia dimensional en todos sus términos, de modo que se deben introducir las constantes de conversión; por ejemplo, los términos $u$ y $q$ se expresan normalmente en unidades Btu/lb o J/kg, pero se pueden convertir respectivamente en (ft.lb/lb) ó (N.m/kg), multiplicando por el equivalente mecánico del calor $J$ de valor: $\begin{cases} J = 778{,}16 \; ft.lbf/Btu \\ J = 1 \; N\,m/J \end{cases}$

En el análisis de las máquinas de vapor, las cantidades de calor se definen como positivas cuando se aplican al sistema y el trabajo es positivo cuando sale del sistema. Como $u$ y $(p\,v)$ son propiedades del sistema, también es propiedad del sistema su suma $(u + p\,v)$ que se presenta cuando la masa entra o sale del mismo y se define como entalpía $i = u + \dfrac{p\,v}{J}$ , que se expresa usualmente en Btu/lb ó J/kg.

## II.4.- ALGUNAS APLICACIONES DE LA ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

***Turbina de vapor.-*** Para aplicar la ecuación de la energía, cada componente se considera cocomo un sistema independiente, Fig II.2. En la mayoría de los casos prácticos de turbinas de vapor, los valores de $q$, $\Delta z$, $\Delta\left(\dfrac{c^2}{2g_c}\right)$ , entre los puntos de admisión *(1)* y escape *(2)* de la máquina, son muy pequeños en comparación con el valor de la diferencia $(i_2 - i_1)$ , por lo que se puede poner:

$$u_2 + \frac{p_2 v_2}{J} - u_1 - \frac{p_1 v_1}{J} = \frac{w_k}{J} \quad \Rightarrow \quad i_2 - i_1 = \frac{w_k}{J}$$

que indica que el trabajo realizado por la turbina $\dfrac{w_k}{J}$, es la diferencia entre las entalpías correspondientes al vapor entrante y saliente en la misma, (trabajo de circulación), aunque es muy raro que se conozcan ambos valores de la entalpía y de ahí que se requieran más datos del proceso, para así llegar a su determinación.

***Caldera de vapor.-*** La caldera o generador de vapor no realiza trabajo alguno, cualquiera que sea el caso considerado, de modo que $w_k = 0$ .

Los valores correspondientes a las variaciones de energía potencial $\Delta z$ y cinética $\Delta(\frac{c^2}{2\,g_c})$ desde la entrada (1) del agua de alimentación hasta la salida (2) de vapor son muy pequeños, comparados con la diferencia $(i_2 - i_1)$.

La ecuación de la energía, en régimen estacionario, es $q = i_2 - i_1$, en la que el calor aplicado a la caldera $q$ por unidad de masa de fluido, es igual a la diferencia entre la entalpía $i_2$ del vapor que sale de la misma y la $i_1$ del agua de alimentación que entra en el generador de vapor.

Si se asume que la presión varía muy poco a lo largo de la transformación en toda la unidad generadora de vapor, y se conoce la presión del calderín, la ecuación anterior se resuelve en cuanto se conozca la temperatura del agua de alimentación a la entrada de la caldera.

***Flujo a través de un orificio.-*** En el caso de un flujo de agua a través de un orificio, la variación del volumen específico entre la entrada y salida del mismo resulta despreciable, como consecuencia de la práctica incompresibilidad del agua; también son despreciables $\Delta z$, $\Delta u$, $w_k$ y $q$ y la ecuación de la energía se reduce a la expresión:

$$\frac{c_2^2}{2g_c} - \frac{c_1^2}{2g_c} = (p_1 - p_2)\,v$$

en la que el incremento de energía cinética del agua es debido a la caída de presión $(p_1 - p_2)$

Si la velocidad de entrada del agua en el orificio es despreciable se tiene:

$$c_2 = \sqrt{2\,g_c\,(p_1 - p_2)\,v}$$

siendo la diferencia de presiones $(p_1 - p_2)$ la altura estática.

***Flujo de un fluido compresible a través de un orificio.-*** En el flujo incomprensible del vapor o un gas a través de un orificio o tobera, las variaciones experimentadas en el volumen específico y en la energía interna no son despreciables. Suponiendo $\Delta z$ despreciable, se tiene:

$$\frac{c_2^2}{2g_c} - \frac{c_1^2}{2g_c} = (i_1 - i_2)\,J$$

Si la velocidad de entrada es despreciable, la velocidad de un fluido compresible que sale de un orificio o tobera es:

$$c_2 = \sqrt{2\,g_c\,J\,(i_1 - i_2)}$$

función de las entalpías de entrada y salida.

***Compresor.-*** Para un fluido compresible que circula por el interior de un compresor adiabático, se puede admitir, en primera aproximación, que $q = 0$; se puede suponer también que $\Delta z = 0$ y

que la variación de la velocidad es muy pequeña en comparación con la diferencia de entalpías $(i_2 - i_1)$ por lo que:

$$- \frac{w_k}{J} = i_2 - i_1$$

en la que el signo menos es consecuencia de que al compresor hay que aplicarle un trabajo; el efecto del compresor se manifiesta por un incremento de la entalpía del fluido desde la entrada a la salida.

***Bomba.***- La diferencia que existe entre una bomba y un compresor radica en que el fluido para el proceso de bombeo se considera incompresible, siendo su volumen específico invariable, el mismo a la entrada y a la salida. Si se admite que el rozamiento del fluido es casi nulo, la variación de energía interna ha de ser nula, $\Delta u = 0$.

La ecuación de la energía se simplifica y se reduce a la expresión:

$$- w_k = (p_2 - p_1)\, v$$

## II.5.- CONCEPTO DE ENTROPÍA

El flujo de calor es función de la diferencia de temperaturas que, a su vez, fija la intensidad del flujo. Si la cantidad de calor se divide por su temperatura absoluta, el cociente se denomina *entropía*, de la forma:

$$s_2 - s_1 = \Delta s = \int_1^2 \frac{\delta q_{rev}}{T}$$

La utilización del símbolo $\delta$ significa que el calor $q$ depende del proceso y no es una propiedad del sistema, por lo que $\Delta q$ representa sólo una cantidad infinitesimal y no una diferencial en sentido matemático; lo mismo se puede decir del trabajo.

Para un flujo de calor reversible a presión constante se tiene, $dq_{rev} = c_p\, dT$, magnitud que representa el calor aplicado reversiblemente al sistema, como en el caso de una caldera, o el equivalente a un flujo interno de calor, debido a rozamientos o a otras irreversibilidades.

***Procesos reversibles.-*** Los procesos termodinámicos reversibles sólo existen en teoría, pero en procesos de flujo de calor y de trabajo desempeñan una importante función en la definición del caso límite; las propiedades de un sistema en un proceso reversible son homogéneas, ya que no existen variaciones a lo largo de las diversas partes del sistema.

La combinación de los Principios Primero y Segundo de la Termodinámica conduce a la expresión:

$$du = T\, ds - \delta w_k = T\, ds - p\, dv$$

siendo: $\delta(w_{rev}) = p\,dv$ , el trabajo reversible, para una expansión en donde la presión está en equilibrio con las fuerzas exteriores que actúan sobre el sistema.

El valor de la entalpía se puede poner en la forma

$di = T\,ds + v\,dp$

en la que el término $(v\,dp)$ representa en un sistema abierto el trabajo mecánico reversible por unidad de masa.

***Procesos irreversibles.-*** Todos los procesos reales son irreversibles, debido:

- *Al rozamiento*
- *A la transferencia de calor con diferencias finitas de temperatura*
- *A la expansión provocada por una fuerza finita en la frontera del sistema*

Los procesos reales se pueden resolver en forma aproximada sustituyéndolos por una serie de procesos reversibles, teniendo dicha serie los mismos estados inicial y final que el proceso real sustituido. En la Fig II.2 se representa la expansión adiabática del vapor en una turbina, o la expansión de un gas cualquiera desde $p_1$ hasta $p_2$ para producir un trabajo mecánico.

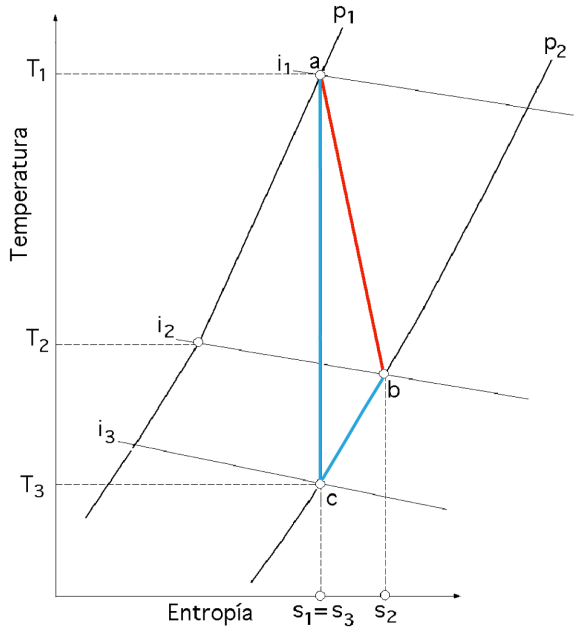


*Fig II.2- Expansión irreversible a-b*

La máxima energía disponible para el trabajo en un sistema adiabático, es el valor $(i_1 - i_3)$ en donde $i_3$ se define por la expansión isentrópica adiabática entre $p_1$ y $p_2$ ; una parte de esa energía disponible, del orden del 10÷15%, representa la pérdida de trabajo $w_{roz}$ debida al rozamiento y a las pérdidas relativas a la configuración de las conducciones, que limita el salto entálpico Δi para el trabajo mecánico, al intervalo $(i_1 - i_2)$.

Los dos caminos reversibles utilizables para llegar al punto b de la Fig II.2 son el que va desde: $\begin{cases} - \text{ "a" hasta "c", a entropía constante} \\ - \text{ "c" hasta "b", a presión constante} \end{cases}$

Estas transformaciones proporcionan la ecuación:

$(i_1 - i_3) - (i_2 - i_3) = i_1 - i_2$

El punto *b* queda definido al calcular $i_2$, lo que determina el valor de $T_2$.

Los valores de $v_1$ y $v_2$ se obtienen de Tablas de propiedades físicas.

El valor $\Delta i_{3-2}$ se puede obtener gráficamente, mediante el área que queda debajo de la curva $p_2$ entre los puntos *c* y *b*, o por la expresión:

$$\Delta i_{3-2} = \int_3^2 T\ ds$$

Las áreas limitadas por las transformaciones reversibles en el diagrama *(T, s)*, representan el flujo de calor por unidad de masa *q* entre el sistema y el medio exterior.

Una situación similar se plantea en la relación entre trabajos y áreas bajo las transformaciones reversibles, en un diagrama *(p, v)*.

Como consecuencia de esta distinción entre transformaciones reversibles e irreversibles, cuando se realizan análisis de ciclos hay que tener cuidado en la interpretación gráfica de las áreas consideradas.

En general, la valoración se hace descomponiendo la transformación en pequeños escalones; una parte de $w_{roz}$ (que tiene el mismo efecto que el calor aplicado al sistema correspondiente a la primera expansión) se puede recuperar en el siguiente escalón. Este es el fundamento del factor de recalentamiento que normalmente se utiliza en el análisis de las expansiones en una turbina de vapor de varios escalonamientos.

Como en un diagrama *(i, s)* o en un *(T, s)*, las curvas de presión constante son divergentes, la suma de los valores individuales de $\Delta i_{escalón}$ (saltos isentrópicos), para los correspondientes saltos $\Delta p_{escalón}$ (escalones de expansión irreversible), resulta ser mayor que el $\Delta i_{total}$ correspondiente entre las presiones inicial y final, por lo que el trabajo mecánico obtenido con las expansiones parciales, es mayor que el que se consigue con una única expansión isentrópica entre las presiones inicial y final.

## II.6.- CICLOS

Un ciclo es una representación de una serie de procesos termodinámicos que configuran una cadena cerrada que se puede representar en cualquier sistema de coordenadas termodinámicas.

***CICLO DE CARNOT.***- Se utiliza para definir las características funcionales de un motor térmico, ya que constituye un ciclo en el que todos sus procesos son reversibles Fig II.3; no tiene equivalente alguno en las aplicaciones prácticas.

La única forma de ejecutar un proceso a temperatura constante, en sistemas de una sola fase, sería aproximarse por: $\begin{cases} \text{- una serie compuesta de expansiones isentrópicas y recalentamientos isobáricos} \\ \text{- y otra serie formada por compresiones isentrópicas y refrigeraciones isobáricas} \end{cases}$

Una desventaja de un motor de gas con ciclo de Carnot, sería la pequeña relación entre el trabajo neto (diferencia entre los trabajos de expansión y de compresión) y el trabajo bruto (trabajo de expansión).




*Fig II.3- Ciclos de Carnot; a) Para un gas ; b) Para un vapor húmedo; c) Para un vapor sobrecalentado*

Para un ciclo de dos fases, en la práctica tendría dificultades mecánicas de compresión húmeda y, en menor grado, de expansión húmeda, al manipular las mezclas *vapor + agua*.

El ciclo de Carnot ilustra los principios termodinámicos básicos y dado que los procesos son reversibles, permite obtener el máximo rendimiento que se podría alcanzar en un sistema que evolucionase entre las temperaturas del foco caliente y del foco frío.

En un diagrama (T-s) el rendimiento es:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

La formulación del rendimiento térmico se puede extender a todos los ciclos reversibles, en los que $T_1$ y $T_2$ se definan como temperaturas medias, calculadas dividiendo el calor aplicado y el eliminado reversiblemente entre $\Delta s$; por esta razón, todos los ciclos reversibles tienen el mismo rendimiento, siempre que se consideren las mismas temperaturas medias, tanto para el foco caliente como para el foco frío.

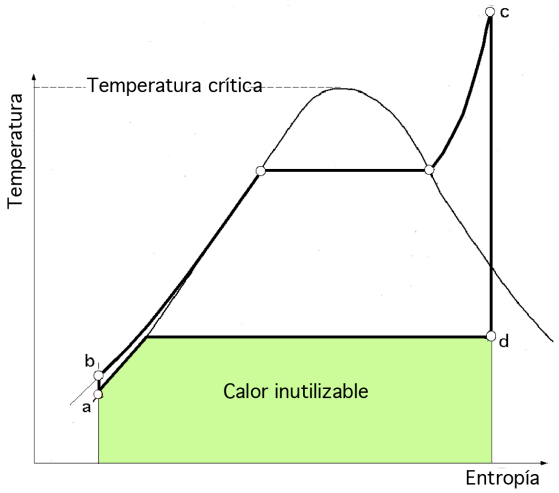



*Fig II.4.- Diagrama (T-s) del ciclo Rankine ideal*

***CICLO RANKINE.-*** Los primitivos desarrollos termodinámicos estaban centrados en las características funcionales de la máquina de vapor y era natural seleccionar un ciclo reversible, que se aproximara a los procesos relacionados con la misma, para así poderlos comparar. El ciclo Rankine, Fig II.4, cumple el objetivo precedente, de forma que todos los procesos que intervienen en el mismo se especifican sólo para el sistema y se procura llevarlos a cabo reversiblemente, configurando el siguiente orden cíclico de procesos:

*- El líquido se comprime isentrópicamente, entre a y b*

*- Entre los puntos b y c se aplica calor reversiblemente, primero al estado líquido comprimido, después a*

*las dos fases para la vaporización y finalmente al vapor para su sobrecalentamiento*

*- La expansión isentrópica, con producción de trabajo mecánico, tiene lugar entre los puntos c y d*

*- El calor inutilizable se elimina al sumidero atmosférico, entre los puntos d y a*

La característica principal del ciclo Rankine es que el bombeo se realiza en la fase líquida, evitandose los elevados trabajos de compresión y los problemas mecánicos derivados de una situación similar a la que presenta un ciclo de Carnot con una compresión de un fluido en dos fases.

La parte del ciclo entre los puntos *a* y *b* se ha representado a una escala ampliada, porque la diferencia entre la curva de saturación y el punto *b* (en el que se comienza a aplicar calor) es demasiado pequeña, para poder representarla a la misma escala que el resto del ciclo.

Por ejemplo, en la compresión isentrópica del agua desde la temperatura de saturación de 212ºF (100ºC) a 1 atmósfera (1,01 bar), hasta 100 psi (69,0 bar), el aumento de temperatura es inferior a 1ºF (0,6ºC).

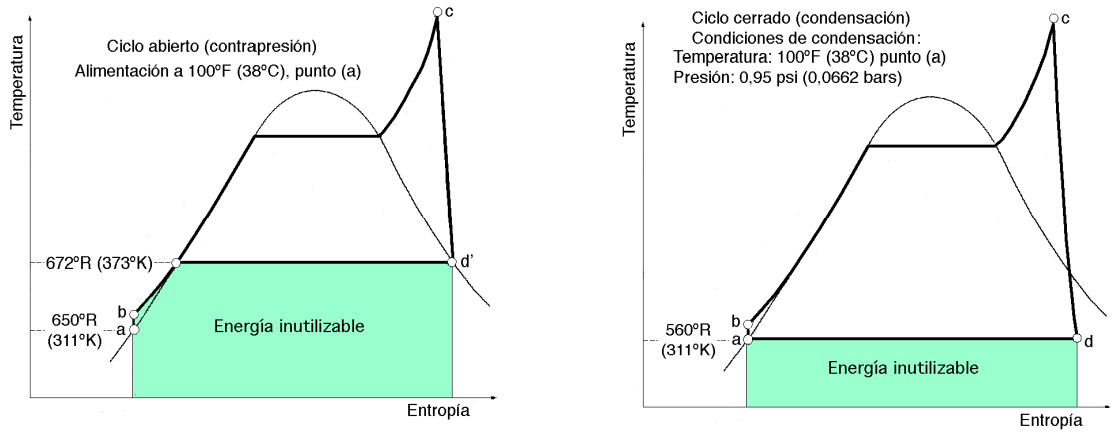



*Fig II.5.- Ciclos Rankine: a) de contrapresión ; b) de condensación*

En un ***ciclo abierto o de contrapresión***, la mínima temperatura a la que se puede eliminar calor es de 212ºF (100ºC), que es la temperatura de saturación correspondiente a la presión atmosférica, 14,7 psi (1,01 bar).

En un ***ciclo cerrado o de condensación***, la presión de condensación del fluido de trabajo es igual o inferior a la presión atmosférica, lo que supone la ventaja de disponer de una temperatura de fuente fría más baja, para eliminar calor al medio exterior, agua y atmósfera; la temperatura de condensación en el ciclo cerrado puede ser del orden de 100ºF (38ºC), o incluso menos. La Fig II.5 muestra la diferencia entre dos ciclos Rankine, uno de contrapresión y otro de condensación.

Los procesos son los siguientes:

*- La compresión de líquido tiene lugar entre a y b; las cantidades de trabajo que intervienen en cada uno de los ciclos, son idénticas*

*- La aplicación de calor se verifica entre los puntos b y c, siendo el valor del calor participante en cada ciclo, el mismo*

*- La expansión y la conversión de energía almacenada en trabajo tiene lugar entre los puntos c y d' para el ciclo abierto y entre c y d para el ciclo cerrado. Para un proceso irreversible , hay calentamiento interno del fluido y aumento de entalpía*

*- El calor residual se elimina entre los puntos d´ y a, o alternativamente entre d y a. Como esta última parte del ciclo se representa como un proceso reversible, las áreas sombreadas son proporcionales a los calores que se eliminan.*

Se observa que el calor eliminado en el ciclo abierto es de mayor magnitud.

***Ciclo Rankine regenerativo.-*** El rendimiento del ciclo reversible, en el que $T_2$ y $T_1$ son las temperaturas absolutas medias del calor eliminado y del calor aplicado, respectivamente, sugiere tres formas de mejorar el rendimiento del ciclo ideal $\begin{cases} \text{- disminuir } T_2 \\ \text{- aumentar } T_1 \\ \text{- ambas cosas a la vez} \end{cases}$

*- Poco se puede hacer en el ciclo Rankine para reducir $T_2$, a causa de las limitaciones impuestas a las temperaturas de los sumideros energéticos, en general el medio ambiente. Es posible alguna reducción en el caso de seleccionar condensadores de presión variable, (grandes unidades con dos o más escapes), por cuanto la temperatura mínima en el condensador viene influenciada por la temperatura mínima del agua de refrigeración.*

*- Hay muchas formas de incrementar $T_1$, aunque la temperatura del vapor esté limitada por la corrosión y por los esfuerzos admitidos por los materiales, en condiciones de muy alta temperatura*

Una de las primeras mejoras introducidas en el ciclo Rankine fue la adopción del calentamiento regenerativo del agua del ciclo; este tipo de calentamiento se efectúa extrayendo vapor en varios escalonamientos de la turbina, para calentar el agua del ciclo (condensada y alimentación), a medida que se bombea desde el condensador hacia el economizador de la caldera.

La Fig II.6 es un diagrama de un ciclo de vapor a presión supercrítica, muy utilizado, que muestra la disposición de varios componentes, incluyendo calentadores de agua del ciclo; este ciclo contiene una etapa de recalentamiento del vapor, que también es otro medio de aumentar la $T_1$ media. Independientemente de que el ciclo sea de alta temperatura AP o con recalentamiento intermedio, la regeneración se usa en todas las plantas energéticas modernas de vapor con condensación.

La regeneración $\begin{cases} \text{- aumenta el rendimiento del ciclo} \\ \text{- implica un menor flujo volumétrico en los escalones finales de la turbina} \\ \text{- facilita medios para la desgasificación o desaireación necesaria del agua del ciclo} \end{cases}$

Algunos parámetros utilizados en los balances energéticos de las plantas termoeléctricas, que

figuran dentro de los esquemas que representan los calentadores regenerativos de agua del ciclo, pueden ser:

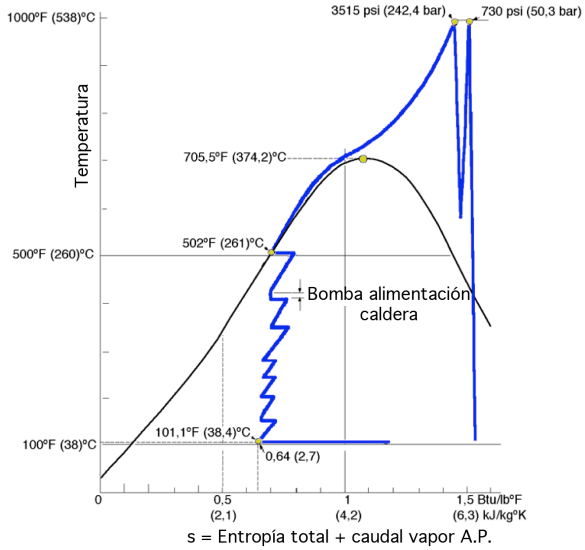



*Fig II.6.- Diagrama (T-s) para un ciclo de vapor de combustible fósil recalentamiento simple y 7 regeneradores de agua del ciclo*

*- La temperatura de aproximación del enfriador de purgas, que es la diferencia entre la temperatura de salida del lado de la carcasa del calentador y la temperatura de entrada del agua del ciclo*

*- La diferencia terminal de temperaturas, que es la diferencia entre la temperatura del vapor en el lado de la carcasa (temperatura de saturación) y la temperatura de salida del agua del ciclo*

*- La presión nominal del lado de la carcasa*

El diagrama (T-s) de la Fig II.6, muestra el principio de regeneración, en el que la temperatura media del fluido de trabajo se incrementa como consecuencia de la aplicación de calor.

En la caldera, en lugar de un aporte calorífico que debería empezar a la temperatura correspondiente al foco de agua caliente del condensador 101,1ºF (38,4ºC), el uso de calentadores de agua del ciclo eleva su temperatura a 502ºF (261ºC), a la entrada del economizador. En principio, parece conveniente fijar la temperatura del vapor recalentado en el límite máximo que admita el fluido de trabajo y su contenedor.

Sin embargo, el aumento de $T_1$ no mejora el rendimiento, por cuanto la entropía aumenta acompañando al recalentamiento, lo que puede provocar un final de la expansión de vapor en la zona de vapor sobrecalentado, con lo que la temperatura media $T_2$ de eliminación de calor se eleva, a no ser que el vapor sobrecalentado de escape se extraiga para un calentador regenerativo, que caliente agua que va a la caldera.

Como en los procesos que configuran el ciclo hay diversos regímenes de flujo, en la Fig II.6 se superponen pequeñas secciones de los diagramas *(T, s)* individuales sobre un diagrama base que identifica los parámetros respectivos de vapor y líquido saturados, que sólo se pueden comparar con puntos específicos del diagrama y corresponden a partes del ciclo que representan calor aplicado al vapor de AP y a la expansión de este vapor en la turbina de AP. En estas partes del ciclo, la entropía específica del fluido y los valores representados en el diagrama son los mismos.

En cada uno de los puntos de extracción de vapor, en las turbinas de MP y BP, la línea de expansión debe mostrar una disminución de entropía, debido al menor flujo que entra en el siguiente escalón de la turbina; los últimos escalones individuales de la línea de expansión se han desplazado hacia la derecha, para mostrar la expansión del vapor recalentado como un proceso continuo.

El calentamiento de agua del ciclo por medio de los regeneradores, y la compresión dada por las bombas, da lugar a un aumento de entropía, en el que:

*- La entropía aumenta debido al calor aplicado al agua del ciclo, en el intercambio regenerador*

*- La entropía disminuye debido a* { *- la condensación y enfriamiento de los vapores extraidos* ; *- las purgas de los calentadores regenerativos de mayor presión* }

***EXTRACCIONES Y SANGRÍAS DE VAPOR.-*** Conviene diferenciar las salidas de vapor desde cualquier punto de la turbina de vapor, en cuanto a su utilización y retorno al ciclo:

*- La extracción es un flujo de vapor para regeneración (calentamiento de agua del ciclo térmico), que se integra en el ciclo termodinámico.*

*- La sangría es un flujo de vapor para proceso que sale fuera del ciclo y que no retorna al mismo.*

***Ciclo Rankine normal.-*** Cuando el vapor que se expansiona adiabáticamente a partir de C, Fig II.7, llega al estado indicado por el punto 1 se extrae una parte del vapor, con lo que la mezcla restante adquiere las características del punto 2, que se expansiona de nuevo, hasta el punto 3, donde se extrae una nueva fracción, y así sucesivamente; en este proceso se describe, aproximadamente, la línea continua (C2468... ...D'), prácticamente conjugada con la (BF); cuanto más numerosas sean las sangrías, más se acercará la línea de expansión a la línea continua (CD').

