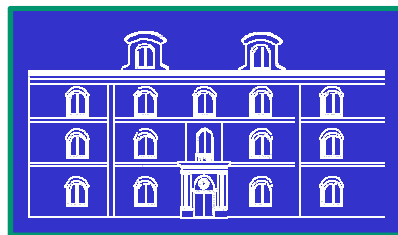


Modelización de sistemas térmicos mediante el programa Engineering Equation Solver



Joaquín Zueco Jordán
Área de Máquinas y Motores Térmicos
UPCT

EES ha sido desarrollado por dos profesores, el Dr. William Beckman y el Dr. Sanford Klein, ambos de la Universidad de Wisconsin.



EES proporciona la solución numérica de un conjunto de ecuaciones algebraicas. También se puede utilizar para:

- Resolver diferenciales y ecuaciones integrales.
- Hacer optimización.
- Proporcionar los análisis de incertidumbre y regresión lineal y no lineal.
- Generar gráficos con calidad de publicación.

EES se puede utilizar para resolver problemas de diseño en el que los efectos de uno o más parámetros deben ser determinados.

Estudio paramétrico mediante una tabla, que es similar a una hoja de cálculo. El usuario identifica las variables independientes mediante la introducción de sus valores en las celdas de tabla. EES calcula los valores de las variables dependientes de la tabla.

Base de datos de propiedades termodinámicas y de transporte es de gran ayuda en la solución de problemas en **termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor**.

Se puede utilizar para muchas aplicaciones de ingeniería, es ideal para la docencia en los cursos de ingeniería mecánica y para el ingeniero en la práctica de su profesión frente a la necesidad de resolver problemas prácticos.

Hay dos grandes diferencias entre EES y otros programas similares:

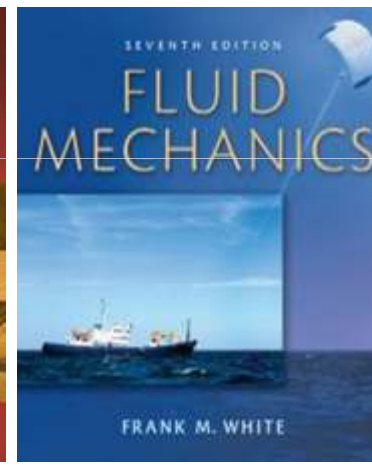
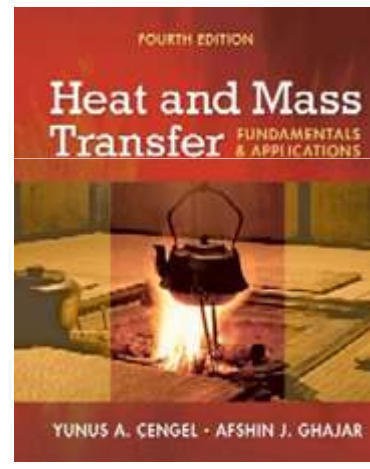
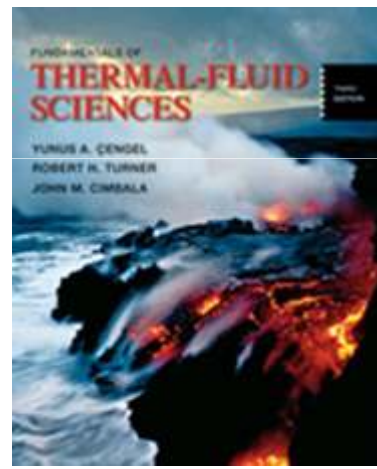
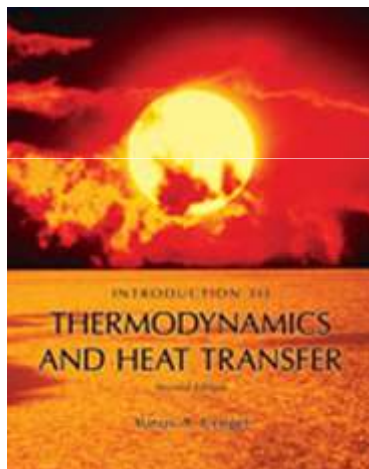
i) EES permite a las ecuaciones con variables desconocidas colocarlas en cualquier orden. EES reordena automáticamente las ecuaciones para obtener una solución eficiente.

ii) EES proporciona muchas funciones integradas de propiedades matemáticas y termofísicas útiles para los cálculos de ingeniería. Las propiedades de transporte también están disponibles para una gran cantidad de sustancias.

<http://www.mhhe.com/engcs/mech/ees/whatisees.html>

- Academic Version: Professors