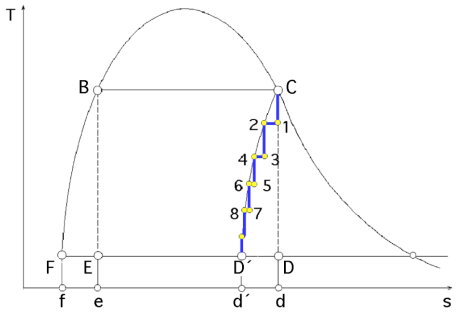


*Fig II.7.- Ciclo Rankine normal con infinitas extracciones*

El vapor que se extrae en cada sangría se utiliza para calentar el agua de alimentación del generador de vapor en los economizadores o precalentadores, a la temperatura correspondiente a la extracción; en estas condiciones, el área del ciclo de Carnot y el área del nuevo ciclo, son casi iguales. El calor cedido por el vapor en estas sangrías, área (Cdd'D'C), equivale aproximadamente al necesario para calentar el agua de F a B, área (BefFB), por lo que ambos rendimientos serían muy semejantes.

Para estudiar el ciclo se puede suponer que el fluido de trabajo atraviesa isentrópicamente las etapas de la { *- turbina* ; *- bombas* }, y que en el { *- generador de vapor* ; *- condensador* ; *- precalentador del agua de alimentación* }, el fluido no experimenta pérdidas de presión

Para una extracción de vapor, la presión óptima de la misma es la correspondiente a la temperatura media entre la temperatura de la caldera y la del condensador. Si el vapor se extrae en alguna situación límite, ya sea antes de la entrada en la turbina, o bien después de la misma, se encuentra que la eficiencia térmica no se modifica, y de ahí el que como la regeneración sí aumenta la efi-

ciencia, la existencia de una presión óptima de extracción es fundamental; así se realizan las siguientes operaciones, Fig II.8:

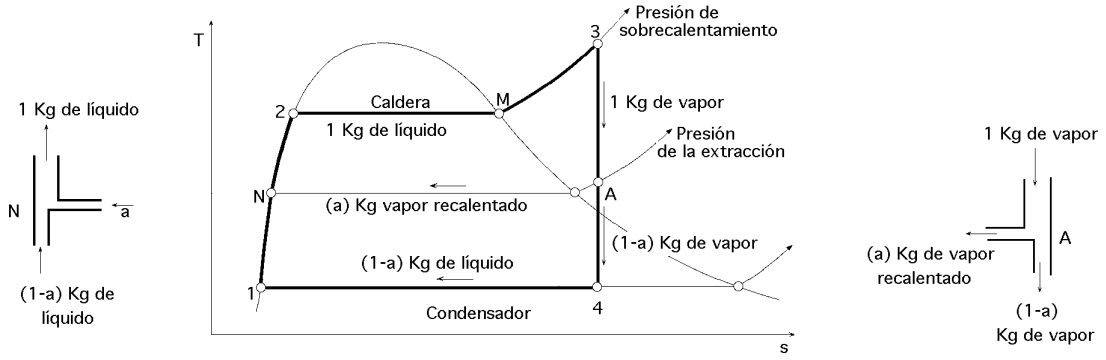



*Fig XII.8.- Ciclo Rankine con sobrecalentamiento y una extracción de vapor*

*(N2) es el calentamiento del líquido*

*(2M) es el proceso de vaporización en la caldera*

*(M3) es el sobrecalentamiento*

*(34) es la expansión en la turbina, 1 kg en (3A) y (1- a) kg en (A4)*

*(41) es la condensación, (1- a) kg*

*(AN) es el proceso de la extracción de vapor, a kg*

El número máximo de economizadores puede llegar a ser de 6 a 8, para grandes turbinas y, aunque aumentan la eficiencia térmica, también es cierto que se aumenta el coste de la instalación, lo cual obliga a limitar su número; así que, aunque en principio un gran número de economizadores originaría un calentamiento progresivo del agua de alimentación de la caldera, la complejidad de tal instalación supone que el número más usual de precalentadores se limite a 3 ó 4.

***Temperatura óptima de la primera extracción de vapor.-*** Se calcula de forma que exista la misma diferencia de temperaturas entre la temperatura $T_s$ de entrada del vapor en la caldera y la temperatura de precalentamiento y la temperatura de precalentamiento y la temperatura de condensación.

Para esta primera extracción hay que tener en cuenta el número de calentamientos que existen en el ciclo, dos, uno para el generador de vapor y otro para el precalentamiento del agua de alimentación. Si por ejemplo, Fig II.9a, se supone que la temperatura del vapor que entra en la caldera es de 195°C, y la temperatura de entrada en el condensador de 39°C y 0,070 bar, el salto de temperaturas en la turbina es:

$$Intervalo = \frac{195°C - 39°C}{2} = 78°C \quad \Rightarrow \quad Temperatura\ de\ la\ extracción = T_{cond} + 78°C = 39°C + 78°C = 117°C$$

que se corresponde con una presión, $p_{ext}$ = 1,806 bar

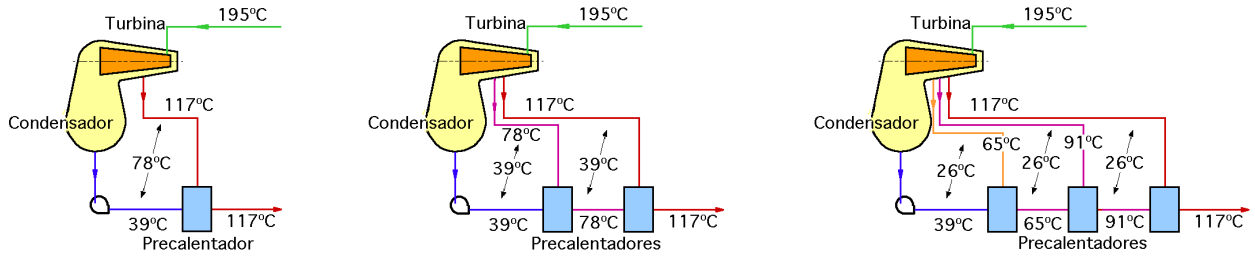



*Fig II.9.- Efecto del número de precalentamientos entre las temperaturas del generador de vapor y el condensador*

***Temperaturas de extracción para dos extracciones de vapor.-*** Al incrementar el número de precalentamientos, se mantiene para la primera extracción la temperatura óptima calculada anteriormente, en nuestro ejemplo 117°C, Fig II.9b.

La segunda extracción se hace teniendo en cuenta el intervalo de temperaturas:

$$\frac{117°C - 39°C}{2} = 39°C \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} T_{Primer\ precalentamiento} = 117°C \quad \Rightarrow \quad 1,82\ bar \\ T_{Segundo\ precalentamiento} = 117°C - 39°C = 78°C \quad \Rightarrow \quad 0,4375\ bar \end{cases}$$

para una temperatura en el condensador de 39°C.

***Temperaturas de extracción para tres extracciones de vapor.-*** Se sigue manteniendo para la primera extracción la temperatura óptima, calculada anteriormente; en nuestro ejemplo 117°C, Fig II.9c, y a partir de élla, el resto.

Las extracciones se hacen teniendo en cuenta el intervalo entre las mismas

$$\frac{117°C - 39°C}{3} = 26°C \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} T_{Primer\ precalentamiento} = 117°C \quad \Rightarrow \quad 1,82\ bar \\ T_{Segundo\ precalentamiento} = 117°C - 26°C = 91°C \quad \Rightarrow \quad 0,7286\ bar \\ T_{Tercer\ precalentamiento} = 91°C - 26°C = 65°C \quad \Rightarrow \quad 0,25\ bar \end{cases}$$

para una temperatura en el condensador de 39°C. Y así sucesivamente para más extracciones.

*Ejemplo.-* Si se considera el ejemplo de la Fig II.10, y concretamente el calentador nº 3, previo al desgasificador, que eleva la temperatura de un flujo de 3.661.954 lb/h, desde 203,8ºF hasta 239,5ºF; según Tablas, la entalpía del agua del ciclo se incrementa desde 171,1 Btu/lb hasta 207,9 Btu/lb y, análogamente, la entropía de la misma crece desde 0,2985 Btu/lbºF hasta 0,3526 Btu/lbºF, por lo que el incremento total de entropía del vapor de AP que fluye con un caudal másico de 4.813.813 lb/h, es:

$$\frac{(s_2 - s_1)\, m_{agua\ alim.}}{m_{Vapor\ AP}} = \frac{(0,3526 - 0,2985) \times 3.661.954}{4.813.813} = 0,0412 Btu/lb°F$$

La temperatura del agua de alimentación sube 36,5ºF, siendo el calor total absorbido:

$$(i_2 - i_1)\, m_{Agua\ alim.} = (208,0 - 171,2) \times 3.661.954 = 134.759.907 Btu/lb$$

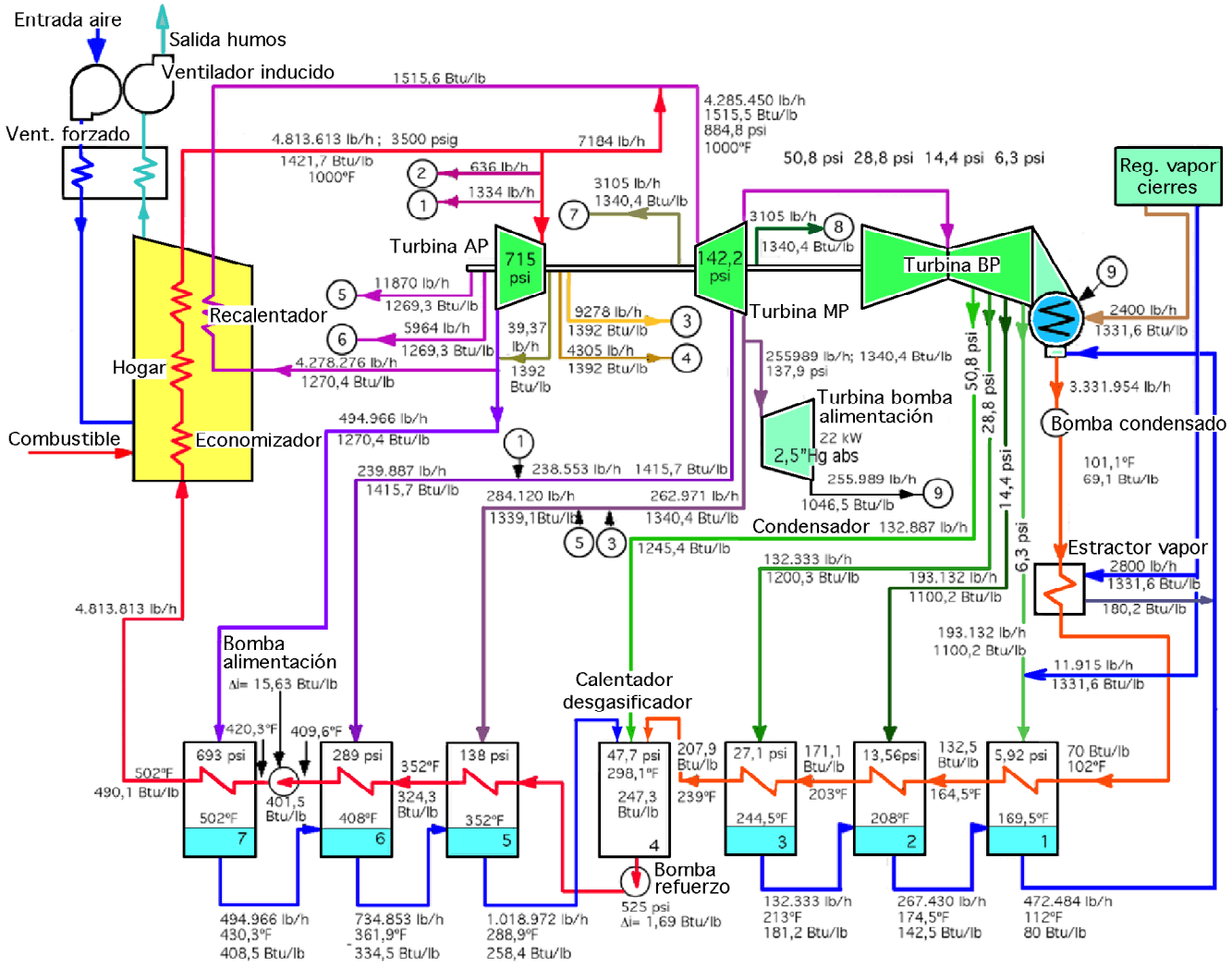



*Fig II.10.- Balance térmico ciclo supercrítico a 3500 psig, en el que: G gasto másico (lb/h), i entalpía (Btu/lb), p presión (psi)*

En el lado de la fuente de calor (vapor), para el balance correspondiente al mismo calentador, se extraen 132.333 lb/h de vapor a 28,8 psig, de la turbina de BP; este vapor tiene una entalpía de 1200,3 Btu/lb y una entropía de 1,7079 Btu/lbºF.

El vapor extraído se enfría y condensa, llegando a una entalpía final de:

$$i_2 = i_1 - \frac{Calor\ absorbido\ agua\ ciclo}{m_{extr}} = 1200{,}3 - \frac{134.759.907}{132.333} = 182 Btu/lb$$

En Tablas de vapor de agua se encuentra que el vapor extraído se ha enfriado hasta 213ºF, con una entalpía de 181,2 Btu/lb. La entropía correspondiente a la purga del calentador es de 0,3136 Btu/lbF; por lo que la disminución de entropía es:

$$\frac{(s_1 - s_2)\, m_{extr}}{m_{Vapor\ AP}} = \frac{(1{,}7079 - 0{,}3136) \times 132.333}{4.813.813} = 0{,}0383 Btu/lb°F$$

y el calentador tiene un incremento de entropía: $\Delta s_{calentador} = 0{,}0412 - 0{,}0383 = 0{,}0029\ Btu/lb°F$

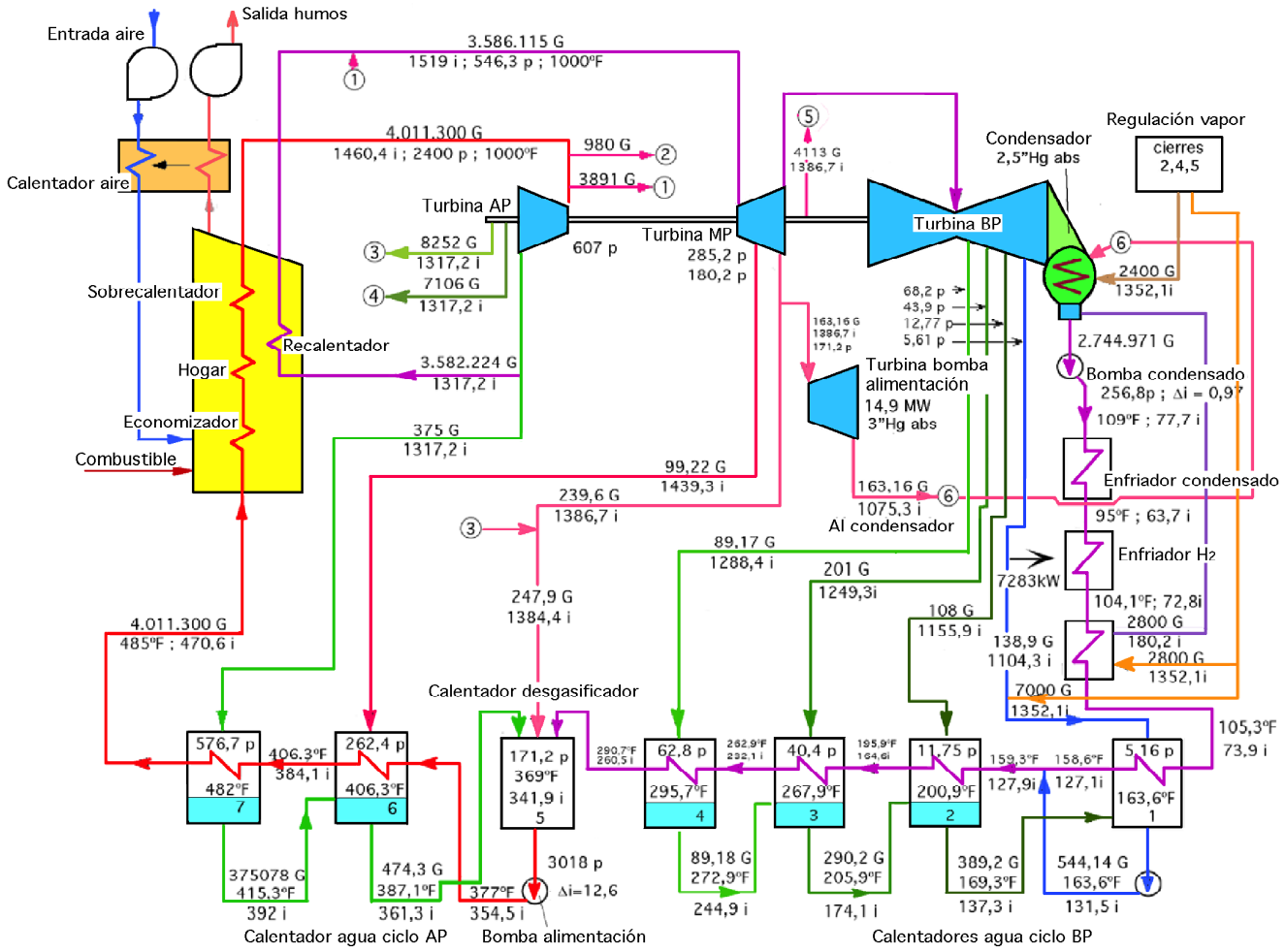



*Fig II.11.- Balance térmico de un ciclo subcrítico a 2400 psig, en el que: G gasto másico (lb/h), i entalpía (Btu/lb), p presión (psi)*

***ENERGÍA UTILIZABLE.-*** La *anergía* es el resultado de multiplicar la entropía $s$ por la temperatura absoluta $T_0$ del sumidero calorífico disponible, $s\ T_0$.

Hay que tener en cuenta que un incremento de entropía representa una determinada energía calorífica, que es inutilizable para su conversión en trabajo; por lo tanto, el aumento neto de entropía del agua a través del calentador, es una pérdida de energía utilizable, que se puede atribuir a la:

- *Caída de presión requerida para la circulación del flujo*
- *Diferencia de temperaturas indispensable para toda transferencia térmica*

La expresión: $e = i - s\ T_0$ , se define como *energía utilizable* o *exergía* y depende de la temperatura del foco frío.

La combinación de los Principios Termodinámicos indica que la diferencia de energías utilizables entre dos puntos de un proceso reversible, representa la máxima cantidad de trabajo específico que se puede extraer de un fluido, que depende de la variación experimentada por las variables $i$ y $s$ relativas a los puntos. El concepto de energía utilizable resulta útil para el análisis de ciclos, con el

fin de poder llegar a la optimización de las características térmicas funcionales de los diversos componentes, y lograr el máximo rendimiento del ciclo.

Comparando el trabajo real con el trabajo máximo reversible, determinado por la diferencia de energías utilizables, se deduce la posible mejora que se puede introducir en un ciclo determinado.

***Rendimiento del ciclo Rankine.-*** El rendimiento del ciclo Rankine se define en la forma:

$$\eta = \frac{w_{sal} - w_{ent}}{Q_1} = \left| \begin{array}{c} w_{sal} = (i_c - i_d)\,\eta_{Turbina}\; m_w \\ w_{ent} = \dfrac{(i_b - i_a)\,m_w}{\eta_{Bomba}} \simeq \dfrac{v_a\,(p_b - p_a)}{\eta_{Bomba}} \\ Q_1 = (i_c - i_b)\,m_w \end{array} \right| = \frac{(i_c - i_d)\,\eta_T - \dfrac{v_a\,(p_b - p_a)}{\eta_B}}{i_c - i_d}$$

En una instalación simple generadora de energía eléctrica que utilice un ciclo Rankine, hay que tener en cuenta que:

*- No toda la energía química del combustible que se suministra a la caldera es absorbida por el vapor, (80÷ 85%) de la correspondiente energía de entrada.*

*- Parte de la energía producida se utiliza por una serie de equipos auxiliares, como ventiladores, soplantes, sistemas de protección medioambiental, equipos de tratamientos de aguas, equipos de manipulación de combustibles, etc.*

Si se tienen en cuenta estos factores y se añaden a la ecuación anterior para el caso de ciclo simple, se obtiene el rendimiento neto de generación energética:

$$\eta_{net} = \frac{(i_c - i_d)\,\eta_T \eta_g - \dfrac{v_a\,(p_b - p_a)}{\eta_B \eta_{motor}} - w_{aux}}{\dfrac{i_c - i_d}{\eta_b}} \text{ , con } \begin{cases} \eta_g \text{ rendimiento del generador eléctrico (alternador)} \\ \eta_{motor} \text{ rendimiento motor bomba de alimentación} \\ w_{aux} \text{ la potencia utilizada en auxiliares} \end{cases}$$

El rendimiento energético bruto se calcula haciendo $w_{aux} = 0$ .

El cálculo del rendimiento, en los modernos sistemas energéticos de vapor a AP, es mucho más complejo, ya que hay que incluir el recalentamiento del vapor, simple o doble, y las extracciones de vapor para el calentamiento regenerativo del agua del ciclo.

***Consumo calorífico del ciclo Rankine.-*** El consumo calorífico es una expresión utilizada frecuentemente para indicar los rendimientos de las plantas energéticas y se define por la relación:

$$\text{Consumo calorífico (Btu/kWh)} = \frac{\text{Energía total calor combustible (Btu/h)}}{\text{Energía eléctrica (kW)}}$$

Los consumos caloríficos neto y bruto, están relacionados con el rendimiento de la planta, por

las expresiones: $\begin{cases} \text{- Consumo calorífico NETO} = \dfrac{3412\ Btu/kW}{\eta_{Neto}} \\ \text{- Consumo calorífico BRUTO} = \dfrac{3412\ Btu/kW}{\eta_{Bruto}} \end{cases}$

## II.7.- CICLOS DE VAPOR EN PLANTAS NUCLEARES

La Fig II.12 representa un ciclo Rankine cuya fuente de energía térmica para el ciclo de vapor, es un sistema nuclear con reactor de agua presurizada. Por el circuito de refrigeración de la instalación, circula el refrigerante (agua) a alta presión, desde el reactor nuclear de agua presurizada hacia el generador de vapor.

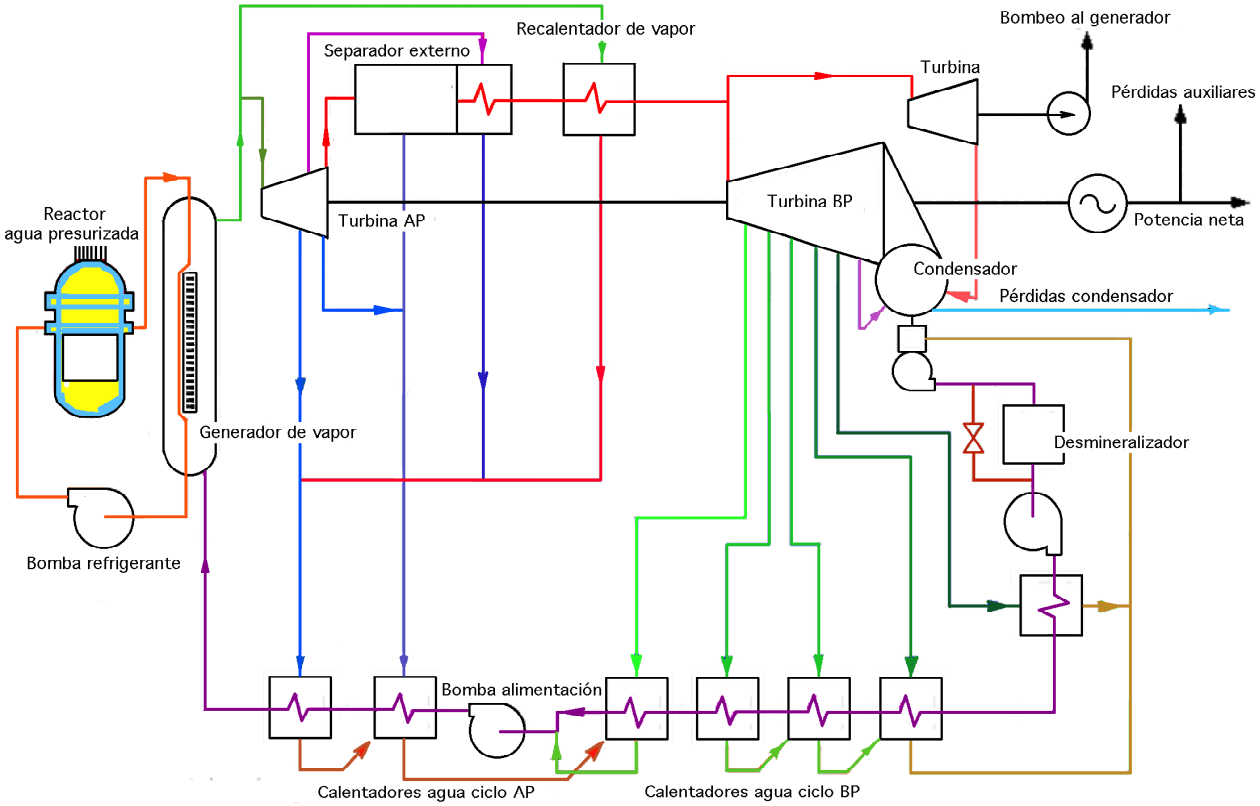



*Fig II.12.- Diagrama ciclo energético con combustible nuclear (900 psig, 566°F, 303°F) ó ((62,1 bar, 297°C, 262°C)) Recalentador con extracción de AP, separador de humedad y 6 calentadores de agua regenerativos*

El calor producido por la fisión del uranio enriquecido en el núcleo del reactor, se transfiere al agua del ciclo (agua de alimentación) suministrada al generador de vapor, cuyo vapor se lleva a la turbina. Los generadores de vapor de una planta nuclear son intercambiadores de calor tubulares, configurados por una carcasa envolvente en cuyo interior se sitúa el paquete tubular.

El refrigerante de AP que enfría el núcleo del reactor, fluye siempre por el interior de los tubos del generador de vapor. El agua de alimentación del ciclo, de menor presión, se vaporiza dentro de la carcasa del intercambiador, por el exterior de los tubos.

En el caso del sistema que cuenta con un reactor de agua presurizada, el ciclo Rankine está totalmente del lado del agua no reactiva (secundario), que se vaporiza primero y circula después en el circuito del ciclo *vapor-agua*. El sistema de refrigerante del reactor (primario) es la fuente calorífica del ciclo Rankine, que es el generador de energía.

La presión de vapor a la salida del generador varía con las plantas, debido a diferencias en el diseño, y se sitúa generalmente entre $\begin{cases} 700 \div 1000\ psi \\ 48{,}3 \div 69{,}0\ bar \end{cases}$

*- Un ciclo de vapor con sistema nuclear, dotado de generador de vapor de un paso (proceso directo), produce vapor entre* $\begin{cases} 925\ psi\ (63{,}9\ bar) \\ 570°F\ (299°C) \end{cases}$

*- El flujo de vapor generado llega a la turbina de AP a* $\begin{cases} 900\ psi\ (62{,}1\ bar) \\ 566°F\ (297°C) \end{cases}$

Otros sistemas nucleares utilizan *generadores de vapor con recirculación*, en los que el agua del ciclo antes de ir al paquete tubular del generador de vapor, se mezcla con el agua saturada procedente de los separadores (*vapor-agua*) del sistema generador; en la vaporización la mezcla (*vapor-agua)* alcanza un título x = 0,25÷0,35 al final del intercambiador y a la entrada de los separadores internos correspondientes al generador de vapor.

Los separadores:

*- Retornan el flujo de líquido para mezclarle con el agua del ciclo que entra en el generador de vapor*

*- Dirigen el flujo de vapor hacia la salida del generador de vapor*

En el intervalo de tiempo que precisa el flujo para llegar a la turbina de AP se forma una pequeña cantidad de humedad.

Si el generador de vapor fuese de un paso, y capaz de suministrar vapor sobrecalentado, hay que tener en cuenta las limitaciones de $\begin{cases} presión \\ temperatura \end{cases}$ que tienen los diversos componentes de la planta nuclear.

En consecuencia, las líneas de expansión de estos ciclos energéticos penetran ampliamente en la región de vapor húmedo, por lo que una planta nuclear consiste en un ciclo térmico de vapor saturado o casi saturado.

En la Fig II.13 se presentan en un diagrama *(i, s)* las líneas de expansión correspondientes al sistema nuclear de vapor de la Fig II.12, supuesto un generador de vapor de un paso.

El vapor sobrecalentado se entrega a la turbina con sólo 34ºF (19ºC) por encima de la correspondiente temperatura de saturación; aunque este sobrecalentamiento mejora el rendimiento de la turbina, quedan aún grandes cantidades de humedad condensada en el interior de la turbina de vapor. Si la línea de expansión indicada en la Fig II.13 se hace sólo en una etapa, desde las condicio-

nes iniciales hasta la presión del escape, que es de 2"Hg = 1 psi = 0,07 bar, la humedad formada sobrepasa el 20%.

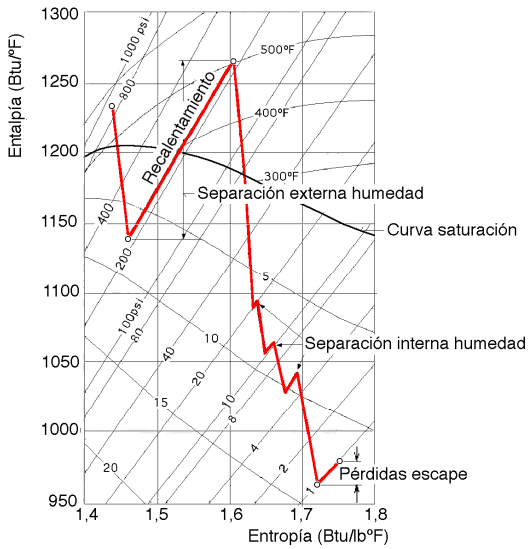



*Fig II.13.- Diagrama de Mollier del ciclo de vapor en planta nuclear de la Fig II.12 (900 psig, 566°F, 303°F) ó (62,1 bar, 297°C, 262°C). Recalentador con extracción de AP, separador de humedad y 6 calentadores de agua regenerativos*

Las modernas turbinas de potencia toleran hasta un 15% de humedad; las humedades que superan este valor provocan erosiones en los álabes y reducen el rendimiento de la expansión.

Aparte de las pérdidas mecánicas debidas a:

- *El intercambio de momentos entre las partículas condensadas móviles*
- *La alta velocidad del vapor*
- *La rotación de los álabes de la turbina*

existe también una pérdida termodinámica asociada a las condensaciones en la turbina.

La expansión del vapor es demasiado rápida para permitir que cuando se producen condensaciones, haya condiciones de equilibrio, por lo que el vapor se subenfría y pierde una parte de la energía utilizable que se libera por la condensación.

*Tabla II.1.- Comparación de la energía utilizable con y sin eliminación de humedad*

| *Al final de la expansión* | *Sin extracción humedad* | *Con extracción humedad* |
|---|---|---|
| *p = presión (psi)* | *10,8* | *10,8* |
| *i = Entalpía (Btu / lb)* | *1057,9* | *1064,7* |
| *s = entropía (Btu / lb°F)* | *1,6491* | *1,6595* |
| *$T_0$ (°R) a 2" Hg* | *560,8* | *560,8* |
| *To s (Btu / lb)* | *924,8* | *930,7* |
| *e = i - $T_0$ s (tBu / lb)* | *133,1* | *134* |
| *Δe* | *base* | *+ 0,9* |

La Fig II.12 indica dos métodos de *eliminación de humedad* empleados en este ciclo, y la Fig II.13 señala en el diagrama correspondiente al ciclo, el efecto de esta eliminación.

*- En el primer método tras la expansión del vapor en la turbina de AP, éste pasa a través de un separador de humedad externo a la turbina, que tiene una pequeña caída de presión; una vez el vapor ha pasado por este separador, se recalienta en dos etapas,* $\begin{cases} primero\ con\ vapor\ de\ extracción \\ después\ con\ vapor\ de\ alta\ presión \end{cases}$ *, hasta la temperatura de 503°F (262°C), antes de entrar en la turbina de BP.*

*- En el segundo método de eliminación de humedad, en el reverso de los álabes de la turbina se utilizan acanaladuras especiales, que drenan en varios escalones de la turbina de BP. La humedad separada sale de la turbina con el vapor extraido. La separación de la humedad interior en la turbina, reduce la erosión y proporciona una ventaja termodinámica por la divergencia que presentan las isobaras en el diagrama, conforme crecen la entalpía y la entropía.*

Esto se pone de manifiesto por medio de la energía utilizable, como se indica a continuación:

*- En la Fig II.13, se considera un escalón de eliminación de humedad a 10,8 psi*
*- Tras la expansión hasta 10,8 psi la humedad del vapor es 8,9%.*
*- La separación interior reduce la humedad anterior a 8,2%*

El incremento de energía utilizable Δe debido a la extracción de la humedad, es de $\begin{cases} 0{,}9\ Btu/lb \\ 2{,}1\ kJ/kg \end{cases}$

## II.8.- CICLOS DE VAPOR SUPERCRÍTICOS

Sabemos que el rendimiento térmico se mejora con el incremento de la temperatura media en el proceso de la aplicación de calor; esta temperatura se eleva al aumentar la presión del agua de alimentación, ya que en el ciclo Rankine, la presión de entrada en la caldera fija la temperatura de saturación.

Si la presión se incrementa por encima de la del punto crítico, 3208,2 psi (221,2 bar), la aplicación de calor no reproduce el fenómeno de la vaporización, sino que pasa a través de un punto en el que las propiedades del agua cambian de las propias del estado líquido a las del estado gaseoso.

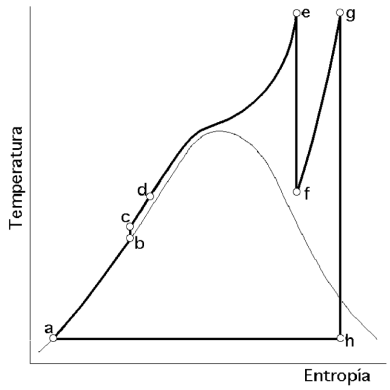


*Fig II.14.- Ciclo supercrítico con recalentamiento*

El calentamiento adicional sobrecalienta el vapor y, por tanto, la primera parte de la expansión en la turbina de AP se puede procesar totalmente en la región del vapor sobrecalentado. Esto es lo que ocurre en el ciclo supercrítico de vapor, (conocido como planta Benson de sobrepresión cuando se propuso en la década de 1920). La primera unidad comercial, que incorporó un ciclo supercrítico de vapor, se puso en servicio en 1957.

*- El punto a representa la salida de la bomba de condensado, que coincide con la entrada a la misma*

*- Entre los puntos a y b, el agua condensada se calienta en los calentadores de agua de BP del ciclo, que*

*utilizan líquidos saturados o vapor de extracciones de la turbina de vapor*

*- El punto b corresponde a la entrada en la bomba de agua de alimentación, de AP; esta bomba incrementa la presión hasta 4.200 psi (289,6 bar), alcanzando las condiciones del punto c*

*- Entre los puntos c y d, el calentamiento del agua de alimentación se hace en calentadores de agua del ciclo, con extracciones de vapor desde las turbinas de AP y BP; el punto d es el correspondiente a la entrada en la caldera supercrítica*

Debido a la naturaleza del fluido, la caldera supercrítica es de paso único y no precisa equipo de separación *vapor-agua*; este diseño, identificado como de presión universal, se utiliza en las unidades supercríticas.

Para el ciclo supercrítico indicado, el vapor llegaría a la turbina de AP a $\begin{cases} 3.500\ psi\ (241{,}3\ bar) \\ 1050°F\ (566°C) \end{cases}$

*- La expansión se completa en esta turbina de AP hasta llegar a las condiciones correspondientes al punto f que pertenece a un estado de vapor sobrecalentado*

*- El vapor de salida de la turbina de AP se recalienta en la unidad generadora de vapor, aproximadamente hasta 1040°F (560°C), antes de entrar en la siguiente turbina de BP a 540 psi (37,3 bar), lo que corresponde al punto g representado en el diagrama*

*- El ciclo se completa con la condensación del vapor de escape de la turbina de BP, hasta obtener un líquido ligeramente subenfriado. A continuación, una bomba de condensado entrega el líquido a los calentadores de agua del ciclo, de BP, punto a del diagrama (T, s)*

El punto representativo del agua condensada subenfriada a la entrada de la bomba de condensado, y el punto *a* se confunden. En un ciclo supercrítico, la alta presión del agua de alimentación requiere un aporte energético para accionar la bomba de alimentación, que es más elevado que el necesario para un ciclo Rankine de vapor saturado o con sobrecalentamiento.

*En un ciclo Rankine con presión de admisión de vapor subcrítica a 2400 psi (165,5 bar), la bomba de alimentación consume del orden del 2,5% de la potencia nominal de la turbina.*

*En un ciclo Rankine supercrítico, la potencia de bombeo se incrementa hasta un 5% de la potencia de la unidad, que se compensa y justifica con la consiguiente mejora del rendimiento térmico del ciclo.*

En general, cuando se consideran plantas con parámetros básicos equivalentes (tipo de combustible, temperatura de sumidero energético, etc.), el ciclo supercrítico de vapor produce un 4% más de potencia neta que el ciclo Rankine regenerativo de presión subcrítica.

## II.9.- APLICACIONES DEL VAPOR A PROCESOS

Desde un punto de vista económico, en las plantas energéticas termoeléctricas que emplean combustibles fósiles, el rendimiento térmico no supera el 40%, siendo más alto en las plantas de ci-

clo combinado. En plantas nucleares, el rendimiento térmico no supera el 34%; en cualquier caso, más de la mitad del calor liberado por el combustible se transfiere al medio ambiente.

Los recursos energéticos se pueden aprovechar de forma más eficiente, por ejemplo, mediante la utilización de plantas polivalentes de vapor, en las que el vapor de escape o de extracciones de una turbina, a presión suficiente, se utilice para caldeo en procesos industriales o para calefacción ambiental, siendo así posible alcanzar una utilización térmica global del orden del 65% o más.

Las instalaciones combinadas de generación de energía eléctrica y de vapor para procesos, han sido habituales durante muchos años; sin embargo, la demanda de vapor para procesos no ha sido suficiente, ni tampoco lo es actualmente en la mayoría de las plantas productoras de electricidad, para que se pueda permitir el uso de un ciclo combinado.

Tendencias recientes hacia instalaciones de cogeneración de plantas que utilizan biomasa y de unidades para la conversión de residuos en energía, han reactivado el interés por las aplicaciones del vapor para calefacción urbana y otros procesos.

## II.10.- CICLO ELEMENTAL DE TURBINA DE GAS

La temperatura máxima del ciclo Rankine con sobrecalentamiento (Hirn) es del orden de 1100ºF (593ºC), que viene limitada por las restricciones de los materiales, (punto metalúrgico). Uno de los procedimientos para superar este límite consiste en sustituir el fluido de trabajo (vapor), por aire o gases.

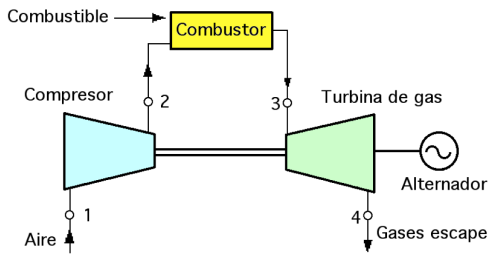


*Fig II.15.- Instalación elemental de turbina de gas*

El sistema de turbina de gas, en su forma más simple, se compone de un compresor, un combustor y una turbina, tal como se representa en la Fig II.15. La instalación de turbina de gas dada su simplicidad, el bajo coste de inversión y el corto tiempo que precisa para alcanzar la plena carga partiendo de una situación de fuera de servicio, se utiliza en algunas plantas generadoras de energía eléctrica, para aumentar la potencia instalada.

La utilización da la turbina de gas junto con un ciclo Rankine o Hirn de vapor, constituye también un procedimiento válido para recuperar parte del calor perdido, cuando los gases de combustión se evacúan a la atmósfera a alta temperatura, tal como salen de la turbina de gas.

En una turbina de gas simple, el aire se comprime, luego se mezcla con el combustible que finalmente arde con aquél en el combustor. Los productos gaseosos de la combustión, a alta temperatura, entran en la turbina y en su expansión generan un trabajo. Una parte de la potencia de la turbina, más del 50%, se absorbe en el accionamiento del compresor y el resto queda disponible para generar energía. Los gases de escape de la turbina de gas se eliminan a la atmósfera exterior.

Para analizar el ciclo de una turbina de gas se establecen algunas hipótesis simplificadoras, que reducimos a las tres siguientes:

*- Aunque el proceso de combustión modifica la composición inicial del fluido de trabajo (aire), dicho fluido se considera como un gas ideal (aire caliente), con el fin de disponer de relaciones sencillas entre las propiedades del fluido en diversos puntos del sistema*

*- El proceso de combustión se asimila a un proceso de transferencia térmica, en el que el aporte de calor al fluido termodinámico se determina por los poderes caloríficos del combustible, por lo que el flujo másico a través del sistema permanece constante*

*- Cada uno de los procesos que intervienen en el ciclo se supone reversible internamente*

Si la expansión en la turbina de gas es completa con un gas de escape a la misma presión que el aire a la entrada del compresor, la combinación de los procesos citados se puede tomar como un ciclo. Todas las hipótesis simplificadoras y las consideraciones precedentes conducen a un ciclo ideal para la turbina de gas, que se identifica normalmente como ciclo Brayton de aire estándar.

En la Fig II.16 se representa el ciclo Brayton en los diagramas (T, s) y (p, v) que permiten determinar las magnitudes de los diversos puntos del ciclo. El ciclo idealizado supone un proceso isentrópico, tanto entre los puntos 1 y 2 del diagrama (proceso de compresión), como entre los 3 y 4 del mismo (trabajo de expansión). El aumento de temperatura entre los puntos 2 y 3 del diagrama se calcula suponiendo que la aplicación del calor de combustión se realiza a presión constante (isobáricamente).

En el análisis del ciclo la relación de presiones entre 1 y 2 se fija por el diseño del compresor y se supone conocida. Para determinar la temperatura en el punto 2, la relación entre los estados inicial y final de un proceso isentrópico, con gas ideal, se obtiene más abajo.

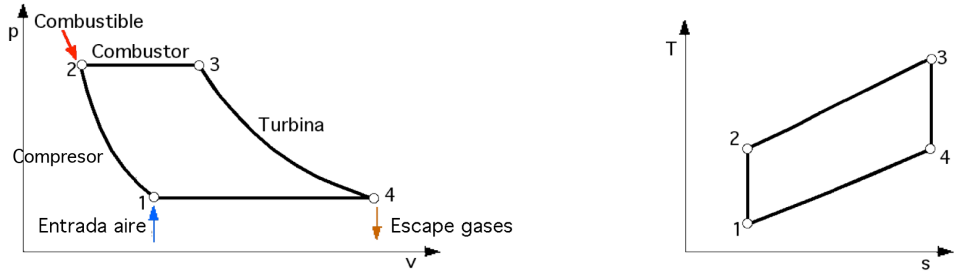



*Fig II.16.- Ciclo Brayton de aire estándar*

Las definiciones de los calores específicos, a presión y volumen constante, son: $\begin{cases} c_p = \left(\frac{\partial I}{\partial T}\right)_p \\ c_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v \end{cases}$

Los calores específicos varían con la temperatura; no obstante, en la práctica, para facilitar los cálculos termodinámicos se les puede suponer constantes.

Para un gas ideal, con las definiciones y relaciones precedentes, se deducen las variaciones de entalpía y de entropía en la forma $\begin{cases} di = c_p \ dT \\ du = c_v \ dT \end{cases}$ ; aunque estas expresiones tienen forma diferencial, se pueden utilizar para diferencias finitas de $i$ y de $u$ siempre que la $\Delta T$ no sea excesiva.

Si se requiere mayor precisión hay que recurrir a tablas de entalpía.

Si se establece la condición $ds = 0$, por tratarse de un proceso isentrópico:

$$T\,ds = u + p\,dv = c_v dT + p\,dv = 0$$

y mediante la ley de gases ideales en forma diferencial, se obtiene la ecuación de las politrópicas:

$$\frac{dp}{p} + \frac{\gamma\ dv}{v} = 0 \quad \Rightarrow \quad p\ v^{\gamma} = Cte$$

y de ésta y de la ley de los gases ideales se establece, para un proceso isentrópico, la relación entre presiones y temperaturas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma - 1)/\gamma}$$

El rendimiento térmico del ciclo Brayton es:

$$\eta = \frac{w_{turb} - w_{comp}}{q_1} = \left| \begin{array}{l} w_{turb} = c_p\,(T_3 - T_4) \\ w_{comp} = c_p\,(T_2 - T_1) \\ q_1 = c_v\,(T_3 - T_2) \end{array} \right| = \gamma\ (1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}) = \gamma\ (1 - \frac{i_4 - i_1}{i_3 - i_2})$$

Los ciclos reales de las turbinas de gas difieren del ideal, debido a las irreversibilidades relativas al compresor y turbina y a las caídas de presión que se presentan a lo largo del sistema. El efecto de las irreversibilidades del ciclo real sobre el rendimiento, se muestra en un diagrama entrópico, Fig II.17.

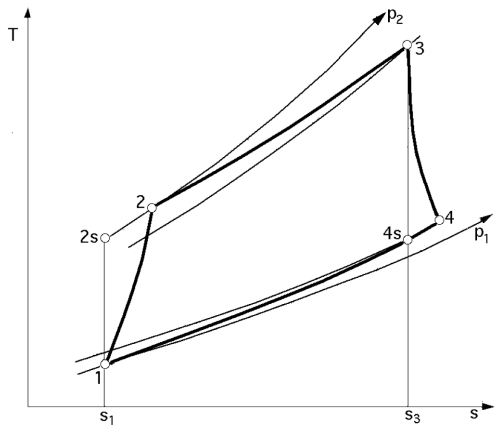



*Fig II.17.- Diagrama (T,s) de un ciclo de turbina de gas*

*- Una compresión isentrópica alcanzaría el punto 2s pero la compresión real llega a la presión $p_2$ con una entropía correspondiente al punto 2*

*- La expansión en la turbina alcanza el punto 4 en lugar del 4s*

*- Las isobaras correspondientes a las presiones $p_1$ y $p_2$ ponen de relieve la pérdida de carga en el combustor y en los conductos de conexión*

*- La desviación del proceso entre los puntos 4 y 1, teóricamente pertenecientes a una misma isobara, muestra el efecto de la caída de presión en el escape de la turbina y entrada del compresor*

En general, el rendimiento de una instalación simple de turbina de gas es bajo (25%÷ 30%), por la alta temperatura de los gases de escape y por la potencia absorbida por el compresor de la planta (más del 50% del generado en la turbina).

El rendimiento del ciclo simple real se mejora utilizando, por ejemplo, un cogenerador que caliente el aire antes de introducirle en el combustor, a partir del calor cedido por los gases de escape, o con compresiones y expansiones por etapas.

No obstante, para un sistema de combustión dado, el mayor rendimiento se logra con un sistema que tenga una menor relación de presiones, aunque esto disminuye el trabajo mecánico generado, por lo que para cada instalación en particular, habrá que sopesar la menor potencia neta disponible frente a la mejora de rendimiento térmico a obtener.

Una de las ventajas fundamentales del ciclo de la turbina de gas es que opera a mucha mayor temperatura que la que caracteriza al ciclo Rankine de vapor.

Normalmente las turbinas de gas operan con temperaturas de entrada entre $\begin{cases} 1800°F \div 2200°F \\ 982°C \div 1204°C \end{cases}$; en diseños recientes se ha llegado a operar a 2300ºF (1288ºC) con la correspondiente mejora del rendimiento.

Junto a la posibilidad de operar a elevadas temperaturas y de usar gases combustibles como fluido de trabajo, una de las aplicaciones más comunes del sistema de turbina de gas es la de funcionar conjuntamente con un ciclo Rankine de vapor, como se indica a continuación.

## II.11.- CICLOS COMBINADOS

El ciclo Brayton de turbina de gas utiliza gases de alta temperatura que proceden de un proceso de combustión; el escape los descarga a la atmósfera a temperaturas relativamente elevadas, por lo que, en el ciclo Brayton, existe un importante calor residual. El ciclo Rankine de turbina de vapor no puede utilizar las altas temperaturas que se emplean en las turbinas de gas.

Los ciclos combinados, Brayton y Rankine operando conjuntamente, se diseñan para aprovechar las ventajas de cada uno de ellos, con el fin de mejorar el rendimiento de la planta.

Los ciclos combinados avanzados, en los que el escape de la turbina de gas se utiliza como fuente calorífica para un ciclo de turbina de vapor, pueden alcanzar en aplicaciones de plantas para generación de energía eléctrica, rendimientos térmicos superiores al 50%.

***Calderas de recuperación.-*** Una planta simple de ciclo combinado consiste en una instalación de turbina de gas (ciclo Brayton) mejorada, por cuanto los gases de escape de dicha turbina pasan a través de un generador de vapor, que forma parte de un ciclo de vapor, Fig II.18.

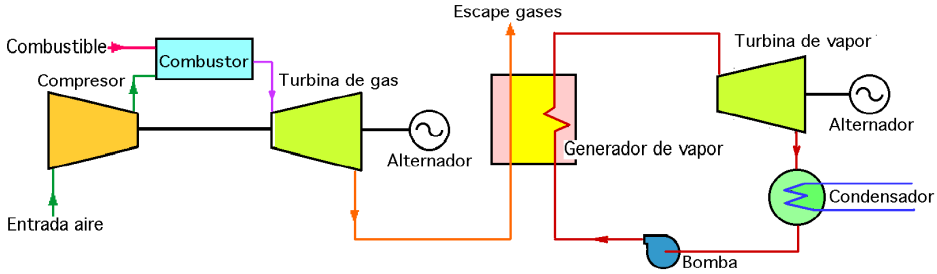



*Fig II.18.- Planta elemental de ciclo combinado*

El generador de vapor utiliza como fuente calorífica los gases de escape de la turbina de gas, para configurar un ciclo Rankine con su turbina de vapor. Se genera electricidad con los trabajos mecánicos de la turbina de gas y la turbina de vapor. En el ciclo combinado, el generador de vapor recupera el calor residual que tienen los gases de escape de la turbina de gas, que se comporta como una caldera de recuperación, (caldera de calor residual).

Otras aplicaciones de los ciclos combinados incorporan una combustión suplementaria en la caldera de recuperación, aprovechando el $aire_{exceso}$ caliente de los gases de combustión de la turbina de gas, elevando la temperatura del vapor y mejorando las características de funcionamiento del ciclo de vapor.

El rendimiento térmico se define como la relación entre trabajo producido en los dos ciclos y el calor total suministrado:

$$\eta = \frac{(T_{sal} - T_{ent})_{Tgas} + (T_{sal} - T_{ent})_{Tvapor}}{Q_{tot}}$$

Otra solución para combinar ciclos de gas y de vapor, es la representada en la Fig II.19, en la que el hogar de la unidad generadora de vapor sirve de cámara de combustión para producir los gases destinados al ciclo de la turbina de gas; la fuente principal de calor, para ambos ciclos, es el proceso de combustión que tiene lugar en el hogar del generador de vapor, correspondiente al ciclo Rankine; los gases de la combustión, tras el intercambio térmico en el generador de vapor, se expansionan en la turbina de gas, mientras que el vapor generado se expansiona en la turbina de vapor.

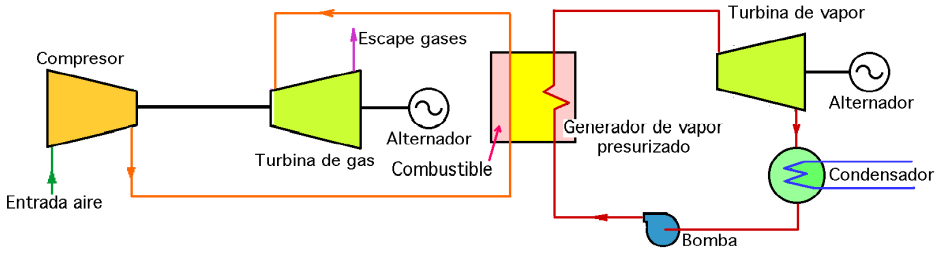



*Fig II.19.- Planta de ciclo combinado con combustión presurizada*

El calor almacenado en los gases de escape de la turbina de gas no es despreciable, y se recu-

pera utilizando un calentador regenerativo *gas-aire*, en el ciclo de la turbina de gas, o incluso mediante un calentador de agua en el ciclo de la turbina de vapor; un ejemplo de esta solución, lo constituye la combinación de un generador de vapor con combustión en lecho fluido presurizado con su correspondiente ciclo de vapor y turbina de gas.

***Cogeneración***.- La cogeneración es la producción simultánea de varias formas útiles de energía (térmica, mecánica, eléctrica, etc.), a partir de un combustible único. En la práctica se concreta en la producción de electricidad, a la vez que se realizan otras operaciones industriales, como calefacción, calentamiento de procesos, gasificación de un combustible, etc. Los sistemas de cogeneración se dividen en dos disposiciones básicas: $\begin{cases} \text{- } \textit{ciclos de cabeza (ciclos superiores)} \\ \text{- } \textit{ciclos de cola (ciclos inferiores)} \end{cases}$

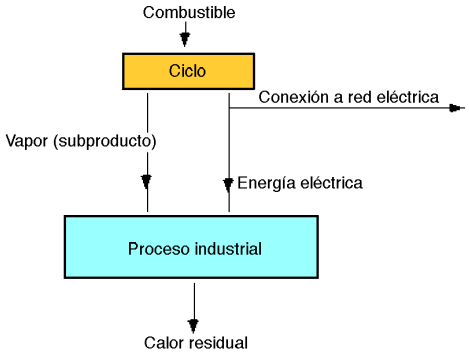



*Fig II.20.- Ciclo de cabeza (o superior)*

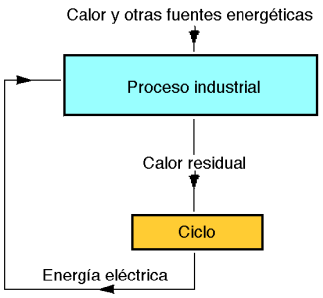



*Fig II.21.- Ciclo de cola (o inferior)*

En la Fig II.20 se representa un *ciclo de cabeza*; el combustible se usa para generar energía eléctrica con una caldera de vapor o con un combustor (cámara de combustión) clásico de un ciclo de turbina de gas; el calor residual del ciclo productor de energía se utiliza en un proceso industrial determinado.

Los ciclos $\begin{cases} \textit{superior} \\ \textit{inferior} \end{cases}$ se refieren siempre al ciclo energético de vapor.

La disposición más corriente en el ciclo de cabeza consta de una caldera o generador de vapor, a una presión mayor que la que se precisa en la aplicación de que se trate. El vapor de AP se expansiona en una turbina de vapor, turbina de gas o motor de combustión interna, hasta la presión requerida por la aplicación considerada.

El *ciclo de cola*, Fig II.21, está asociado a una caldera de recuperación de calor residual; el combustible no se suministra directamente al ciclo generador de energía eléctrica, sino que el vapor se genera con una fuente de calor residual y el vapor producido se expande luego en una turbina, para generar electricidad; el vapor se utiliza en el ciclo de cola configurando un ciclo Rankine, por la posibilidad de condensar a baja temperatura.

## II.12.- PROCESOS DE COMBUSTIÓN

Hasta aquí, los ciclos basados en una combustión se han comparado teniendo en cuenta los rendimientos térmicos alcanzados; sin embargo, para completar la evaluación de un ciclo hay que tener en cuenta el consumo de combustible.

La posibilidad de que las diversas máquinas y equipos puedan utilizar la totalidad de la energía de combustión, depende de $\begin{cases} \textit{- la temperatura alcanzada en la cámara de combustión} \\ \textit{- el grado de disociación de los productos formados por la combustión} \end{cases}$

Si la energía liberada en la combustión del C con el $O_2$ para formar $CO_2$, conforme a la reacción:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

se evacúa de la cámara de combustión y los reactivos y los productos de reacción se mantienen durante el proceso a $\begin{cases} 77°F \text{ y } 14{,}5 \text{ psi} \\ 25°C \text{ y } 0{,}1 \text{ MPa} \end{cases}$, el calor que se transfiere desde la cámara de combustión sería de 393.522 kJ por cada mol de $CO_2$ que se haya formado.

Por el Primer Principio de la Termodinámica, el calor transferido es igual a la diferencia de las entalpías de productos y de reactivos:

$$q - w = i_P - i_R$$

En el supuesto de que no se realice ningún trabajo en la cámara de combustión, si las entalpías se expresan en base molar {la entalpía de los elementos a $\begin{cases} 77°F \text{ y } 14{,}5 \text{ psi} \\ 25°C \text{ y } 0{,}1 \text{ MPa} \end{cases}$ es igual a cero} y siendo $n_P$ y $n_R$ los moles de cada especie que entran y salen del recinto de combustión, se tiene:

$$Q = \sum n_P \; i_P - \sum n_R \; i_R$$

siendo la entalpía del $CO_2$ en estas condiciones igual a (-393.522) kJ/mol; el signo menos se debe al convenio que establece como negativo el calor que sale del volumen de control; éste calor se transfiere como energía de formación y se designa mediante la notación $i_f^o$ .

Por otro lado, la entalpía del $CO_2$ (y de otros elementos), en condiciones distintas a las citadas, se calcula añadiendo la variación de entalpía, entre las condiciones deseadas y el estado estándar de formación. La reacción estequiométrica facilita las cantidades relativas de reactivos y productos, que entran y salen de la cámara de combustión.

La combustión de un combustible fósil, compuesto básicamente por hidrocarburos, está siempre acompañada de formación de vapor de agua; por ejemplo, para el metano, se tiene:

$$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$

siendo la variación de entalpía entre la de los reactivos y la de los productos de combustión igual a la transferencia de calor que se produce desde el proceso de combustión.

Si en los productos de la combustión:

*- El agua está presente en estado líquido, el calor transferido es el poder calorífico superior* $P_{cal.sup.}$

*- El agua se encuentra en estado de vapor, el calor transferido es el poder calorífico inferior* $P_{cal.inf.}$

La diferencia entre los poderes caloríficos superior e inferior, en la mayoría de los hidrocarburos, es pequeña, del orden de un 4%, pero no despreciable.

Cuando el rendimiento del ciclo se exprese como porcentaje, referido al poder calorífico del combustible, es importante detallar si se refiere al poder calorífico superior o al poder calorífico inferior.

*- En algunas aplicaciones se puede estimar un límite superior de la temperatura de combustión, lo que es factible cuando el proceso se realiza sin* $\begin{cases} \text{- variaciones de energa cinética o potencial} \\ \text{- transferencias de calor o de trabajo} \end{cases}$ *, indicando el Primer Principio de la Termodinámica que la suma de entalpías de reactivos es igual a la suma de entalpías de los productos*

*- También se puede determinar la temperatura de los productos de la combustión mediante iteraciones sucesivas; para ello se supone una temperatura de productos y se comprueba la igualdad de la suma de entalpías, correspondientes a productos y reactivos, respectivamente; del error que marque la desigualdad se pasa a corregir la hipótesis inicial*

Con cualquiera de estos métodos, para combustible y reactivos dados, si se conoce la temperatura de entrada en la cámara de combustión, se puede calcular la temperatura máxima que se alcanza en el proceso de combustión, que es la temperatura de combustión adiabática o de llama adiabática.

## II.13.- ENERGÍA LIBRE

Otra función de estado termodinámica importante es la energía libre *g* de Gibbs, de la forma:

$G = i - T\,s$

que es un potencial termodinámico, por lo que en cualquier proceso reversible o irreversible, su variación depende sólo de los estados inicial y final del sistema de que se trate.

La utilidad de la energía libre es evidente para un proceso reversible, con unas variaciones despreciables de energías cinética y potencial:

$$T_{rev} = \sum \{m_1 (i_1 - T_0 s_1)\} - \sum \{m_2 (i_2 - T_0 s_2)\}$$

Cuando se aplica a un proceso de combustión, en el que reactivos y productos están en equilibrio de temperaturas con el medio exterior, la introducción de la energía libre $g$ permite llegar a la expresión:

$$T_{rev} = \sum n_R \, g_R - \sum n_P \, g_P$$

que facilita el máximo valor del trabajo reversible que es posible obtener a partir de la combustión de un combustible dado.

Las cantidades $n_R$ y $n_P$ se deducen de la reacción química y la $g$ se expresa en base molar.

El trabajo reversible es máximo cuando los reactivos constituyen una mezcla estequiométrica.

La energía libre se puede utilizar para calcular la temperatura de combustión que se alcanza con un determinado combustible, incluyendo el efecto de disociación que se puede estudiar en la combustión del C con el $O_2$.

Cuando la temperatura del proceso de combustión es suficientemente alta, el $CO_2$ se disocia en $CO$ y $O_2$, según la reacción $CO_2 \rightarrow CO + \frac{1}{2} O_2$, en la que hay que hacer las siguientes consideraciones:

*- La ecuación de disociación tiene lugar de izquierda a derecha, por lo que la suma de energías libres de reactivos y de productos varía*

*- El equilibrio de esta reacción se alcanza cuando la suma de energías libres es mínima*

*- El punto de equilibrio (grado de disociación) depende de la temperatura de combustión*

El cálculo iterativo para determinar el punto de mínima energía libre se hace con:

*- Ordenador en las condiciones de equilibrio de la ecuación de disociación a una temperatura dada*

*- Tablas de valores de las constantes asociadas a las sustancias que participan en la reacción*

La constante asociada es la constante de equilibrio $K_{eq}$ que para el caso de gases ideales, es:

$$K_{eq} = \frac{(p_B)^b (p_C)^c}{(p_A)^a} \text{ , siendo } \begin{cases} A, B, C, \text{ las sustancias presentes} \\ p_A , p_B , p_C , \text{ las presiones parciales } \dfrac{\text{Presión total} \times \text{Fracción molar}}{\text{Mezcla}} \\ a, b, c, \text{ los moles presentes de las respectivas sustancias} \end{cases}$$

El balance estequiométrico es:

$$(a\,A) \leftrightarrow (b\,B) + (c\,C)$$

Para reacciones de gases reales hay que sustituir la presión parcial por la fugacidad (tendencia de los gases a expandirse). Para el ejemplo de la combustión del C con $O_2$ la reacción química global es:

$$C + O_2 \rightarrow (a\ CO_2) + (b\ CO) + (c\ O_2)$$

en la que a, b, c, son las fracciones molares de los productos (que se calculan resolviendo la reacción de disociación a la temperatura supuesta). La temperatura queda determinada cuando la suma de entalpías de los productos, menos la suma de entalpías de los reactivos, es igual al calor transferido al medio exterior que rodea la cámara de combustión.

## *CONSTANTES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR DE AGUA HÚMEDO*

| *Pres. sat.* | *Temp. sat.* | *Volumen ($dm^3/kg$)* | | *Entalpía (kJ/kg)* | | | *Entropía (kJ/kg°C)* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *bars* | *°C* | *v'* | *v"* | *i'* | *i"* | $r_{l\text{-}v} = i" - i'$ | *s'* | *s"* | $\Delta s = s" - s'$ |
| *0,01* | *0,0* | *1,0002* | *206288,00* | *0,0* | *2500,8* | *2500,8* | *0,000* | *9,155* | *9,155* |
| *0,01* | *1,0* | *1,0002* | *206146,00* | *0,0* | *2500,8* | *2500,8* | *0,000* | *9,155* | *9,155* |
| *0,01* | *2,0* | *1,0001* | *179907,00* | *8,4* | *2496,0* | *2487,6* | *0,031* | *9,102* | *9,071* |
| *0,01* | *4,0* | *1,0001* | *157258,00* | *16,8* | *2508,1* | *2491,3* | *0,061* | *9,050* | *8,989* |
| *0,01* | *6,0* | *1,0001* | *137768,00* | *25,2* | *2511,8* | *2486,6* | *0,091* | *8,999* | *8,908* |
| *0,01* | *7,0* | *1,0001* | *129205,00* | *29,3* | *2513,6* | *2484,3* | *0,106* | *8,974* | *8,868* |
| *0,01* | *8,0* | *1,0002* | *120956,00* | *33,6* | *2515,5* | *2481,9* | *0,121* | *8,949* | *8,828* |
| *0,01* | *10,0* | *1,0003* | *106422,00* | *42,0* | *2519,2* | *2477,2* | *0,151* | *8,900* | *8,749* |
| *0,01* | *12,0* | *1,0006* | *93829,00* | *50,4* | *2522,9* | *2472,5* | *0,181* | *8,851* | *8,671* |
| *0,02* | *14,0* | *1,0008* | *82894,00* | *58,8* | *2526,5* | *2467,8* | *0,210* | *8,804* | *8,594* |
| *0,02* | *16,0* | *1,0011* | *73380,00* | *67,1* | *2530,3* | *2463,1* | *0,239* | *8,757* | *8,518* |
| *0,02* | *18,0* | *1,0014* | *65084,00* | *75,5* | *2533,9* | *2458,4* | *0,268* | *8,711* | *8,444* |
| *0,02* | *20,0* | *1,0018* | *57836,00* | *53,4* | *2537,6* | *2453,7* | *0,296* | *8,666* | *8,370* |
| *0,03* | *21,0* | *1,0021* | *54260,00* | *88,4* | *2539,5* | *2451,1* | *0,312* | *8,642* | *8,330* |
| *0,03* | *22,0* | *1,0023* | *51491,00* | *92,2* | *2541,2* | *2449,0* | *0,325* | *8,622* | *8,297* |
| *0,03* | *24,0* | *1,0028* | *45925,00* | *100,6* | *2544,8* | *2444,2* | *0,353* | *8,579* | *8,226* |
| *0,03* | *26,0* | *1,0033* | *41034,00* | *109,0* | *2548,5* | *2439,5* | *0,381* | *8,536* | *8,155* |
| *0,04* | *28,0* | *1,0038* | *36727,00* | *117,3* | *2552,1* | *2434,8* | *0,409* | *8,494* | *8,085* |
| *0,04* | *30,0* | *1,0044* | *32929,00* | *125,7* | *2555,7* | *2430,0* | *0,437* | *8,452* | *8,016* |
| *0,05* | *32,0* | *1,0050* | *29573,00* | *134,0* | *2559,3* | *2425,3* | *0,464* | *8,412* | *7,948* |
| *0,05* | *33,0* | *1,0053* | *28196,00* | *137,8* | *2560,9* | *2423,1* | *0,476* | *8,394* | *7,918* |
| *0,05* | *34,0* | *1,0057* | *26601,00* | *142,4* | *2562,9* | *2420,5* | *0,491* | *8,372* | *7,881* |
| *0,06* | *36,0* | *1,0064* | *23967,00* | *150,7* | *2566,5* | *2415,8* | *0,518* | *8,333* | *7,814* |
| *0,07* | *38,0* | *1,0071* | *21628,00* | *159,1* | *2570,1* | *2411,0* | *0,545* | *8,294* | *7,749* |
| *0,07* | *40,0* | *1,0079* | *19546,00* | *167,5* | *2573,7* | *2406,2* | *0,572* | *8,256* | *7,684* |
| *0,08* | *40,3* | *1,0080* | *19239,00* | *168,8* | *2574,2* | *2405,5* | *0,576* | *8,250* | *7,674* |
| *0,08* | *42,0* | *1,0087* | *17691,00* | *175,8* | *2577,2* | *2401,4* | *0,599* | *8,219* | *7,620* |
| *0,09* | *44,0* | *1,0095* | *16035,00* | *184,2* | *2580,8* | *2396,6* | *0,625* | *8,182* | *7,557* |
| *0,10* | *45,8* | *1,0103* | *14673,00* | *191,8* | *2584,1* | *2392,2* | *0,649* | *8,149* | *7,499* |
| *0,10* | *46,0* | *1,0103* | *14556,00* | *192,5* | *2584,3* | *2391,8* | *0,651* | *8,146* | *7,494* |
| *0,11* | *48,0* | *1,0112* | *13232,00* | *200,9* | *2587,9* | *2387,0* | *0,678* | *8,110* | *7,433* |
| *0,12* | *50,0* | *1,0121* | *12045,00* | *209,3* | *2591,4* | *2382,2* | *0,704* | *8,075* | *7,372* |
| *0,14* | *52,0* | *1,0130* | *10979,00* | *217,6* | *2595,0* | *2377,3* | *0,729* | *8,041* | *7,312* |
| *0,15* | *54,0* | *1,0140* | *10021,00* | *226,0* | *2598,5* | *2372,5* | *0,755* | *8,007* | *7,252* |
| *0,17* | *56,0* | *1,0150* | *9157,80* | *234,4* | *2602,0* | *2367,7* | *0,780* | *7,974* | *7,193* |
| *0,18* | *58,0* | *1,0160* | *8379,90* | *242,7* | *2605,5* | *2362,8* | *0,806* | *7,941* | *7,135* |
| *0,20* | *60,0* | *1,0170* | *7677,60* | *251,1* | *2609,0* | *2357,9* | *0,831* | *7,909* | *7,078* |
| *0,20* | *60,1* | *1,0171* | *7648,40* | *251,5* | *2609,1* | *2357,7* | *0,832* | *7,907* | *7,075* |
| *0,22* | *62,0* | *1,0182* | *7042,80* | *259,5* | *2612,5* | *2353,0* | *0,856* | *7,877* | *7,021* |
| *0,24* | *64,0* | *1,0193* | *6468,20* | *267,8* | *2615,9* | *2348,1* | *0,881* | *7,845* | *6,965* |
| *0,25* | *65,0* | *1,0199* | *6203,20* | *272,0* | *2617,6* | *2345,7* | *0,893* | *7,830* | *6,937* |
| *0,26* | *66,0* | *1,0205* | *5947,30* | *276,2* | *2619,4* | *2343,2* | *0,906* | *7,815* | *6,909* |
| *0,29* | *68,0* | *1,0216* | *5474,70* | *284,6* | *2622,8* | *2338,2* | *0,930* | *7,784* | *6,854* |
| *0,30* | *69,1* | *1,0223* | *5228,10* | *289,3* | *2624,8* | *2335,4* | *0,944* | *7,767* | *6,823* |
| *0,31* | *70,0* | *1,0228* | *5045,30* | *293,0* | *2626,3* | *2333,3* | *0,955* | *7,754* | *6,800* |
| *0,34* | *72,0* | *1,0240* | *4654,70* | *301,4* | *2629,7* | *2328,3* | *0,979* | *7,725* | *6,746* |
| *0,35* | *72,7* | *1,0244* | *4524,60* | *304,3* | *2630,9* | *2326,5* | *0,988* | *7,715* | *6,727* |
| *0,37* | *74,0* | *1,0252* | *4299,10* | *309,7* | *2633,1* | *2323,3* | *1,003* | *7,696* | *6,693* |
| *0,40* | *75,9* | *1,0264* | *3992,40* | *317,7* | *2636,3* | *2318,6* | *1,026* | *7,669* | *6,643* |
| *0,40* | *76,0* | *1,0264* | *3974,80* | *318,1* | *2636,5* | *2318,3* | *1,027* | *7,667* | *6,640* |
| *0,44* | *78,0* | *1,0277* | *3678,80* | *326,5* | *2639,8* | *2313,3* | *1,051* | *7,639* | *6,588* |
| *0,47* | *80,0* | *1,0290* | *3408,30* | *334,9* | *2643,2* | *2308,3* | *1,075* | *7,611* | *6,536* |
| *0,50* | *81,4* | *1,0299* | *3239,40* | *340,6* | *2645,4* | *2304,9* | *1,091* | *7,593* | *6,502* |
| *0,51* | *82,0* | *1,0303* | *3160,90* | *343,3* | *2646,5* | *2303,2* | *1,099* | *7,584* | *6,485* |
| *0,56* | *84,0* | *1,0317* | *2934,30* | *351,7* | *2649,9* | *2298,1* | *1,123* | *7,557* | *6,435* |
| *0,60* | *86,0* | *1,0331* | *2731,20* | *359,9* | *2653,1* | *2293,2* | *1,145* | *7,531* | *6,386* |
| *0,60* | *86,0* | *1,0331* | *2726,60* | *360,1* | *2653,2* | *2293,0* | *1,146* | *7,531* | *6,385* |
| *0,65* | *88,0* | *1,0345* | *2536,00* | *368,5* | *2656,5* | *2287,9* | *1,169* | *7,504* | *6,335* |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *0,70* | *90,0* | *1,0359* | *2364,30* | *376,8* | *2659,7* | *2282,9* | *1,192* | *7,478* | *6,287* |
| *0,70* | *90,0* | *1,0359* | *2360,90* | *376,9* | *2659,7* | *2282,8* | *1,1925* | *7,478* | *6,285* |
| *0,76* | *92,0* | *1,0374* | *2199,90* | *385,4* | *2663,0* | *2277,6* | *1,216* | *7,453* | *6,237* |
| *0,80* | *93,5* | *1,0385* | *2086,80* | *391,7* | *2665,4* | *2273,7* | *1,233* | *7,434* | *6,201* |
| *0,81* | *94,0* | *1,0388* | *2051,80* | *393,8* | *2666,2* | *2272,4* | *1,239* | *7,428* | *6,189* |
| *0,88* | *96,0* | *1,0404* | *1915,20* | *402,2* | *2669,4* | *2267,2* | *1,262* | *7,403* | *6,142* |
| *0,90* | *96,7* | *1,0409* | *1869,10* | *405,2* | *2670,6* | *2265,4* | *1,270* | *7,394* | *6,125* |
| *0,94* | *98,0* | *1,0419* | *1789,30* | *410,6* | *2672,6* | *2262,0* | *1,284* | *7,379* | *6,095* |
| *1,00* | *99,6* | *1,0432* | *1693,70* | *417,5* | *2675,2* | *2257,7* | *1,303* | *7,359* | *6,056* |
| *1,01* | *100,0* | *1,0435* | *1673,00* | *419,1* | *2675,8* | *2256,7* | *1,308* | *7,355* | *6,048* |
| *1,20* | *104,8* | *1,0472* | *1428,20* | *439,4* | *2683,3* | *2244,0* | *1,361* | *7,298* | *5,937* |
| *1,21* | *105,0* | *1,0474* | *1419,40* | *440,2* | *2683,6* | *2243,5* | *1,363* | *7,296* | *5,933* |
| *1,40* | *109,3* | *1,0509* | *1236,50* | *458,4* | *2690,3* | *2231,9* | *1,411* | *7,246* | *5,835* |
| *1,43* | *110,0* | *1,0515* | *1210,10* | *461,3* | *2691,3* | *2230,0* | *1,419* | *7,239* | *5,820* |
| *1,60* | *113,3* | *1,0543* | *1091,30* | *475,4* | *2696,4* | *2221,0* | *1,455* | *7,202* | *5,747* |
| *1,69* | *115,0* | *1,0558* | *1036,50* | *482,5* | *2698,9* | *2216,4* | *1,473* | *7,183* | *5,710* |
| *1,80* | *116,9* | *1,0575* | *977,39* | *490,7* | *2701,8* | *2211,1* | *1,494* | *7,163* | *5,668* |
| *1,99* | *120,0* | *1,0603* | *891,71* | *503,7* | *2706,3* | *2202,5* | *1,528* | *7,130* | *5,602* |
| *2,00* | *120,2* | *1,0605* | *885,59* | *504,7* | *2706,6* | *2201,9* | *1,530* | *7,127* | *5,597* |
| *2,20* | *123,3* | *1,0633* | *809,99* | *517,6* | *2711,0* | *2193,4* | *1,563* | *7,096* | *5,533* |
| *2,32* | *125,0* | *1,0649* | *770,43* | *525,0* | *2713,5* | *2188,5* | *1,581* | *7,078* | *5,497* |
| *2,40* | *126,1* | *1,0659* | *746,60* | *529,6* | *2715,0* | *2185,4* | *1,593* | *7,067* | *5,474* |
| *2,60* | *128,7* | *1,0685* | *692,66* | *540,9* | *2718,7* | *2177,8* | *1,621* | *7,040* | *5,419* |
| *2,70* | *130,0* | *1,0697* | *668,32* | *546,3* | *2720,5* | *2174,2* | *1,634* | *7,027* | *5,393* |
| *2,80* | *131,2* | *1,0709* | *646,19* | *551,5* | *2722,2* | *2170,7* | *1,647* | *7,015* | *5,368* |
| *3,00* | *133,5* | *1,0732* | *605,72* | *561,4* | *2725,4* | *2163,9* | *1,672* | *6,992* | *5,321* |
| *3,13* | *135,0* | *1,0747* | *582,00* | *567,7* | *2727,3* | *2159,7* | *1,687* | *6,978* | *5,291* |
| *3,50* | *138,9* | *1,0786* | *524,14* | *584,3* | *2732,5* | *2148,2* | *1,727* | *6,941* | *5,214* |
| *3,61* | *140,0* | *1,0798* | *508,66* | *589,1* | *2733,9* | *2144,8* | *1,739* | *6,930* | *5,191* |
| *4,00* | *143,6* | *1,0836* | *462,35* | *604,7* | *2738,6* | *2133,9* | *1,776* | *6,897* | *5,120* |
| *4,15* | *145,0* | *1,0851* | *446,12* | *610,6* | *2740,4* | *2129,8* | *1,791* | *6,884* | *5,093* |
| *4,50* | *147,9* | *1,0883* | *413,86* | *623,2* | *2744,0* | *2120,8* | *1,820* | *6,857* | *5,037* |
| *4,76* | *150,0* | *1,0906* | *392,57* | *632,2* | *2746,5* | *2114,4* | *1,842* | *6,838* | *4,997* |
| *5,00* | *151,9* | *1,0926* | *374,77* | *640,1* | *2748,7* | *2108,6* | *1,860* | *6,822* | *4,962* |
| *5,43* | *155,0* | *1,0962* | *346,65* | *653,8* | *2752,5* | *2098,7* | *1,892* | *6,794* | *4,902* |
| *5,50* | *155,5* | *1,0967* | *342,57* | *655,8* | *2753,0* | *2097,2* | *1,897* | *6,790* | *4,893* |
| *6,00* | *158,8* | *1,1007* | *315,56* | *670,4* | *2756,8* | *2086,4* | *1,931* | *6,761* | *4,830* |
| *6,18* | *160,0* | *1,1021* | *306,85* | *675,5* | *2758,1* | *2082,7* | *1,942* | *6,751* | *4,808* |
| *6,50* | *162,0* | *1,1045* | *292,57* | *684,1* | *2760,3* | *2076,2* | *1,962* | *6,734* | *4,772* |
| *7,00* | *165,0* | *1,1080* | *272,76* | *697,1* | *2763,5* | *2066,4* | *1,992* | *6,709* | *4,717* |
| *7,01* | *165,0* | *1,1081* | *272,48* | *697,3* | *2763,5* | *2066,3* | *1,993* | *6,708* | *4,715* |
| *7,50* | *167,8* | *1,1115* | *255,50* | *709,3* | *2766,4* | *2057,1* | *2,020* | *6,685* | *4,665* |
| *7,92* | *170,0* | *1,1144* | *242,62* | *719,1* | *2768,7* | *2049,6* | *2,042* | *6,667* | *4,625* |
| *8,00* | *170,4* | *1,1149* | *240,32* | *720,9* | *2769,1* | *2048,2* | *2,046* | *6,663* | *4,617* |
| *8,50* | *172,9* | *1,1181* | *226,88* | *732,0* | *2771,5* | *2039,5* | *2,070* | *6,643* | *4,573* |
| *8,92* | *175,0* | *1,1208* | *216,60* | *741,1* | *2773,5* | *2032,4* | *2,091* | *6,626* | *4,535* |
| *9,00* | *175,4* | *1,1213* | *214,87* | *742,6* | *2773,8* | *2031,2* | *2,094* | *6,623* | *4,529* |
| *9,50* | *177,7* | *1,1243* | *204,09* | *752,8* | *2776,0* | *2023,2* | *2,117* | *6,604* | *4,487* |
| *10,03* | *180,0* | *1,1275* | *193,85* | *763,1* | *2778,0* | *2014,9* | *2,139* | *6,586* | *4,446* |
| *10,50* | *182,0* | *1,1302* | *185,51* | *772,0* | *2779,8* | *2007,8* | *2,159* | *6,570* | *4,411* |
| *11,00* | *184,1* | *1,1331* | *177,44* | *781,1* | *2781,5* | *2000,4* | *2,179* | *6,554* | *4,375* |
| *11,50* | *186,0* | *1,1359* | *170,05* | *789,9* | *2783,1* | *1993,2* | *2,198* | *6,538* | *4,340* |
| *12,00* | *188,0* | *1,1386* | *163,25* | *798,4* | *2784,6* | *1986,2* | *2,216* | *6,523* | *4,307* |
| *12,50* | *189,8* | *1,1412* | *156,98* | *806,7* | *2786,0* | *1979,3* | *2,234* | *6,508* | *4,274* |
| *13,00* | *191,6* | *1,1438* | *151,17* | *814,7* | *2787,3* | *1972,6* | *2,251* | *6,495* | *4,244* |
| *13,50* | *193,3* | *1,1464* | *145,79* | *822,2* | *2788,5* | *1966,0* | *2,268* | *6,482* | *4,214* |
| *14,00* | *195,0* | *1,1400* | *140,77* | *830,0* | *2789,7* | *1959,6* | *2,284* | *6,469* | *4,186* |
| *14,50* | *196,7* | *1,1514* | *136,08* | *837,4* | *2790,8* | *1953,4* | *2,299* | *6,457* | *4,158* |
| *15,00* | *198,3* | *1,1539* | *131,70* | *844,6* | *2791,8* | *1917,1* | *2,314* | *6,445* | *4,130* |
| *15,55* | *200,0* | *1,1565* | *127,29* | *852,4* | *2792,8* | *1940,4* | *2,331* | *6,431* | *4,101* |
| *16,00* | *201,4* | *1,1586* | *123,73* | *858,5* | *2793,6* | *1935,1* | *2,344* | *6,422* | *4,078* |
| *17,00* | *204,3* | *1,1633* | *116,66* | *871,8* | *2795,2* | *1923,4* | *2,371* | *6,400* | *4,028* |

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *17,25* | *205,0* | *1,1644* | *115,05* | *875,0* | *2795,6* | *1920,6* | *2,378* | *6,394* | *4,017* |
| *18,00* | *207,1* | *1,1678* | *110,36* | *884,5* | *2796,6* | *1912,1* | *2,398* | *6,379* | *3,981* |
| *19,00* | *209,8* | *1,1722* | *104,69* | *896,8* | *2797,8* | *1901,1* | *2,423* | *6,359* | *3,936* |
| *19,08* | *210,0* | *1,1726* | *104,27* | *897,7* | *2797,9* | *1900,2* | *2,425* | *6,358* | *3,933* |
| *20,00* | *212,4* | *1,1766* | *99,57* | *908,6* | *2798,9* | *1890,4* | *2,447* | *6,340* | *3,893* |
| *21,00* | *214,9* | *1,1809* | *94,93* | *919,9* | *2799,8* | *1879,9* | *2,470* | *6,322* | *3,852* |
| *21,06* | *215,0* | *1,1812* | *94,65* | *920,6* | *2799,8* | *1879,3* | *2,471* | *6,321* | *3,850* |
| *22,00* | *217,2* | *1,1851* | *90,69* | *930,9* | *2800,6* | *1869,7* | *2,492* | *6,305* | *3,813* |
| *23,00* | *219,6* | *1,1892* | *86,80* | *941,6* | *2801,3* | *1859,7* | *2,514* | *6,288* | *3,775* |
| *23,20* | *220,0* | *1,1900* | *86,06* | *943,7* | *2801,4* | *1857,8* | *2,518* | *6,285* | *3,767* |
| *24,00* | *221,8* | *1,1932* | *83,23* | *951,9* | *2801,9* | *1850,0* | *2,534* | *6,272* | *3,738* |
| *25,00* | *223,9* | *1,1972* | *19,94* | *961,9* | *2802,3* | *1840,4* | *2,554* | *6,257* | *3,702* |
| *25,50* | *225,0* | *1,1992* | *78,31* | *966,9* | *2802,5* | *1835,6* | *2,564* | *6,249* | *3,685* |
| *27,50* | *229,1* | *1,2069* | *72,71* | *985,9* | *2803,1* | *1817,2* | *2,602* | *6,220* | *3,618* |
| *27,98* | *230,0* | *1,2087* | *71,47* | *990,3* | *2803,2* | *1812,9* | *2,610* | *6,213* | *3,603* |
| *30,00* | *233,8* | *1,2163* | *66,65* | *1008,3* | *2803,4* | *1795,0* | *2,645* | *6,186* | *3,541* |
| *30,64* | *235,0* | *1,2187* | *65,27* | *1013,8* | *2803,4* | *1789,5* | *2,656* | *6,178* | *3,522* |
| *32,50* | *238,3* | *1,2256* | *61,49* | *1029,6* | *2803,2* | *1773,7* | *2,687* | *6,154* | *3,468* |
| *33,48* | *240,0* | *1,2291* | *59,67* | *1037,6* | *2803,1* | *1765,5* | *2,702* | *6,142* | *3,440* |
| *35,00* | *242,5* | *1,2345* | *57,05* | *1049,8* | *2802,7* | *1753,0* | *2,725* | *6,125* | *3,399* |
| *36,52* | *245,0* | *1,2399* | *54,62* | *1061,6* | *2802,2* | *1740,7* | *2,748* | *6,107* | *3,359* |
| *37,50* | *246,5* | *1,2433* | *53,17* | *1069,0* | *2801,9* | *1732,9* | *2,762* | *6,096* | *3,335* |
| *39,78* | *250,0* | *1,2512* | *50,06* | *1085,8* | *2800,9* | *1715,1* | *2,793* | *6,072* | *3,278* |
| *40,00* | *250,3* | *1,2520* | *49,77* | *1087,4* | *2800,8* | *1713,4* | *2,797* | *6,070* | *3,273* |
| *42,50* | *254,0* | *1,2606* | *46,75* | *1105,1* | *2799,4* | *1694,3* | *2,830* | *6,044* | *3,214* |
| *43,25* | *255,0* | *1,2631* | *45,91* | *1110,2* | *2799,0* | *1688,7* | *2,839* | *6,032* | *3,197* |
| *45,00* | *257,4* | *1,2690* | *44,05* | *1122,1* | *2797,8* | *1675,7* | *2,861* | *6,020* | *3,158* |
| *46,94* | *260,0* | *1,2755* | *42,15* | *1134,9* | *2796,4* | *1661,5* | *2,885* | *6,001* | *3,116* |
| *47,50* | *260,7* | *1,2774* | *41,63* | *1138,9* | *2796,0* | *1657,4* | *2,892* | *5,996* | *3,104* |
| *50,00* | *263,9* | *1,2857* | *39,44* | *1154,5* | *2794,0* | *1639,5* | *2,921* | *5,973* | *3,053* |
| *50,87* | *265,0* | *1,2886* | *38,72* | *1159,9* | *2793,3* | *1633,3* | *2,931* | *5,966* | *3,035* |
| *55,00* | *269,9* | *1,3021* | *35,60* | *1184,9* | *2789,5* | *1604,6* | *2,976* | *5,930* | *2,955* |
| *55,05* | *270,0* | *1,3023* | *35,63* | *1185,2* | *2789,4* | *1604,2* | *2,976* | *5,930* | *2,954* |
| *59,49* | *275,0* | *1,3168* | *32,74* | *1210,8* | *2784,9* | *1574,0* | *3,022* | *5,894* | *2,872* |
| *60,00* | *275,6* | *1,3185* | *32,44* | *1213,7* | *2784,3* | *1570,6* | *3,027* | *5,890* | *2,862* |
| *64,19* | *280,0* | *1,3321* | *30,13* | *1236,8* | *2779,6* | *1542,5* | *3,068* | *5,857* | *2,789* |
| *65,00* | *280,8* | *1,3347* | *29,72* | *1241,1* | *2778,6* | *1537,5* | *3,076* | *5,851* | *2,775* |
| *69,18* | *285,0* | *1,3483* | *27,74* | *1263,1* | *2773,4* | *1510,3* | *3,114* | *5,820* | *2,706* |
| *70,00* | *285,8* | *1,3510* | *27,37* | *1267,4* | *2772,3* | *1500,9* | *3,122* | *5,814* | *2,692* |
| *74,45* | *290,0* | *1,3655* | *25,54* | *1289,9* | *2766,3* | *1476,4* | *3,161* | *5,783* | *2,622* |
| *75,00* | *290,5* | *1,3673* | *25,32* | *1292,6* | *2765,6* | *1472,9* | *3,166* | *5,779* | *2,613* |
| *80,00* | *295,0* | *1,3838* | *23,52* | *1317,0* | *2758,3* | *1441,3* | *3,207* | *5,744* | *2,537* |
| *85,00* | *299,2* | *1,4005* | *21,92* | *1340,6* | *2750,7* | *1410,1* | *3,248* | *5,711* | *2,463* |
| *85,92* | *300,0* | *1,4036* | *21,64* | *1344,9* | *2749,2* | *1404,3* | *3,255* | *5,705* | *2,450* |
| *90,00* | *303,3* | *1,4174* | *20,48* | *1363,5* | *2742,5* | *1379,0* | *3,286* | *5,679* | *2,392* |
| *92,14* | *305,0* | *1,4247* | *19,92* | *1373,2* | *2738,9* | *1365,8* | *3,302* | *5,665* | *2,362* |
| *95,00* | *307,2* | *1,4346* | *19,19* | *1385,9* | *2733,9* | *1348,0* | *3,324* | *5,647* | *2,323* |
| *98,70* | *310,0* | *1,4475* | *18,32* | *1402,1* | *2727,2* | *1325,2* | *3,351* | *5,623* | *2,272* |
| *100,00* | *311,0* | *1,4521* | *18,02* | *1407,7* | *2724,8* | *1317,1* | *3,360* | *5,615* | *2,255* |
| *105,61* | *315,0* | *1,4722* | *16,83* | *1431,7* | *2714,1* | *1282,4* | *3,400* | *5,580* | *2,180* |
| *110,00* | *318,0* | *1,4883* | *15,98* | *1450,1* | *2705,5* | *1255,4* | *3,430* | *5,553* | *2,123* |
| *112,90* | *320,0* | *1,4992* | *15,45* | *1462,2* | *2699,6* | *1237,5* | *3,449* | *5,535* | *2,086* |
| *120,00* | *324,6* | *1,5266* | *14,26* | *1491,2* | *2684,7* | *1193,5* | *3,496* | *5,493* | *1,997* |
| *120,57* | *325,0* | *1,5289* | *14,17* | *1493,5* | *2683,5* | *1190,0* | *3,500* | *5,489* | *1,989* |

## *CONSTANTES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR DE AGUA RECALENTADO*

*v = volumen específico en ($dm^3/kg$) ; i = entalpía específica en ($kJ/kg$) ; s = entropía específica en ($kJ/kg°K$)*

| *T(°C)* | *0* | *50* | *100* | *150* | *200* | *250* | *300* | *350* | *400* | *450* | *500* | *550* | *600* | *650* | *700* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *p(bar)=0,01 ; Ts= 6,98°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1,0002* | *149097* | *172192* | *195277* | *218357* | *241436* | *264514* | *287591* | *310661* | *333737* | *356813* | *379889* | *402965* | *426041* | *449117* |
| *i)* | *0* | *2595* | *2689* | *2784* | *2880* | *2978* | *3077* | *3178* | *3280* | *3384* | *3489* | *3597* | *3706* | *3816* | *3929* |
| *s)* | *0* | *9,241* | *9,512* | *9,751* | *9,966* | *10,163* | *10,344* | *10,512* | *10,67* | *10,819* | *10,96* | *11,094* | *11,223* | *11,346* | *11,465* |
| *p(bar)=0,1 ; Ts= 45,83°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1,0002* | *14870* | *17198* | *19514* | *21826* | *24136* | *26446* | *28755* | *31063* | *33371* | *35679* | *37988* | *40296* | *42603* | *44911* |
| *i)* | *0* | *2592* | *2688* | *2783* | *2880* | *2977* | *3077* | *3177* | *3280* | *3384* | *3489* | *3597* | *3706* | *3816* | *3929* |
| *s)* | *0* | *8,173* | *8,447* | *8,688* | *8,903* | *9,1* | *9,281* | *9,449* | *9,607* | *9,756* | *9,897* | *10,032* | *10,16* | *10,284* | *10,402* |
| *p(bar)=0,5 ; Ts= 81,35°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1,0002* | *1,0121* | *3420* | *3890* | *4356* | *4821* | *5284* | *5747* | *6209* | *6672* | *7134* | *7596* | *8058* | *8519* | *8981* |
| *i)* | *0* | *209,3* | *2683* | *2780* | *2878* | *2976* | *3076* | *3177* | *3279* | *3383* | *3489* | *3596* | *3705* | *3816* | *3929* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *7,694* | *7,94* | *8,158* | *8,355* | *8,537* | *8,705* | *8,864* | *9,013* | *9,154* | *9,289* | *9,417* | *9,541* | *9,659* |
| *p(bar)=1 ; Ts= 99,63°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1,0001* | *1,0121* | *1696* | *1937* | *2173* | *2406* | *2639* | *2871* | *3103* | *3334* | *3565* | *3797* | *4028* | *4259* | *4490* |
| *i)* | *0,1* | *209,3* | *2676* | *2777* | *2876* | *2975* | *3075* | *3176* | *3278* | *3382* | *3488* | *3596* | *3705* | *3816* | *3928* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *7,36* | *7,614* | *7,834* | *8,033* | *8,215* | *8,384* | *8,543* | *8,692* | *8,834* | *8,968* | *9,097* | *9,22* | *9,339* |
| *p(bar)=1,5 ; Ts= 111,4°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1,0001* | *1,012* | *1,0434* | *1286* | *1445* | *1601* | *1757* | *1912* | *2067* | *2222* | *2376* | *2530* | *2685* | *2839* | *2993* |
| *i)* | *0,1* | *209,4* | *419,2* | *2773* | *2873* | *2973* | *3073* | *3175* | *3277* | *3382* | *3488* | *3595* | *3704* | *3815* | *3928* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,307* | *7,42* | *7,643* | *7,843* | *8,027* | *8,196* | *8,355* | *8,504* | *8,646* | *8,781* | *8,909* | *9,033* | *9,152* |
| *p(bar)=2,0 ; Ts= 120,23°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1,0001* | *1,012* | *1,0434* | *960,2* | *1081* | *1199* | *1316* | *1433* | *1549* | *1665* | *1781* | *1897* | *2013* | *2129* | *2244* |
| *i)* | *0,2* | *209,4* | *419,3* | *2770* | *2871* | *2971* | *3072* | *3174* | *3277* | *3381* | *3487* | *3595* | *3704* | *3815* | *3928* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,307* | *7,28* | *7,507* | *7,708* | *7,892* | *8,062* | *8,221* | *8,371* | *8,513* | *8,648* | *8,776* | *8,9* | *9,019* |
| *p(bar)=2,5 ; Ts= 127,40°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1,0001* | *1,012* | *1,0433* | *764,7* | *862,3* | *957,5* | *1052* | *1145* | *1239* | *1332* | *1424* | *1517* | *1610* | *1703* | *1795* |
| *i)* | *0,2* | *209,5* | *419,3* | *2766* | *2869* | *2970* | *3071* | *3173* | *3276* | *3380* | *3487* | *3594* | *3704* | *3815* | *3927* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,307* | *7,17* | *7,4* | *7,603* | *7,788* | *7,958* | *8,117* | *8,267* | *8,409* | *8,544* | *8,673* | *8,797* | *8,916* |
| *p(bar)=3,0 ; Ts= 133,54°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1* | *1,012* | *1,0433* | *634,2* | *716,6* | *796,5* | *875,4* | *953,4* | *1031* | *1109* | *1187* | *1264* | *1341* | *1419* | *1496* |
| *i)* | *0,3* | *209,5* | *419,4* | *2762* | *2867* | *2968* | *3070* | *3172* | *3275* | *3380* | *3486* | *3594* | *3703* | *3814* | *3927* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,307* | *7,078* | *7,312* | *7,517* | *7,702* | *7,873* | *8,032* | *8,182* | *8,324* | *8,46* | *8,589* | *8,712* | *8,831* |
| *p(bar)=4,0 ; Ts= 143,63°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *1* | *1,0119* | *1,0433* | *471* | *534,5* | *595,3* | *654,9* | *713,9* | *772,5* | *831,1* | *889,3* | *947,4* | *1005* | *1063* | *1121* |
| *i)* | *0,4* | *209,6* | *419,4* | *2753* | *2862* | *2965* | *3067* | *3170* | *3274* | *3378* | *3485* | *3593* | *3703* | *3814* | *3927* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,307* | *6,929* | *7,172* | *7,379* | *7,566* | *7,738* | *7,898* | *8,048* | *8,226* | *8,326* | *8,455* | *8,579* | *8,698* |
| *p(bar)=5,0 ; Ts= 151,85°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9999* | *1,0119* | *1,0432* | *1,0905* | *425,2* | *474,5* | *522,6* | *570,1* | *617,2* | *664,1* | *710,8* | *757,5* | *804* | *850,4* | *896,9* |
| *i)* | *0,5* | *209,7* | *419,4* | *632,2* | *2857* | *2962* | *3065* | *3168* | *3272* | *3377* | *3484* | *3592* | *3702* | *3813* | *3926* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,307* | *1,842* | *7,06* | *7,271* | *7,46* | *7,633* | *7,793* | *7,944* | *8,087* | *8,222* | *8,351* | *8,475* | *8,595* |
| *p(bar)=6,0 ; Ts= 158,84°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9999* | *1,0118* | *1,0432* | *1,0905* | *352,2* | *394* | *434,4* | *474,3* | *513,6* | *552,8* | *591,9* | *630,8* | *669,7* | *708,4* | *747,1* |
| *i)* | *0,6* | *209,8* | *419,4* | *632,2* | *2851* | *2958* | *3062* | *3166* | *3270* | *3376* | *3483* | *3591* | *3701* | *3812* | *3925* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,968* | *7,182* | *7,373* | *7,546* | *7,707* | *7,858* | *8,001* | *8,131* | *8,267* | *8,391* | *8,51* |
| *p(bar)=7,0 ; Ts= 164,96°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,999* | *1,0118* | *1,0431* | *1,0904* | *300,1* | *336,4* | *371,4* | *405,8* | *439,7* | *473,4* | *503,9* | *540,4* | *573,7* | *607* | *640,7* |
| *i)* | *0,7* | *209,9* | *419,5* | *632,3* | *2846* | *2955* | *3060* | *3164* | *3269* | *3374* | *3482* | *3590* | *3700* | *3812* | *3925* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,888* | *7,106* | *7,298* | *7,473* | *7,634* | *7,786* | *7,929* | *8,065* | *8,195* | *8,319* | *8,438* |
| *p(bar)=8,0 ; Ts= 170,41°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9998* | *1,0118* | *1,0431* | *1,0903* | *261* | *293,3* | *324,2* | *354,4* | *384,2* | *413,8* | *443,2* | *472,5* | *501,8* | *530,9* | *560* |
| *i)* | *0,8* | *209,9* | *419,6* | *632,3* | *2840* | *2951* | *3057* | *3162* | *3267* | *3373* | *3481* | *3589* | *3699* | *381l* | *3924* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,817* | *7,04* | *7,233* | *7,409* | *7,571* | *7,723* | *7,866* | *8,003* | *8,132* | *8,257* | *8,376* |
| *p(bar)=9,0 ; Ts= 175,36°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9997* | *1,0117* | *1,043* | *1,0903* | *230,5* | *259,7* | *287,4* | *314,4* | *341* | *367,4* | *393,7* | *419,8* | *445,8* | *471,7* | *497,6* |
| *i)* | *0,9* | *210* | *419,7* | *632,4* | *2835* | *2948* | *3055* | *3160* | *3266* | *3372* | *3480* | *3588* | *3699* | *3810* | *3924* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,753* | *6,98* | *7,176* | *7,352* | *7,515* | *7,667* | *7,811* | *7,948* | *8,077* | *8,202* | *8,321* |
| *p(bar)=10 ; Ts= 179,9°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9997* | *1,0117* | *1,043* | *1,0902* | *206,1* | *232,8* | *258* | *282,5* | *306,5* | *330,3* | *354* | *377,6* | *401* | *424,4* | *447,7* |
| *i)* | *1* | *210,1* | *419,7* | *632,5* | *2829* | *2944* | *3052* | *3158* | *3264* | *3370* | *3478* | *3587* | *3698* | *3810* | *3923* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,695* | *6,926* | *7,124* | *7,301* | *7,464* | *7,617* | *7,761* | *7,898* | *8,028* | *8,153* | *8,272* |
| *p(bar) = 11,0 ; Ts= 184,06 °C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9996* | *1,0116* | *1,0429* | *1,0901* | *186,1* | *210,8* | *233,9* | *256,3* | *278,2* | *300* | *321,6* | *343* | *364,4* | *385,7* | *406,9* |
| *i)* | *1,1* | *210,2* | *419,8* | *632,5* | *2823* | *2940* | *3050* | *3156* | *3262* | *3369* | *3477* | *3587* | *3697* | *3809* | *3922* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,64* | *6,877* | *7,076* | *7,255* | *7,419* | *7,572* | *7,716* | *7,853* | *7,983* | *8,108* | *8,228* |
| *p(bar) = 12,0 ; Ts= 187,96 °C* | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *v)* | *0,9996* | *1,0116* | *1,0429* | *1,0901* | *169,4* | *192,4* | *213,9* | *234,5* | *254,7* | *274,7* | *294,5* | *314,2* | *333,8* | *353,4* | *372,9* |
| *i)* | *1,2* | *210,3* | *419,9* | *632,6* | *2817* | *2937* | *3047* | *3154* | *3261* | *3368* | *3476* | *3586* | *3696* | *3808* | *3922* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,59* | *6,831* | *7,033* | *7,212* | *7,377* | *7,53* | *7,675* | *7,812* | *7,943* | *8,067* | *8,187* |
| *p(bar) = 13,0 ; Ts= 191,60 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9995* | *1,0115* | *1,0428* | *1,09* | *155,2* | *176,9* | *196,9* | *216,1* | *234,8* | *253,3* | *271,7* | *289,9* | *308,8* | *326,1* | *344,1* |
| *i)* | *1,3* | *210,4* | *420* | *632,7* | *2810* | *2933* | *3044* | *3152* | *3259* | *3366* | *3475* | *3585* | *3695* | *3808* | *3921* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,841* | *6,542* | *6,788* | *6,992* | *7,173* | *7,338* | *7,492* | *7,637* | *7,774* | *7,905* | *8,03* | *8,15* |
| *p(bar) = 14,0 ; Ts= 195,04 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9995* | *1,0115* | *1,0428* | *1,0899* | *143* | *163,6* | *182,3* | *200,3* | *217,7* | *235,1* | *252,1* | *269* | *285,9* | *302,7* | *319,4* |
| *i)* | *1,4* | *210,5* | *420* | *632,7* | *2803* | *2929* | *3042* | *3150* | *3257* | *3365* | *3474* | *3584* | *3695* | *3807* | *3921* |
| *s)* | *0* | *0,7031* | *1,3061* | *1,841* | *6,496* | *6,749* | *6,955* | *7,137* | *7,302* | *7,456* | *7,602* | *7,739* | *7,87* | *7,995* | *8,115* |
| *p(bar) = 15,0 ; Ts= 198,28 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9994* | *1,0114* | *1,0427* | *1,0899* | *132,4* | *152* | *169,7* | *186,5* | *202,9* | *219,1* | *235,1* | *250,9* | *266,7* | *282,4* | *298* |
| *i)* | *1,5* | *210,5* | *420,1* | *632,8* | *2796* | *2925* | *3039* | *3148* | *3256* | *3364* | *3473* | *3583* | *3694* | *3806* | *3920* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,84* | *6,452* | *6,711* | *6,919* | *7,102* | *7,268* | *7,423* | *7,569* | *7,707* | *7,838* | *7,963* | *8,03* |
| *p(bar) = 16,0 ; Ts= 201,37 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9994* | *1,0114* | *1,0426* | *1,0898* | *1,1565* | *141,9* | *158,6* | *174,6* | *190* | *205,2* | *220,2* | *235,1* | *249,9* | *264,6* | *279,3* |
| *i)* | *1,6* | *210,6* | *420,2* | *632,8* | *852,4* | *2921* | *3036* | *3146* | *3254* | *3362* | *3472* | *3582* | *3693* | *3805* | *3919* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,84* | *2,331* | *6,675* | *6,886* | *7,07* | *7,237* | *7,392* | *7,538* | *7,676* | *7,807* | *7,932* | *8,053* |
| *p(bar) = 17,0 ; Ts= 204,30 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9993* | *1,0114* | *1,0114* | *1,0898* | *1,0426* | *133* | *148,9* | *164* | *178,5* | *192,9* | *207,1* | *221,1* | *235,1* | *249* | *262,8* |
| *i)* | *1,7* | *210,7* | *420,3* | *632,9* | *852,4* | *2917* | *3033* | *3144* | *3252* | *3361* | *3471* | *3581* | *3692* | *3805* | *3919* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,84* | *2,33* | *6,641* | *6,854* | *7,04* | *7,207* | *7,362* | *7,509* | *7,647* | *7,778* | *7,904* | *8,024* |
| *p(bar) = 18,0 ; Ts= 207,10 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9993* | *1,0113* | *1,0425* | *1,087* | *1,1563* | *125* | *140,2* | *154,6* | *168,4* | *182* | *195,4* | *208,7* | *221,9* | *235* | *248,1* |
| *i)* | *1,8* | *210,8* | *420,3* | *633* | *852,5* | *2913* | *3031* | *3142* | *3251* | *3360* | *3470* | *3580* | *3691* | *3804* | *3918* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,306* | *1,84* | *2,33* | *6,61* | *6,824* | *7,011* | *7,179* | *7,335* | *7,482* | *7,62* | *7,751* | *7,862* | *7,98* |
| *p(bar) = 19,0 ; Ts= 209,79 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9992* | *1,0113* | *1,0425* | *1,0896* | *1,1562* | *117,9* | *132,5* | *146,1* | *159,3* | *172,2* | *185* | *197,6* | *210,1* | *222,6* | *235* |
| *i)* | *1,9* | *210,9* | *420,4* | *633* | *852,8* | *2909* | *3028* | *3140* | *3249* | *3358* | *3468* | *3579* | *3691* | *3803* | *3918* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,305* | *1,84* | *2,33* | *6,578* | *6,795* | *6,983* | *7,152* | *7,308* | *7,456* | *7,594* | *7,726* | *7,851* | *7,972* |
| *p(bar) = 20,0 ; Ts= 212,37 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9992* | *1,0112* | *1,0424* | *1,0896* | *1,1561* | *111,5* | *125,5* | *138,6* | *151,1* | *163,4* | *175,6* | *187,6* | *199,S* | *211,4* | *223,2* |
| *i)* | *2* | *211* | *420,5* | *633,1* | *852,6* | *2904* | *3025* | *3138* | *3248* | *3357* | *3467* | *3578* | *3690* | *3803* | *3917* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,305* | *1,84* | *2,33* | *6,547* | *6,768* | *6,957* | *7,126* | *7,283* | *7,431* | *7,57* | *7,701* | *7,827* | *7,948* |
| *p(bar) = 22,0 ; Ts= 217,24 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9991* | *1,0111* | *1,0423* | *1,0894* | *1,1559* | *100,4* | *113,4* | *125,5* | *137* | *148,3* | *159,4* | *170,3* | *181,2* | *192* | *202,8* |
| *i)* | *2,2* | *211,1* | *420,6* | *633,2* | *852,6* | *2896* | *3019* | *3134* | *3244* | *3354* | *3465* | *3576* | *3688* | *3801* | *3916* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *1,305* | *l,840* | *2,33* | *6,49* | *6,716* | *6,908* | *7,079* | *7,236* | *7,385* | *7,524* | *7,656* | *7,782* | *7,903* |
| *p(bar) = 24,0 ; Ts= 221,78 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,999* | *1,011* | *1,0422* | *1,0893* | *1,1557* | *91,13* | *103,3* | *114,5* | *125,2* | *135,6* | *145,8* | *155,9* | *165,9* | *175,9* | *185,7* |
| *i)* | *2,4* | *211,3* | *420,8* | *635,3* | *852,7* | *2887* | *3014* | *3130* | *3241* | *3352* | *3463* | *3574* | *3687* | *3800* | *3915* |
| *s)* | *0* | *0,703* | *l,305* | *1,84* | *2,329* | *6,437* | *6,669* | *6,863* | *7,035* | *7,194* | *7,342* | *7,482* | *7,615* | *7,741* | *7,862* |
| *p(bar) = 26,0 ; Ts= 226,00 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9988* | *l,0110* | *1,0421* | *l,0892* | *1,1555* | *83,26* | *94,82* | *105,3* | *115,2* | *124,9* | *134,4* | *143,8* | *153* | *162,2* | *171,3* |
| *i)* | *2,6* | *211,5* | *420,9* | *633,5* | *852,8* | *2877* | *3008* | *3125* | *3238* | *3349* | *3461* | *3573* | *3685* | *3799* | *3913* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *l,305* | *1,839* | *2,329* | *6,25* | *6,624* | *6,821* | *6,994* | *7,154* | *7,303* | *7,443* | *7,576* | *7,703* | *7,824* |
| *p(bar) = 28,0 ; Ts= 230,00 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9987* | *1,0109* | *1,042* | *1,0891* | *1,1553* | *76,49* | *87,5* | *97,38* | *106,7* | *115,7* | *124,6* | *133,3* | *142* | *150,5* | *159* |
| *i)* | *2,8* | *211,7* | *421,1* | *633,6* | *852,9* | *2868* | *3002* | *3121* | *3234* | *3346* | *3458* | *3571* | *3683* | *3797* | *3912* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,305* | *1,839* | *2,329* | *6,385* | *6,581* | *6,781* | *6,956* | *7,117* | *7,267* | *7,408* | *7,541* | *7,667* | *7,789* |
| *p(bar) = 30,0 ; Ts= 233,84 ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9986* | *1,0108* | *1,0419* | *1,0889* | *1,1551* | *70,61* | *81,15* | *90,51* | *99,28* | *107,8* | *116,1* | *124,3* | *132,4* | *140,4* | *148,3* |
| *i)* | *3* | *211,8* | *421,2* | *633,7* | *852,9* | *2858* | *2995* | *3117* | *3231* | *3343* | *3456* | *3569* | *3682* | *3796* | *3911* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,305* | *1,839* | *2,328* | *6,289* | *6,541* | *6,744* | *6,921* | *7,082* | *7,233* | *7,374* | *7,507* | *7,634* | *7,756* |
| *p(bar)= 32 ; Ts= 237,4ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9985* | *1,0107* | *1,0418* | *1,0888* | *1,1549* | *75,43* | *78,59* | *84,49* | *92,8* | *100,8* | *108,7* | *116,41* | *124* | *131,5* | *139* |
| *i)* | *3,2* | *212* | *421,4* | *633,8* | *853* | *2847* | *2989* | *3112* | *3227* | *3341* | *3454* | *3567* | *3680* | *3794* | *3910* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,305* | *1,839* | *2,328* | *5,243* | *6,503* | *6,709* | *6,887* | *7,05* | *7,201* | *7,343* | *7,476* | *7,603* | *7,725* |
| *p(bar)= 34 ; Ts= 240,9ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9984* | *1,0106* | *1,0417* | *1,0887* | *1,1547* | *60,84* | *70,67* | *79,18* | *87,08* | *94,69* | *102,1* | *109,4* | *116,6* | *123,7* | *130,7* |
| *i)* | *3,4* | *212,2* | *421,5* | *634* | *853,1* | *2836* | *2983* | *3108* | *3224* | *3328* | *3451* | *3565* | *3679* | *3793* | *3909* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,304* | *1,838* | *2,328* | *6,198* | *6,466* | *6,675* | *6,855* | *7,019* | *7,171* | *7,313* | *7,447* | *7,574* | *7,696* |
| *p(bar)= 36 ; Ts= 244,2ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9983* | *l,0105* | *1,0416* | *1,0885* | *1,1545* | *56,73* | *66,3* | *74,46* | *81,99* | *89,23* | *96,27* | *103,2* | *110,1* | *116,7* | *123,4* |
| *i)* | *3,6* | *212,3* | *421,7* | *634,1* | *853,2* | *2825* | *2976* | *3103* | *3221* | *3335* | *3449* | *3563* | *3677* | *3792* | *3907* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,304* | *1,838* | *2,327* | *6,154* | *6,431* | *6,644* | *6,825* | *6,99* | *7,142* | *7,285* | *7,419* | *7,547* | *7,669* |
| *p(bar)= 38 ; Ts= 247,3ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9982* | *1,0104* | *1,0415* | *1,0884* | *1,1543* | *53,03* | *62,37* | *70,23* | *77,44* | *81,35* | *91,05* | *97,61* | *104,1* | *110,5* | *116,8* |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *i)* | *3,8* | *212,5* | *421,8* | *634,2* | *853,3* | *2813* | *2970* | *3099* | *3217* | *3332* | *3447* | *3561* | *3675* | *3790* | *3906* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,304* | *1,838* | *2,327* | *6,11* | *6,397* | *6,613* | *6,796* | *6,962* | *7,115* | *7,258* | *7,393* | *7,521* | *7,643* |
| *p(bar)= 40 ; Ts= 250,33°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9981* | *1,0103* | *1,0414* | *1,0883* | *1,1541* | *1,2511* | *58,84* | *66,42* | *73,34* | *79,95* | *86,35* | *92,61* | *98,77* | *104,9* | *110,9* |
| *i)* | *4* | *212,7* | *422* | *634,3* | *853,4* | *1085,8* | *2963* | *3094* | *3214* | *3330* | *3445* | *3559* | *3674* | *3789* | *3905* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,304* | *1,838* | *2,327* | *2,793* | *6,364* | *6,584* | *6,769* | *6,935* | *7,089* | *7,233* | *7,368* | *7,496* | *7,618* |
| *p(bar)= 44 ; Ts= 256,0°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9979* | *1,0102* | *1,0412* | *1,0881* | *1,1537* | *1,2503* | *52,71* | *59,84* | *66,26* | *72,35* | *78,24* | *83,98* | *89,61* | *95,18* | *100,7* |
| *i)* | *4,4* | *213* | *422,3* | *634,6* | *853,6* | *1085,8* | *2949* | *3085* | *3207* | *3324* | *3440* | *3555* | *3671* | *3786* | *3902* |
| *s)* | *0* | *0,702* | *1,304* | *1,837* | *2,326* | *2,792* | *6,301* | *6,528* | *6,717* | *6,886* | *7,04* | *7,185* | *7,321* | *7,449* | *7,572* |
| *p(bar)= 48 ; Ts= 261,4°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9977* | *1,01* | *1,041* | *1,0878* | *1,1533* | *1,2496* | *47,58* | *54,34* | *60,36* | *66,02* | *71,47* | *76,78* | *81,98* | *87,11* | *92,18* |
| *i)* | *4,8* | *213,4* | *422,6* | *634,8* | *853,7* | *1085,7* | *2935* | *3075* | *3199* | *3319* | *3435* | *3552* | *3667* | *3783* | *3900* |
| *s)* | *0* | *0,701* | *1,303* | *1,837* | *2,326* | *2,791* | *6,241* | *6,476* | *6,669* | *6,84* | *6,996* | *7,141* | *7,278* | *7,407* | *7,53* |
| *p(bar)= 52 ; Ts= 266,4°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9975* | *1,0098* | *1,0408* | *1,0876* | *1,1529* | *1,2489* | *43,22* | *49,68* | *55,35* | *60,66* | *65,75* | *70,69* | *75,52* | *80,28* | *84,98* |
| *i)* | *5,2* | *213,7* | *422,9* | *635,1* | *853,9* | *1085,7* | *2919* | *3065* | *3192* | *3313* | *3431* | *3548* | *3664* | *3780* | *3898* |
| *s)* | *0* | *0,701* | *1,303* | *1,836* | *2,325* | *2,79* | *6,183* | *6,427* | *6,624* | *6,797* | *6,954* | *7,101* | *7,238* | *7,368* | *7,491* |
| *p(bar)= 56 ; Ts= 271,1°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9973* | *1,0096* | *1,0406* | *1,0873* | *1,1525* | *1,2481* | *39,45* | *45,68* | *51,06* | *56,07* | *60,84* | *65,47* | *69,98* | *74,43* | *78,81* |
| *i)* | *5,6* | *214,1* | *423,2* | *635,3* | *854,1* | *1085,7* | *2904* | *3055* | *3185* | *3307* | *3426* | *3544* | *3661* | *3778* | *3895* |
| *s)* | *0* | *0,701* | *1,303* | *1,836* | *2,324* | *2,789* | *6,126* | *6,38* | *6,581* | *6,757* | *6,916* | *7,063* | *7,201* | *7,331* | *7,455* |
| *p(bar)= 60 ; Ts= 275,56°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9971* | *1,0095* | *1,0404* | *1,0871* | *1,1522* | *1,2474* | *36,16* | *42,2* | *47,34* | *52,08* | *56,59* | *60,94* | *65,19* | *69,35* | *73,47* |
| *i)* | *6* | *214,4* | *423,5* | *635,6* | *854,2* | *1085,7* | *2887* | *3045* | *3177* | *3301* | *3421* | *3540* | *3657* | *3775* | *3893* |
| *s)* | *0* | *0,701* | *1,302* | *1,836* | *2,124* | *2,788* | *6,071* | *6,336* | *6,541* | *6,719* | *6,879* | *7,028* | *7,166* | *7,297* | *7,421* |
| *p(bar)= 64 ; Ts= 279,8°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9969* | *1,0093* | *1,0402* | *1,0869* | *1,1518* | *1,2467* | *33,25* | *39,16* | *44,08* | *48,6* | *52,87* | *56,98* | *60,99* | *64,92* | *68,79* |
| *i)* | *6,5* | *214,8* | *423,8* | *635,8* | *854,4* | *1085,7* | *2869* | *3034* | *3170* | *3296* | *3417* | *3536* | *3654* | *3772* | *3890* |
| *s)* | *0* | *0,701* | *1,302* | *1,835* | *2,323* | *2,788* | *6,016* | *6,293* | *6,502* | *6,683* | *6,845* | *6,995* | *7,134* | *7,265* | *7,39* |
| *p(bar)= 68 ; Ts= 283,8°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9967* | *1,0091* | *1,04* | *1,0866* | *1,1514* | *1,246* | *30,65* | *36,46* | *41,21* | *45,52* | *49,58* | *53,49* | *57,28* | *61* | *64,66* |
| *i)* | *6,9* | *215,1* | *424,1* | *636,1* | *854,6* | *1085,7* | *2851* | *3024* | *3162* | *3290* | *3412* | *3532* | *3651* | *3769* | *3888* |
| *s)* | *0* | *0,7* | *1,302* | *1,835* | *2,323* | *2,787* | *5,961* | *6,251* | *6,466* | *6,649* | *6,812* | *6,963* | *7,103* | *7,235* | *7,36* |
| *p(bar)= 72 ; Ts= 287,7°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9965* | *1,0089* | *1,0398* | *1,0864* | *1,151* | *1,2453* | *28,31* | *34,05* | *38,64* | *42,78* | *46,66* | *50,38* | *53,99* | *57,22* | *60,99* |
| *i)* | *7,3* | *215,4* | *424,4* | *636,3* | *854,7* | *1085,7* | *2831* | *3013* | *3154* | *3284* | *3407* | *3528* | *3648* | *3766* | *3885* |
| *s)* | *0* | *0,7* | *1,301* | *1,834* | *2,322* | *2,786* | *5,906* | *6,211* | *6,431* | *6,616* | *6,781* | *6,933* | *7,074* | *7,206* | *7,331* |
| *p(bar)= 76 ; Ts= 291,4°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9963* | *1,0088* | *1,0396* | *1,0861* | *1,1506* | *1,2446* | *26,18* | *31,89* | *36,35* | *40,33* | *44,05* | *47,6* | *51,04* | *54,41* | *57,71* |
| *i)* | *7,7* | *215,8* | *424,7* | *636,6* | *854,9* | *1085,7* | *2810* | *3001* | *3147* | *3278* | *3402* | *3524* | *3644* | *3764* | *3883* |
| *s)* | *0* | *0,7* | *1,301* | *1,834* | *2,321* | *2,785* | *5,85* | *6,171* | *6,397* | *6,585* | *6,751* | *6,904* | *7,046* | *7,179* | *7,305* |
| *p(bar)= 80 ; Ts= 295,0°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9961* | *1,0056* | *1,0394* | *1,0859* | *1,1502* | *1,2439* | *24,23* | *29,94* | *34,29* | *38,12* | *41,7* | *45,1* | *48,39* | *51,6* | *54,76* |
| *i)* | *8,1* | *216,1* | *425* | *636,8* | *855,1* | *1085,7* | *2787* | *2990* | *3139* | *3272* | *3398* | *3520* | *3641* | *3761* | *3881* |
| *s)* | *0* | *0,7* | *1,301* | *1,833* | *2,321* | *2,784* | *5,793* | *6,133* | *6,364* | *6,555* | *6,723* | *6,877* | *7,019* | *7,153* | *7,279* |
| *p(bar)= 84 ; Ts= 298,4°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9959* | *1,0084* | *1,0392* | *1,0856* | *1,1498* | *1,2432* | *22,43* | *28,16* | *32,41* | *36,12* | *39,57* | *42,84* | *45,99* | *49,07* | *52,08* |
| *i)* | *8,5* | *216,5* | *425,3* | *637,1* | *855,3* | *1085,7* | *2763* | *2977* | *3131* | *3266* | *3393* | *3516* | *3638* | *3758* | *3878* |
| *s)* | *0* | *0,7* | *1,301* | *1,833* | *2,32* | *2,783* | *5,734* | *6,095* | *6,332* | *6,526* | *6,696* | *6,851* | *6,994* | *7,128* | *7,254* |
| *p(bar)= 88 ; Ts= 301,7°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9958* | *1,0082* | *1,039* | *1,0854* | *1,1495* | *1,2426* | *1,403* | *26,54* | *30,7* | *34,31* | *37,63* | *40,78* | *43,81* | *46,76* | *49,66* |
| *i)* | *8,9* | *216,8* | *425,6* | *637,3* | *855,4* | *1085,7* | *1345* | *2965* | *3122* | *3260* | *3388* | *3513* | *3634* | *3755* | *3876* |
| *s)* | *0* | *0,7* | *1,3* | *1,832* | *2,32* | *2,782* | *3,254* | *6,058* | *6,301* | *6,498* | *6,669* | *6,826* | *6,969* | *7,104* | *7,231* |
| *p(bar)= 92; Ts= 304,9°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9956* | *1,0081* | *1,0388* | *1,0851* | *1,1492* | *1,2419* | *1,401* | *25,05* | *29,14* | *32,65* | *35,86* | *38,9* | *41,82* | *44,66* | *47,44* |
| *i)* | *9,3* | *217,2* | *425,9* | *637,6* | *855,6* | *1085,7* | *1344* | *2952* | *3114* | *3253* | *3383* | *3509* | *3631* | *3752* | *3873* |
| *s)* | *0* | *0,699* | *1,3* | *1,832* | *2,319* | *2,781* | *3,252* | *6,021* | *6,271* | *6,471* | *6,644* | *6,802* | *6,946* | *7,081* | *7,209* |
| *p(bar)= 96; Ts= 308,0°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9954* | *1,0079* | *1,0385* | *1,0849* | *1,1487* | *1,2412* | *1,399* | *23,68* | *27,71* | *31,12* | *34,24* | *37,18* | *39,99* | *42,73* | *45,4* |
| *i)* | *9,7* | *217,5* | *426,2* | *637,8* | *855,8* | *1085,8* | *1344* | *2939* | *3106* | *3247* | *3378* | *3504* | *3628* | *3749* | *3871* |
| *s)* | *0* | *0,699* | *1,3* | *1,832* | *2,318* | *2,78* | *3,25* | *5,984* | *6,243* | *6,445* | *6,62* | *6,778* | *6,923* | *7,059* | *7,187* |
| *p(bar)= 100; Ts= 310,96°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9952* | *1,0077* | *1,0383* | *1,0846* | *1,1483* | *1,2405* | *1,397* | *22,41* | *26,39* | *29,72* | *32,75* | *35,59* | *38,31* | *40,95* | *43,23* |
| *i)* | *10,1* | *217,8* | *426,5* | *638,1* | *856* | *1085,8* | *1343* | *2926* | *3097* | *3241* | *3373* | *3500* | *3624* | *3746* | *3868* |
| *s)* | *0* | *0,699* | *1,299* | *1,831* | *2,318* | *2,779* | *3,248* | *5,947* | *6,213* | *6,419* | *6,596* | *6,756* | *6,902* | *7,038* | *7,166* |
| *p(bar)= 110; Ts= 318,04°C* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9947* | *1,0073* | *1,0378* | *1,084* | *1,1474* | *1,2389* | *1,393* | *19,6* | *23,5* | *26,66* | *29,49* | *32,13* | *34,65* | *37,08* | *39,45* |
| *i)* | *11,1* | *218,7* | *427,3* | *638,7* | *856,4* | *1085,8* | *1342* | *2889* | *3075* | *3225* | *3360* | *3490* | *3616* | *3739* | *3862* |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *s)* | *0* | *0,699* | *1,299* | *1,83* | *2,316* | *2,217* | *2,244* | *5,856* | *6,143* | *6,358* | *6,539* | *6,702* | *6,85* | *6,988* | *7,117* |
| *p(bar)= 120; Ts= 324,65ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9942* | *1,0069* | *1,0373* | *1,0833* | *1,1464* | *1,2372* | *1,389* | *17,19* | *21,07* | *24,1* | *26,77* | *29,25* | *31,59* | *33,85* | *36,05* |
| *i)* | *12,1* | *219,6* | *428* | *639,3* | *856,8* | *1085,9* | *1341* | *2849* | *3052* | *3209* | *3348* | *3480* | *3607* | *3732* | *3856* |
| *s)* | *0* | *0,698* | *1,298* | *1,829* | *2,315* | *2,775* | *3,24* | *5,762* | *6,076* | *6,301* | *6,487* | *6,653* | *6,802* | *6,941* | *7,072* |
| *p(bar)= 130; Ts= 330,81ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9937* | *1,0064* | *1,0368* | *1,0827* | *1,1455* | *1,2356* | *1,385* | *15,09* | *19,01* | *21,93* | *24,47* | *26,81* | *29,01* | *31,12* | *33,18* |
| *i)* | *13,1* | *220,4* | *428,8* | *639,9* | *857,3* | *1085,9* | *1340* | *2804* | *3028* | *3192* | *3335* | *3470* | *3599* | *3725* | *3850* |
| *s)* | *0,001* | *0,698* | *1,297* | *1,828* | *2,313* | *2,318* | *2,326* | *5,664* | *6,011* | *6,246* | *6,437* | *6,606* | *6,758* | *6,898* | *7,03* |
| *p(bar)= 140; Ts= 336,63ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9932* | *1,006* | *1,0363* | *1,082* | *1,1446* | *1,2341* | *1,381* | *13,21* | *17,22* | *20,06* | *22,5* | *24,71* | *26,79* | *28,78* | *30,71* |
| *i)* | *14,1* | *221,3* | *429,6* | *640,6* | *857,7* | *1086* | *1339* | *2753* | *3003* | *3175* | *3322* | *3459* | *3590* | *3717* | *3843* |
| *s)* | *0,001* | *0,697* | *1,296* | *1,827* | *2,312* | *2,77* | *3,231* | *5,559* | *5,946* | *6,193* | *6,39* | *6,562* | *6,716* | *6,858* | *6,991* |
| *p(bar)= 150; Ts= 342,12ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9928* | *1,0056* | *1,0358* | *1,0814* | *1,1436* | *1,2325* | *1,377* | *11,46* | *15,66* | *18,44* | *20,78* | *22,9* | *24,87* | *26,76* | *28,57* |
| *i)* | *15,1* | *222,1* | *430,3* | *641,2* | *858,2* | *1086,1* | *1338* | *2693* | *2977* | *3157* | *3309* | *3449* | *3581* | *3710* | *3837* |
| *s)* | *0,001* | *0,697* | *1,296* | *1,826* | *2,31* | *2,768* | *3,228* | *5,443* | *5,883* | *6,142* | *6,345* | *6,52* | *6,677* | *6,82* | *6,954* |
| *p(bar)= 160; Ts= 347,32ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9923* | *1,0051* | *1,0353* | *1,0807* | *1,1427* | *1,2309* | *1,373* | *9,764* | *14,27* | *17,02* | *19,28* | *21,31* | *23,19* | *24,98* | *26,7* |
| *i)* | *16,1* | *223* | *431,1* | *641,8* | *858,6* | *1086,2* | *1338* | *2617* | *2949* | *3139* | *3295* | *3438* | *3573* | *3703* | *3831* |
| *s)* | *0,001* | *0,696* | *1,295* | *1,825* | *2,509* | *2,766* | *3,224* | *5,304* | *5,82* | *6,093* | *6,301* | *6,481* | *6,639* | *6,784* | *6,919* |
| *p(bar)= 170; Ts= 352,26ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9918* | *1,0047* | *1,0349* | *1,0801* | *1,1418* | *1,2294* | *1,37* | *1,729* | *13,03* | *15,76* | *17,96* | *19,91* | *21,71* | *23,42* | *25,06* |
| *i)* | *17,1* | *223,8* | *431,8* | *642,5* | *859,1* | *1086,3* | *1337* | *1667* | *2920* | *3121* | *3281* | *3427* | *3564* | *3695* | *3825* |
| *s)* | *0,001* | *0,696* | *1,294* | *1,824* | *2,307* | *2,764* | *3,22* | *3,771* | *5,765* | *6,044* | *6,26* | *6,442* | *6,603* | *6,75* | *6,886* |
| *p(bar)= 180; Ts= 356,96ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9914* | *1,0043* | *1,0344* | *1,0795* | *1,1409* | *1,2279* | *1,366* | *1,704* | *11,91* | *14,63* | *16,78* | *18,66* | *20,39* | *22,03* | *23,59* |
| *i)* | *18,1* | *224,7* | *432,6* | *643,1* | *859,6* | *1086,4* | *1336* | *1659* | *2888* | *3102* | *3268* | *3417* | *3555* | *3688* | *3818* |
| *s)* | *0,001* | *0,695* | *1,293* | *1,823* | *2,306* | *2,761* | *3,216* | *3,755* | *5,691* | *5,997* | *6,219* | *6,406* | *6,569* | *6,717* | *6,855* |
| *p(bar)= 190; Ts= 361,44ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9909* | *1,0039* | *1,0539* | *1,0788* | *1,14* | *1,2264* | *1,363* | *1,683* | *10,89* | *13,62* | *15,72* | *17,54* | *19,21* | *20,78* | *22,28* |
| *i)* | *19,1* | *225,6* | *433,3* | *643,7* | *860* | *1086,6* | *1335* | *1653* | *2855* | *3082* | *3254* | *3406* | *3546* | *3680* | *3812* |
| *s)* | *0,001* | *0,695* | *1,293* | *1,822* | *2,305* | *2,759* | *3,213* | *3,742* | *5,625* | *5,95* | *6,18* | *6,371* | *6,536* | *6,686* | *6,825* |
| *p(bar)= 200; Ts= 365,7ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9904* | *1,0034* | *1,0334* | *1,0782* | *1,1391* | *1,2249* | *1,36* | *1,665* | *9,95* | *12,7* | *14,77* | *16,54* | *18,15* | *19,66* | *21,1* |
| *i)* | *20,1* | *2264* | *434,1* | *644,4* | *860,5* | *1086,7* | *1335* | *1647* | *2819* | *3062* | *3239* | *3395* | *3537* | *3673* | *3806* |
| *s)* | *0,001* | *0,694* | *1,292* | *1,821* | *2,303* | *2,757* | *3,209* | *3,73* | *5,556* | *5,904* | *6,142* | *6,337* | *6,505* | *6,656* | *6,788* |
| *p(bar)= 210; Ts= 369,8ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9899* | *1,003* | *1,0329* | *1,0776* | *1,1382* | *1,2235* | *1,356* | *1,649* | *9,076* | *11,87* | *13,9* | *15,63* | *17,19* | *18,65* | *20,03* |
| *i)* | *21,1* | *227,3* | *434,9* | *645* | *860,9* | *1086,9* | *1334* | *1642* | *2781* | *3041* | *3225* | *3383* | *3528* | *3665* | *3799* |
| *s)* | *0,001* | *0,694* | *1,291* | *1,819* | *2,302* | *2,755* | *3,206* | *3,719* | *5,484* | *5,858* | *6,105* | *6,303* | *6,474* | *6,627* | *6,768* |
| *p(bar)= 220; Ts= 373,7ºC* | | | | | | | | | | | | | | | |
| *v)* | *0,9895* | *1,0026* | *1,325* | *1,077* | *1,1374* | *1,2221* | *1,353* | *1,635* | *8,254* | *11,11* | *13,12* | *14,8* | *16,32* | *17,73* | *19,06* |
| *i)* | *22,1* | *228,1* | *435,6* | *645,6* | *861,4* | *1087* | *1333* | *1637* | *2738* | *3020* | *3210* | *3372* | *3519* | *3658* | *3793* |
| *s)* | *0,001* | *0,693* | *1,29* | *1,818* | *2,3* | *2,753* | *3,203* | *3,709* | *5,409* | *5,813* | *6,068* | *6,271* | *6,444* | *6,599* | *6,742* |

## *CONSTANTES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR DE AGUA HÚMEDO (Temperaturas)*

*Medidas inglesas*

| *Temp. °F* | *Presión psia* | *Volumen ($ft^3/lb$)* | | | *Entalpía (Btu/lb)* | | | *Entropía (Btu/lb°F)* | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *Agua* $v'$ | *Ag+ vapor* $v'' - v'$ | *Vapor* $v''$ | *Agua* $i'$ | *Ag+vap* $r_{l-v}$ | *Vapor* $i''$ | *Agua* $s'$ | *Ag+vap* $s'' - s'$ | *Vapor* $s''$ |
| 32 | 0,08859 | 0,01602 | 3305 | 3305 | - 0,02 | 1075,5 | 1075,5 | 0 | 2,1873 | 2,1873 |
| 35 | 0,09991 | 0,01602 | 2948 | 2948 | 3 | 1073,8 | 1076,8 | 0,0061 | 2,1706 | 2,1767 |
| 40 | 0,12163 | 0,01602 | 2446 | 2446 | 8,03 | 1071 | 1079,0 | 0,0162 | 2,1432 | 2,1594 |
| 45 | 0,14744 | 0,01602 | 2037,7 | 2307,7 | 13,04 | 1068,1 | 1081,2 | 0,0262 | 2,1164 | 2,1426 |
| 50 | 0,17796 | 0,01602 | 1704,8 | 1704,8 | 18,05 | 1065,3 | 1083,4 | 0,0361 | 2,0901 | 2,1262 |
| 60 | 0,2561 | 0,1603 | 1207,6 | 1207,6 | 28,06 | 1059,7 | 1087,7 | 0,0555 | 2,0391 | 2,0946 |
| 70 | 0,3629 | 0,01605 | 868,3 | 868,3 | 38,05 | 1054 | 1092,1 | 0,0745 | 1,99 | 2,0645 |
| 80 | 0,5068 | 0,01607 | 633,3 | 633,3 | 48,04 | 1048,4 | 1096,4 | 0,0932 | 1,9426 | 2,0359 |
| 90 | 0,6981 | 0,0161 | 468,1 | 468,1 | 58,02 | 1042,7 | 1100,8 | 0,1115 | 1,897 | 2,0086 |
| 100 | 0,9492 | 0,01613 | 350,4 | 350,4 | 68 | 1037,1 | 1105,1 | 0,1295 | 1,853 | 1,9825 |
| 110 | 1,275 | 0,01617 | 265,4 | 265,4 | 77,98 | 1031,4 | 1109,3 | 0,1472 | 1,8105 | 1,9577 |
| 120 | 1,6927 | 0,0162 | 203,25 | 203,26 | 87,97 | 1025,6 | 1113,6 | 0,1646 | 1,7693 | 1,9339 |
| 130 | 2,223 | 0,01625 | 157,32 | 157,33 | 97,96 | 1019,8 | 1117,8 | 0,1817 | 1,7295 | 1,9112 |
| 140 | 2,8892 | 0,01629 | 122,98 | 123 | 107,95 | 1014 | 1122,0 | 0,1985 | 1,691 | 1,8895 |
| 150 | 3,718 | 0,01634 | 97,05 | 97,07 | 117,95 | 1008,2 | 1126,1 | 0,215 | 1,6536 | 1,8686 |
| 160 | 4,741 | 0,0164 | 77,27 | 77,29 | 127,96 | 1002,2 | 1130,2 | 0,2313 | 1,6174 | 1,8487 |
| 170 | 5,993 | 0,01645 | 62,04 | 62,06 | 137,97 | 996,2 | 1134,2 | 0,2473 | 1,5822 | 1,8295 |
| 180 | 7,511 | 0,01651 | 50,21 | 50,22 | 148 | 990,2 | 1138,2 | 0,2631 | 1,548 | 1,8111 |
| 190 | 9,34 | 0,01657 | 40,94 | 40,96 | 158,04 | 984,1 | 1142,1 | 0,2787 | 1,5148 | 1,7934 |
| 200 | 11,526 | 0,01664 | 33,62 | 33,64 | 168,09 | 977,9 | 1146,0 | 0,294 | 1,4824 | 1,7764 |
| 210 | 14,123 | 0,01671 | 27,8 | 27,8 | 178,15 | 971,6 | 1149,7 | 0,3091 | 1,4509 | 1,76 |
| 212 | 14,696 | 0,01672 | 25,78 | 26,8 | 180,17 | 970,3 | 1150,5 | 0,3121 | 1,4447 | 1,7568 |
| 220 | 17,186 | 0,01878 | 23,13 | 23,15 | 188,23 | 965,2 | 1153,4 | 0,3241 | 1,4201 | 1,7442 |
| 230 | 20,779 | 0,01685 | 19,364 | 19,381 | 198,33 | 958,7 | 1157,1 | 0,3388 | 1,3902 | 1,729 |
| 240 | 24,968 | 0,01693 | 16,304 | 16,321 | 208,45 | 952,1 | 1160,6 | 0,3533 | 1,3609 | 1,7142 |
| 250 | 29,825 | 0,01701 | 13,802 | 13,819 | 218,59 | 945,4 | 1164,0 | 0,3677 | 1,3323 | 1,7 |
| 260 | 35,427 | 0,01709 | 11,745 | 11,762 | 228,76 | 938,6 | 1167,4 | 0,3819 | 1,3043 | 1,6862 |
| 270 | 41,856 | 0,01718 | 10,042 | 10,06 | 238,95 | 931,7 | 1170,6 | 0,396 | 1,2769 | 1,6729 |
| 280 | 49,2 | 0,01726 | 8,627 | 8,644 | 249,17 | 924,6 | 1173,8 | 0,4098 | 1,2501 | 1,6599 |
| 290 | 57,55 | 0,01736 | 7,443 | 7,4 | 259,4 | 917,4 | 1176,8 | 0,4236 | 1,2238 | 1,6473 |
| 300 | 67,005 | 0,01745 | 6,448 | 6,466 | 269,7 | 910 | 1179,7 | 0,4372 | 1,1979 | 1,6351 |
| 310 | 77,67 | 0,01755 | 5,609 | 5,626 | 280 | 902,5 | 1182,5 | 0,4506 | 1,1726 | 1,6232 |
| 320 | 89,64 | 0,01766 | 4,896 | 4,914 | 290,4 | 894,8 | 1185,2 | 0,464 | 1,1477 | 1,6116 |
| 340 | 117,99 | 0,01787 | 3,77 | 3,788 | 311,3 | 878,8 | 1190,1 | 0,4902 | 1,099 | 1,5892 |
| 360 | 153,01 | 0,01811 | 2,939 | 2,957 | 332,3 | 862,1 | 1194,4 | 0,5161 | 1,0517 | 1,5678 |
| 380 | 195,73 | 0,01836 | 2,317 | 2,335 | 353,6 | 844,5 | 1198,0 | 0,5416 | 1,0057 | 1,5473 |
| 400 | 247,26 | 1864 | 1,8444 | 1,863 | 375,1 | 825,9 | 1201,0 | 0,5667 | 0,9607 | 1,5274 |
| 420 | 308,78 | 0,01894 | 1,4844 | 1,4997 | 396,9 | 806,2 | 1203,1 | 0,5915 | 0,9165 | 1,508 |
| 440 | 381,54 | 0,01926 | 1,1976 | 1,2169 | 419 | 785,4 | 1204,4 | 0,6161 | 0,8729 | 1,489 |
| 460 | 4669 | 0,0196 | 0,9746 | 0,9942 | 441,5 | 763,2 | 1204,8 | 0,6405 | 0,8299 | 1,4704 |
| 480 | 566,2 | 0,02 | 0,7972 | 0,8172 | 464,5 | 739,6 | 1204,1 | 0,6648 | 0,7871 | 1,4518 |
| 500 | 680,9 | 0,0204 | 0,6545 | 0,6749 | 487,9 | 714,3 | 1202,2 | 0,689 | 0,7443 | 1,4333 |
| 520 | 812,5 | 0,0209 | 0,5386 | 0,5596 | 512 | 687 | 1199,0 | 0,7133 | 0,7013 | 1,4146 |
| 540 | 962,8 | 0,0215 | 0,4437 | 0,4651 | 536,8 | 667,5 | 1194,3 | 0,7378 | 0,6577 | 1,3954 |
| 560 | 1133,4 | 0,0221 | 0,3651 | 0,3871 | 563,4 | 625,3 | 1187,7 | 0,7625 | 0,6132 | 1,3757 |
| 580 | 1326,2 | 0,0228 | 0,2994 | 0,3222 | 589,1 | 589,9 | 11790,0 | 0,7876 | 0,5673 | 1,355 |
| 600 | 1543,2 | 0,0235 | 0,2438 | 0,2675 | 617,1 | 550,6 | 1167,7 | 0,8134 | 0,5196 | 1,333 |
| 620 | 1786,9 | 0,0247 | 0,1962 | 0,2208 | 646,9 | 506,3 | 1153,2 | 0,8403 | 0,4689 | 1,3092 |
| 640 | 2059,9 | 0,026 | 0,1543 | 0,1802 | 679,1 | 454,6 | 1133,7 | 0,8686 | 4134 | 1,2821 |
| 660 | 2365,7 | 0,0277 | 0,1166 | 0,1443 | 714,9 | 392,1 | 1107,0 | 0,8995 | 0,3502 | 1,2498 |
| 680 | 2708,6 | 0,0304 | 0,0808 | 0,1112 | 758,5 | 310,1 | 1068,5 | 0,9365 | 0,272 | 1,2086 |
| 700 | 3094,3 | 0,0366 | 0,0386 | 0,0752 | 822,4 | 172,7 | 995,2 | 0,9901 | 0,149 | 1,139 |
| 705,5 | 3208,2 | 0,0598 | 0 | 0,0508 | 906 | 0 | 9060,0 | 1,0612 | 0 | 1,0612 |

## *CONSTANTES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR DE AGUA HÚMEDO (Presiones)*

*Medidas inglesas*

| *Presión psia* | *Temper ºF* | | | | *Entalpía (Btu / lb)* | | | *Entropía (Btu / lbºF)* | | | *Energía (Btu / lb)* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | *Agua v'* | *Ag+vap v" - v'* | *Vapor v''* | *Agua i'* | *Ag+vap $r_{l-v}$* | *Vapor i''* | *Agua s'* | *Ag+vap s" - s'* | *Vapor s''* | *Agua* | *Vapor* |
| *0,0886* | *32,018* | *0,01602* | *3302,4* | *3302,4* | *0* | *1075,5* | *1075,5* | *0* | *2,1872* | *2,1872* | *0,00* | *1021,3* |
| *0,1* | *35,023* | *0,01602* | *2945,5* | *2945,45* | *3,03* | *1073,8* | *1076,8* | *0,0061* | *2,1708* | *2,1766* | *3,03* | *1022,3* |
| *0,15* | *45,453* | *0,01602* | *2004,7* | *2004,7* | *13,50* | *1067,9* | *1081,4* | *0,0271* | *2,114* | *2,1411* | *13,50* | *1025,7* |
| *0,2* | *53,16* | *0,01603* | *1526,3* | *1526,3* | *21,22* | *1063,5* | *1084,7* | *0,0422* | *2,0738* | *2,1160* | *21,22* | *1028,3* |
| *0,3* | *64,484* | *0,01604* | *1039,7* | *1039,7* | *32,54* | *1057,1* | *1089,7* | *0,0641* | *2,0168* | *2,0809* | *32,54* | *1032,0* |
| *0,4* | *72,869* | *0,01606* | *792,0* | *792,1* | *40,92* | *1052,4* | *1093,3* | *0,0799* | *1,9762* | *2,0563* | *40,92* | *1034,7* |
| *0,5* | *79,586* | *0,01607* | *641,5* | *641,5* | *47,62* | *1048,6* | *1096,3* | *0,0925* | *1,9446* | *2,0370* | *47,62* | *1036,9* |
| *0,6* | *85,218* | *0,01609* | *540,0* | *540,1* | *53,25* | *1045,5* | *1098,7* | *0,1028* | *1,9186* | *2,0215* | *53,24* | *1038,7* |
| *0,7* | *90,09* | *0,0161* | *466,93* | *466,94* | *58,10* | *1042,7* | *1100,8* | *0,1030* | *1,8966* | *2,0083* | *58,10* | *1040,3* |
| *0,8* | *94,38* | *0,01611* | *411,67* | *411,69* | *62,39* | *1040,3* | *1102,6* | *0,1117* | *1,8775* | *1,9970* | *62,39* | *1041,7* |
| *0,9* | *98,24* | *0,01612* | *368,43* | *368,43* | *66,24* | *1038,1* | *1104,3* | *0,1264* | *1,8606* | *1,9870* | *66,24* | *1042,9* |
| *1* | *101,74* | *0,01614* | *333,59* | *333,60* | *69,73* | *1036,1* | *1105,8* | *0,1325* | *1,8455* | *1,9781* | *69,73* | *1044,1* |
| *2* | *126,07* | *0,01623* | *173,74* | *173,76* | *94,03* | *1022,1* | *1116,2* | *0,1750* | *1,745* | *1,9200* | *94,03* | *1051,8* |
| *3* | *141,07* | *0,0163* | *118,71* | *118,73* | *109,42* | *1013,2* | *1122,6* | *0,2009* | *1,6854* | *1,8864* | *109,41* | *1056,7* |
| *4* | *152,98* | *0,01636* | *90,630* | *90,64* | *120,92* | *1006,4* | *1127,3* | *0,2199* | *1,6428* | *1,8626* | *120,90* | *1060,2* |
| *5* | *162,24* | *0,01641* | *73,520* | *73,53* | *130,20* | *1000,9* | *1131,1* | *0,2349* | *1,6094* | *1,8443* | *130,18* | *1063,1* |
| *6* | *170,05* | *0,01645* | *61,967* | *61,98* | *138,03* | *996,2* | *1134,2* | *0,2474* | *1,582* | *1,8294* | *138,01* | *1065,4* |
| *7* | *176,84* | *0,01649* | *53,634* | *53,65* | *144,83* | *992,1* | *1136,9* | *0,2581* | *1,5587* | *1,8168* | *144,81* | *1067,4* |
| *8* | *182,86* | *0,01653* | *47,328* | *47,35* | *150,87* | *988,5* | *1139,3* | *0,2676* | *1,5384* | *1,806* | *150,84* | *1069,2* |
| *9* | *188,27* | *0,01656* | *42,385* | *42,40* | *156,30* | *985,1* | *1141,4* | *0,2760* | *1,5204* | *1,7964* | *156,28* | *1070,8* |
| *10* | *193,21* | *0,01659* | *38,404* | *38,42* | *161,26* | *982,1* | *1143,3* | *0,2836* | *1,5043* | *1,7879* | *161,23* | *1072,3* |
| *14,7* | *212* | *0,01672* | *26,782* | *26,80* | *180,17* | *970,3* | *1150,5* | *0,3121* | *1,4447* | *1,7568* | *180,12* | *1077,6* |
| *15* | *213,03* | *0,01673* | *26,274* | *26,29* | *181,21* | *969,7* | *1150,9* | *0,3137* | *1,4415* | *1,7552* | *18116* | *1077,9* |
| *20* | *227,96* | *0,01683* | *20,070* | *20,087* | *196,27* | *960,1* | *1156,3* | *0,3358* | *1,3962* | *1,7320* | *196,21* | *1082,0* |
| *30* | *250,34* | *0,01701* | *13,727* | *13,744* | *218,9* | *945,2* | *1164,1* | *0,3682* | *1,3313* | *1,6995* | *218,3* | *1087,9* |
| *40* | *167,25* | *0,01716* | *10,479* | *10,497* | *236,1* | *933,6* | *1169,8* | *0,3921* | *1,2844* | *1,6765* | *236,0* | *1092,1* |
| *50* | *281,02* | *0,01727* | *8,497* | *8,514* | *250,2* | *923,9* | *1174,1* | *0,4112* | *1,2474* | *1,6586* | *250,1* | *1095,3* |
| *60* | *292,71* | *0,01738* | *7,156* | *7,174* | *262,2* | *915,4* | *1177,6* | *0,4273* | *1,2167* | *1,6440* | *262,0* | *1098,0* |
| *70* | *302,93* | *0,01748* | *6,188* | *6,205* | *272,7* | *907,8* | *1180,6* | *0,4411* | *1,1905* | *1,6316* | *272,5* | *1100,2* |
| *80* | *312,04* | *0,01757* | *5,454* | *5,471* | *282,1* | *900,9* | *1183,1* | *0,4534* | *1,1675* | *1,6208* | *281,9* | *1102,1* |
| *90* | *320,28* | *0,01766* | *4,878* | *4,895* | *290,7* | *894,6* | *1185,3* | *0,4643* | *1,1470* | *1,6113* | *290,4* | *1103,2* |
| *100* | *327,82* | *0,01774* | *4,413* | *4,431* | *298,5* | *888,6* | *1187,2* | *0,4743* | *1,1284* | *1,6027* | *298,2* | *1105,8* |
| *120* | *341,27* | *0,01789* | *3,710* | *3,728* | *312,6* | *877,8* | *1190,4* | *0,4919* | *1,0960* | *1,5879* | *312,2* | *1107,6* |
| *140* | *353,04* | *0,01803* | *3,201* | *3,219* | *325,0* | *868,0* | *1193* | *0,5071* | *1,0681* | *1,5752* | *324,5* | *1109,6* |
| *160* | *363,55* | *0,01815* | *2,816* | *2,834* | *336,1* | *859,0* | *1195,1* | *0,5206* | *1,0435* | *1,5641* | *335,5* | *1111,2* |
| *180* | *373,08* | *0,01827* | *2,513* | *2,531* | *346,2* | *850,7* | *1196,9* | *0,5328* | *1,0215* | *1,5543* | *345,6* | *1112,5* |
| *200* | *381,80* | *0,01839* | *2,269* | *2,287* | *355,5* | *842,8* | *1198,3* | *0,5438* | *1,0016* | *1,5454* | *354,8* | *1113,7* |
| *250* | *400,97* | *1,8245* | *1,825* | *1,8432* | *376,1* | *825,0* | *1201,1* | *0,5679* | *0,9585* | *1,5264* | *375,3* | *1115,8* |
| *300* | *417,35* | *1,5238* | *1,524* | *1,5427* | *394,0* | *808,9* | *1202,9* | *0,5882* | *0,9223* | *1,5105* | *392,9* | *1117,2* |
| *350* | *431,73* | *1,3064* | *1,306* | *1,3255* | *409,8* | *794,2* | *1204,0* | *0,6059* | *0,8909* | *1,4968* | *408,6* | *1118,1* |
| *400* | *444,60* | *1,1416* | *1,1416* | *1,1610* | *424,2* | *780,4* | *1204,6* | *0,6217* | *0,863* | *1,4847* | *422,7* | *1118,7* |
| *450* | *456,28* | *1,0122* | *1,0122* | *1,0318* | *437,3* | *842,8* | *1204,8* | *0,6360* | *0,8378* | *1,4738* | *435,7* | *1118,9* |
| *500* | *467,01* | *0,0198* | *0,90787* | *0,9276* | *449,5* | *755,1* | *1204,7* | *0,6490* | *0,8148* | *14639* | *447,7* | *1118,8* |
| *550* | *476,94* | *0,0199* | *0,82183* | *0,8416* | *460,9* | *743,3* | *1204,3* | *0,8611* | *0,7936* | *1,4547* | *458,9* | *1118,6* |
| *600* | *486,20* | *0,0201* | *0,74962* | *0,7698* | *471,7* | *732,0* | *1203,7* | *0,6723* | *0,7738* | *1,4461* | *469,5* | *1118,2* |
| *700* | *503,08* | *0,0205* | *0,63505* | *0,6556* | *491,6* | *710,2* | *1201,8* | *0,6928* | *0,7377* | *1,4304* | *488,9* | *1116,9* |
| *800* | *518,21* | *0,0209* | *0,54809* | *0,5690* | *509,8* | *689,6* | *1199,4* | *0,7111* | *0,7051* | *1,4163* | *506,7* | *1115,2* |
| *900* | *531,95* | *0,0212* | *0,47968* | *0,5009* | *526,7* | *669,7* | *1196,4* | *0,7279* | *0,6753* | *1,4032* | *532,2* | *1113,0* |
| *1000* | *544,58* | *0,0216* | *0,42436* | *0,4460* | *542,6* | *650,4* | *1192,9* | *0,7434* | *0,6476* | *1,3910* | *538,6* | *1110,4* |
| *1100* | *556,28* | *0,022* | *0,37863* | *0,4006* | *557,5* | *631,5* | *1189,1* | *0,7578* | *0,6216* | *1,3794* | *553,1* | *1107,5* |
| *1200* | *567,19* | *0,0223* | *0,34013* | *0,3625* | *571,9* | *613,0* | *1184,8* | *0,7714* | *0,5969* | *1,3683* | *566,9* | *1104,3* |
| *1300* | *577,42* | *0,0227* | *0,30722* | *0,3299* | *585,6* | *594,6* | *1180,2* | *0,7843* | *0,5733* | *1,3577* | *580,1* | *1100,9* |
| *1400* | *587,07* | *0,0231* | *0,27871* | *0,3018* | *598,8* | *576,5* | *1175,3* | *0,7966* | *0,5507* | *1,3474* | *592,9* | *1097,1* |
| *1500* | *596,20* | *0,0235* | *0,25372* | *0,2772* | *611,7* | *558,4* | *1170,1* | *0,8085* | *0,5288* | *1,3373* | *605,2* | *1093,1* |
| *2000* | *635,80* | *0,0257* | *0,16266* | *0,1883* | *672,1* | *466,2* | *1138,3* | *0,8625* | *0,4256* | *1,2881* | *662,6* | *1068,6* |
| *2500* | *668,11* | *0,0286* | *0,10209* | *0,1307* | *731,7* | *361,6* | *1093,3* | *0,9139* | *0,3206* | *1,2345* | *718,5* | *1032,9* |
| *3000* | *695,33* | *0,0343* | *0,05073* | *0,0850* | *801,8* | *218,4* | *1020,3* | *0,9728* | *0,1891* | *1,1619* | *782,8* | *973,1* |
| *3208,2* | *705,47* | *0,0508* | *0,000000* | *0,0508* | *906* | *0,00000* | *906* | *1,0612* | *0* | *1,0612* | *875,9* | *875,9* |

## *CONSTANTES TERMODINÁMICAS DEL VAPOR DE AGUA RECALENTADO*

*Medidas inglesas Volumen ($ft^3/lb$), Entalpía ($Btu/lb$), Entropía ($Btu/lb°F$)*

| *(Presión, psia)* | | *Temperatura, °F* | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *(Tsat. °F)* | | *100* | *200* | *300* | *400* | *500* | *600* | *700* | *800* | *900* | *1000* | *1100* | *1200* | *1300* | *1400* | *1500* |
| *1* | *v* | *0,016* | *392,5* | *452,3* | *511,9* | *571,5* | *631,1* | *690,7* | | | | | | | | |
| *101,72* | *i* | *68* | *1150* | *1196* | *1242* | *1289* | *1336* | *1385* | | | | | | | | |
| | *s* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | | | | | | | | |
| *5* | *v* | *0* | *78,14* | *90,24* | *102* | *114* | *126* | *138* | *150* | *162* | *174* | *186* | *197,7* | *210* | *222* | *233* |
| *162,24* | *i* | *68,01* | *1149* | *1195* | *1241* | *1288* | *1336* | *1384* | *1434* | *1484* | *1535* | *1587* | *1640* | *1693* | *1748* | *1804* |
| | *s* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2,046* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *10* | *v* | *0* | *38,84* | *44,98* | *51,03* | *57,04* | *63,03* | *69,00* | *74,98* | *80,94* | *86,91* | *92,87* | *98,84* | *104,80* | *110,76* | *116,72* |
| *193,21* | *i* | *68,02* | *1147* | *1194* | *1241* | *1288* | *1336* | *1384* | *1433* | *1484* | *1535* | *1587* | *1640* | *1693* | *1748* | *1803* |
| | *s* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2,243* | *2* | *2* | *2* |
| *15* | *v* | *0* | *0* | *30* | *34* | *38* | *42* | *46* | *50* | *54* | *58* | *62* | *66* | *70* | *74* | *78* |
| *213,03* | *i* | *68,04* | *168* | *1193* | *1240* | *1287* | *1335* | *1384* | *1433* | *1483* | *1535* | *1587* | *1639* | *1693* | *1748* | *1803* |
| | *s* | *0* | *0,294* | *2* | *1,872* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2,289* |
| *20* | *v* | *0* | *0* | *22* | *25* | *26* | *31* | *34* | *37* | *40* | *43* | *46,42* | *49* | *52* | *55,37* | *58* |
| *227,96* | *i* | *68,05* | *168* | *1191* | *1239* | *1287* | *1335* | *1384* | *1433* | *1483* | *1534* | *1586* | *1639* | *1693* | *1748* | *1803* |
| | *s* | *0* | *0,294* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *40* | *v* | *0* | *0* | *11* | *13* | *14* | *16* | *17* | *19* | *20* | *22* | *23* | *25* | *26* | *28* | *29* |
| *267,25* | *i* | *68,1* | *168* | *1187* | *1236* | *1285* | *1334* | *1383* | *1432* | *1483* | *1534* | *1586* | *1639* | *1993* | *1748* | *1803* |
| | *s* | *0* | *0,294* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *1,986* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *60* | *v* | *0* | *0* | *7,257* | *8,354* | *9,4* | *10* | *11* | *12* | *13,45* | *14* | *15* | *16,45* | *17* | *18* | *19* |
| *292,61* | *i* | *6815* | *168,2* | *1182* | *1234* | *1283* | *1332* | *1382* | *1431* | *1482* | *1533* | *1585* | *1638* | *1692* | *1747* | *1803* |
| | *s* | *0* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *1,941* | *2* | *2,012* | *2,045* | *2* | *2* | *2* |
| *80* | *v* | *0* | *0* | *0* | *6,218* | *7,018* | *7,794* | *8,56* | *9,319* | *10* | *11* | *12* | *12* | *13* | *14* | *15* |
| *312,04* | *i* | *68,21* | *168* | *270* | *1231* | *1281* | *1331* | *1381* | *1431* | *1481* | *1533* | *1585* | *1638* | *1692* | *1747* | *1803* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *1,679* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *1,98* | *2* | *2* | *2,075* | *2* |
| *100* | *v* | *0* | *0* | *0* | *4,935* | *5,588* | *6,216* | *6,833* | *7,443* | *8,05* | *8,655* | *9,258* | *9,86* | *10,46* | *11,06* | *12* |
| *327,82* | *i* | *68,26* | *168* | *270* | *1227* | *1279* | *1330* | *1380* | *1430* | *1480* | *1532* | *1584* | *1638* | *1692* | *1747* | *1802* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *120* | *v* | *0* | *0* | *0* | *4* | *5* | *5* | *6* | *6* | *7* | *7,206* | *8* | *8* | *8,713* | *9* | *9,713* |
| *341,27* | *i* | *68,31* | *168* | *270* | *1224* | *1277* | *1328* | *1378* | *1429* | *1480* | *1531* | *1584* | *1637* | *1691* | *1746* | *1802* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *1,968* | *2* | *2,03* | *2* |
| *140* | *v* | *0* | *0* | *0* | *3* | *4* | *4* | *5* | *5* | *6* | *6* | *7* | *7* | *7* | *8* | *8* |
| *353,04* | *i* | *68,37* | *168* | *270* | *1221* | *1275* | *1327* | *1377* | *1428* | *1479* | *1531* | *1583* | *1637* | *1691* | *1746* | *1802* |
| | *s* | *0* | *0* | *0,437* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *160* | *v* | *0* | *0* | *0* | *3,006* | *3* | *3,848* | *4,242* | *5* | *5* | *5* | *6* | *6* | *7* | *7* | *7* |
| *363,55* | *i* | *68,42* | *168* | *270* | *1217* | *1273* | *1325* | *1376* | *1427* | *1478* | *1530* | *1583* | *1636* | *1691* | *1746* | *1801* |
| | *s* | *0* | *0* | *0,437* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *1,831* | *2* | *2* | *2* | *2* | *1,998* | *2* |
| *180* | *v* | *0* | *0* | *0* | *3* | *3* | *3* | *4* | *4* | *4* | *5* | *5* | *5* | *6* | *6* | *6* |
| *373,08* | *i* | *68,47* | *168* | *270* | *1214* | *1271* | *1324* | *1375* | *1426* | *1478* | *1530* | *1582* | *1636* | *1690* | *1745* | *1801* |
| | *s* | *0* | *0* | *0,437* | *2* | *2* | *1,69* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *200* | *v* | *0* | *0* | *0* | *2* | *3* | *3* | *3* | *4* | *4* | *4* | *5* | *5* | *5* | *6* | *6* |
| *381,8* | *i* | *68,52* | *169* | *270* | *1210* | *1269* | *1323* | *1374* | *1426* | *1477* | *1529* | *1582* | *1635* | *1690* | *1745* | *1801* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *250* | *v* | *0* | *0* | *0* | *0* | *2* | *2* | *3* | *2,941* | *3* | *3* | *4* | *4* | *4* | *4* | *5* |
| *400,87* | *i* | *68,66* | *169* | *270* | *375,1* | *1264* | *1319* | *1372* | *1423* | *1475* | *1528* | *1581* | *1634* | *1689* | *1744* | *1800* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *1* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *300* | *v* | *0* | *0* | *0* | *0* | *2* | *2* | *2* | *2* | *3* | *3* | *3* | *3* | *3* | *4* | *4* |
| *417,35* | *i* | *68,79* | *169* | *270* | *375* | *1258* | *1315* | *1369* | *1421* | *1474* | *1526* | *1579* | *1633* | *1688* | *1743* | *1800* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *1* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* |
| *350* | *v* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* | *2* | *1,897* | *2* | *2* | *2* | *3* | *2,798* | *2,973* | *3* | *3* |
| *431,73* | *i* | *68,92* | *169* | *279* | *375* | *1252* | *1311* | *1366* | *1419* | *1472* | *1625* | *1578* | *1632* | *1687* | *1743* | *1799* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *1* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *19400* |
| *400* | *v* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* | *1* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2,445* | *3* | *3* | *3* |
| *444,6* | *i* | *69,05* | *169* | *270* | *375* | *1245* | *1307* | *1363* | *1417* | *1470* | *1523* | *1577* | *1631* | *1686* | *1742* | *1798* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *1* | *2* | *2* | *2* | *1,685* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *1,925* |
| *500* | *v* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* | *1* | *1* | *1* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2* | *2,32* |
| *467,01* | *i* | *69,32* | *169* | *271* | *375* | *1231* | *1299* | *1358* | *1413* | *1467* | *1520* | *1574* | *1629* | *1684* | *1740* | *1797* |
| | *s* | *0* | *0* | *0* | *0,566* | *1* | *2* | *2* | *2* | *1,699* | *2* | *1,773* | *2* | *2* | *2* | *2* |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 600<br>486,2 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,516 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | i | 69,58 | 169 | 270,7 | 375 | 1216 | 1290 | 1352 | 1408 | 1463 | 1517 | 1572 | 1627 | 1683 | 1739 | 1796 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1,459 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 700<br>503,08 | v | 0 | 0 | 0,174 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1,653 |
| | i | 68,84 | 170 | 271 | 376 | 48793 | 1281 | 1346 | 1404 | 1459 | 1514 | 1569 | 1625 | 1681 | 1737 | 1794 |
| | s | 0 | 0 | 0,436 | 1 | 1 | 1,509 | 2 | 2 | 1,658 | 1,697 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 800<br>518,21 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,047 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| | i | 70,11 | 170 | 271 | 376 | 488 | 1271 | 1339 | 1399 | 1456 | 1511 | 1567 | 1623 | 1679 | 1735 | 1793 |
| | s | 0,129 | 0,293 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1,598 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 900<br>531,95 | v | 0,016 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,072 | 1,143 | 1 | 1 |
| | i | 70,37 | 170,1 | 271 | 376 | 488 | 1261 | 1333 | 1394 | 1452 | 1509 | 1564 | 1621 | 1677 | 1734 | 1792 |
| | s | 0,129 | 0 | 0 | 1 | O,6881 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1000<br>544,58 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,608 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | i | 70,63 | 170 | 271 | 376 | 488 | 1249 | 1326 | 1390 | 1449 | 1504 | 1562 | 1618 | 1675 | 1733 | 1790 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1,653 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1100<br>556,28 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,544 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | i | 70,9 | 171 | 272 | 376 | 488 | 1237 | 1319 | 1385 | 1445 | 1502 | 1559 | 1616 | 1674 | 1731 | 1789 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1,6 | 1,641 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1200<br>567,19 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,625 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | i | 71,16 | 171 | 272 | 376,2 | 485 | 1224 | 1312 | 1380 | 1441 | 1499 | 1557 | 1614 | 1672 | 1729 | 1788 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1400<br>587,07 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | i | 71,68 | 171 | 272 | 376 | 488 | 1194 | 1296 | 1369 | 1433 | 1492 | 1552 | 1610 | 1668 | 1726 | 1785 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1,567 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1600<br>604,87 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | i | 72,21 | 172 | 273 | 377 | 487,7 | 617 | 1279 | 1359 | 1425 | 1487 | 1547 | 1606 | 1664 | 1723 | 1782 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1800<br>621,02 | v | 0,016 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,35 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0,598 | 1 |
| | i | 72,73 | 172 | 273 | 377 | 488 | 616 | 1261 | 1347 | 1417 | 1481 | 1541 | 1601 | 1661 | 1720 | 1780 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 16528 | 2 | 2 | 2 |
| 2000<br>635,8 | v | 0,016 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,432 | 0,468 | 1 | 1 | 1 |
| | i | 73,26 | 172 | 273 | 377 | 488 | 614 | 1241 | 1353 | 1409 | 1474 | 1536 | 1597 | 1657 | 1717 | 1777 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2500<br>668,11 | v | 0,016 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,023 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,339 | 0 | 0,398 | 0 | 0 |
| | i | 74,57 | 174 | 274 | 378 | 487,5 | 612 | 1177 | 1303 | 1387 | 1458 | 1523 | 1586 | 1648 | 1709 | 1770 |
| | s | 0,128 | 0,291 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3000<br>695,33 | v | 0,016 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,228 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,277 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | i | 75,88 | 175 | 275 | 378 | 488 | 610 | 1061 | 1267 | 1363 | 1440 | 1509 | 1575 | 1639 | 1701 | 1762 |
| | s | 0 | 0 | 0,432 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3200<br>705,08 | v | 0,016 | 0 | 0,172 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,351 |
| | i | 76,4 | 175,3 | 275,6 | 378,7 | 487,5 | 609,4 | 800,8 | 1251 | 1353 | 1433 | 1504 | 1570 | 1635 | 1698 | 1761 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,43 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 3500 | v | 0,016 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,225 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | i | 77,2 | 176 | 276,2 | 379,1 | 487,6 | 608,4 | 779,4 | 1225 | 1338 | 1422 | 1496 | 1563 | 1629 | 1694 | 1757 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 4000 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,221 | 0 | 0 | 0 |
| | i | 78,5 | 177,2 | 277,1 | 379,8 | 487,7 | 606,9 | 763 | 1174 | 1312 | 1404 | 1481 | 1552 | 1620 | 1686 | 1751 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 0,676 | 0,794 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 5000 | v | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,189 | 0,205 | 0 |
| | i | 81,1 | 179,5 | 279,1 | 381,2 | 488,1 | 604,6 | 746 | 1043 | 1253 | 1365 | 1452 | 1529 | 1601 | 1670 | 1737 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 0,555 | 1 | 0,788 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 6000 | v | 0 | 0 | 0,017 | 0,018 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,102 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | i | 83,7 | 181,7 | 281 | 382,7 | 488,6 | 602,9 | 736,1 | 945,1 | 1189 | 1324 | 1422 | 1506 | 1582 | 1654 | 1724 |
| | s | 0 | 0,287 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| 7000 | v | 0 | 0 | 0,017 | 0,018 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,116 | 0 | 0 | 0 |
| | i | 86,2 | 184,4 | 283 | 384,2 | 489,3 | 601,7 | 729,3 | 901,8 | 1125 | 1282 | 1392 | 1483 | 1563 | 1639 | 1711 |
| | s | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,035 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 7000<br>503,08 | v | 0 | 0 | 0,174 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1,653 |
| | i | 68,84 | 170 | 271 | 376 | 48793 | 1281 | 1346 | 1404 | 1459 | 1514 | 1569 | 1625 | 1681 | 1737 | 1794 |
| | s | 0 | 0 | 0,436 | 1 | 1 | 1,509 | 2 | 2 | 1,658 | 1,697 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |

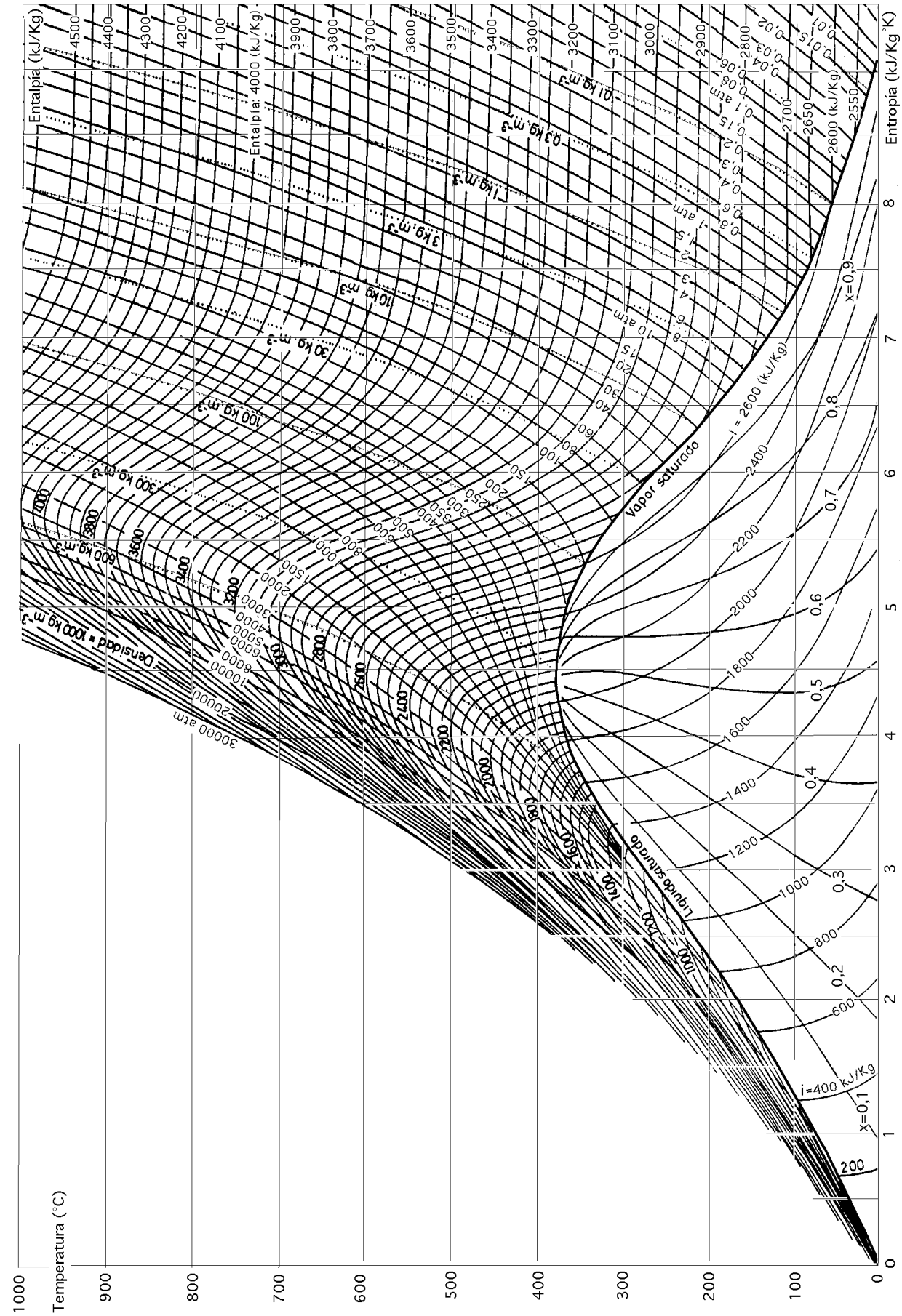
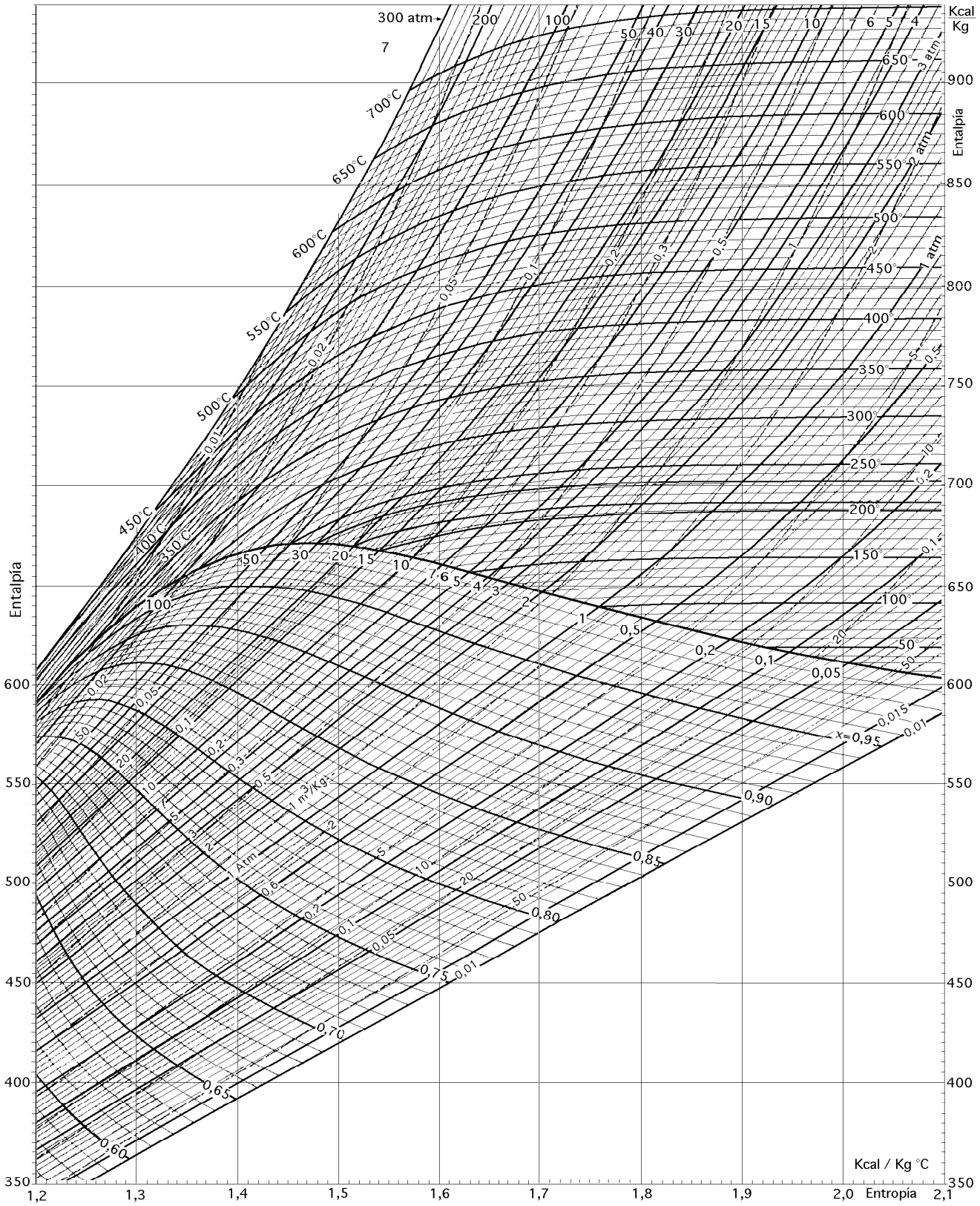



*DIAGRAMA DE IZART DEL VAPOR DE AGUA*


Kcal
Kg
Entalpía
Entalpía
Entropía
Kcal / Kg °C
300 atm
200
100
50
40
30
20
15
10
7
6
5
4
3 atm
2 atm
1 atm
700°C
650°C
600°C
550°C
500°C
450°C
400°C
350°C
650
600
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
20
10
7
6
5
4
3
2
1
0,5
0,2
0,1
0,05
0,02
0,01
0,5
0,3
0,2
0,1
0,05
0,02
0,01
0,5
0,2
0,1
0,05
0,02
0,01
0,5
0,2
0,1
0,05
0,02
0,01
0,5

## *REFERENCIAS CAP II.- TRANSFORMACIONES TERMODINÁMICAS*


*Vargaftik, N.B.-TABLES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF LIQUIDS AND GASES: IN NORMAL AND DISSOCIATED STATES, Second Ed., John Wiley & Sons, New York, New York, November, 1975.*

*Keenan, J.H., Chao, J., and Kaye, J.- GAS TABLES: THERMODYNAMIC PROPERTIES OF AIR PRODUCTS OF COMBUSTION AND COMPONENT GASES COMPRESSIBLE FLOW FUNCTIONS, Second Ed., John Wiley & Sons, New York, New York, June, 1983.*

*C. A. Meyer , al..- ASME STEAM TABLES.- American Society of Mechanical Engineers.- 1983*

*M. W. Chase , al..- JANAF THERMOCHEMICAL TABLES.- A, Ch, S. & A. I. Ph..- 1986*

*Chase, Jr., M.W., et al.- JANAF THERMOCHEMICAL TABLES, Fourth Ed., American Chemical Society, American Institute of Physics, New York, New York, 1998.*

*CRC.- HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS.- CRC Press.- 1989*

*B&W.- STEAM: ITS GENERATION AND USE , 40$^{th}$Edition, Chapter 2.- The Babcock & Wilcox Company.- Barberton, Ohio, USA.- 1992*

*V.A. Kirilin; V.V. Sichev; A.E. Sheindlin.- TERMODINAMICA TECNICA.- Ed. Mir, Moscú, 1976*

*Kenneth Wark.- TERMODINAMICA.- ISBN 968-451-563-4.- Ed McGraw Hill de México S.A., 1984*

*J. R. Holman.- TERMODINAMICA.- ISBN 0-07-090904-0.- Ed McGraw Hill de México S.A., 1977*

*M. Baylly.- THERMODYNAMIQUE TECHNIQUE.- Ed Bordas, París, Montreal 1971.- Calor, Principios, Gases y Vapores n° 131.710.501.- Producción y Transferencia del Calor n° 131.710.509*

*Russell y Adebiyi .- TERMODINAMICA CLASICA.- ISBN 0-201-65358-3.- Ed Addison-Weslwy Iberoamericana 1997*

*Irving M. Klotz; R.M. Rosenberg.- TERMODINAMICA QUIMICA.-.D.L.M.-31.835-1977.- ISBN 84-7288-015 K.- Ed A.C. Madrid 1977*

*R. Vichnievsky.- TERMODINAMICA TECNICA.- D.L.B. 24299-1978.- ISBN 84-335-6410-2.- Ed Labor S.A.*

*M.J. Morán; H.N. Shapiro.- FUNDAMENTOS DE TERMODINAMICA TECNICA.- ISBN 84-291-4671-5, Ed Reverte S.A. 1993*

*Parry, W.T., et al.- ASME INTERNATIONAL STEAM TABLES FOR INDUSTRIAL USE, Based on IAPWS-IF97, The American Society of Mechanical Engineers, New York, New York,January, 2000.*

*ASME STEAM PROPERTIES FOR INDUSTRIAL USE, Based on IAPWS-IF97, Professional Version 1.1, The American Society of Mechanical Engineers, New York, New York, 2003.*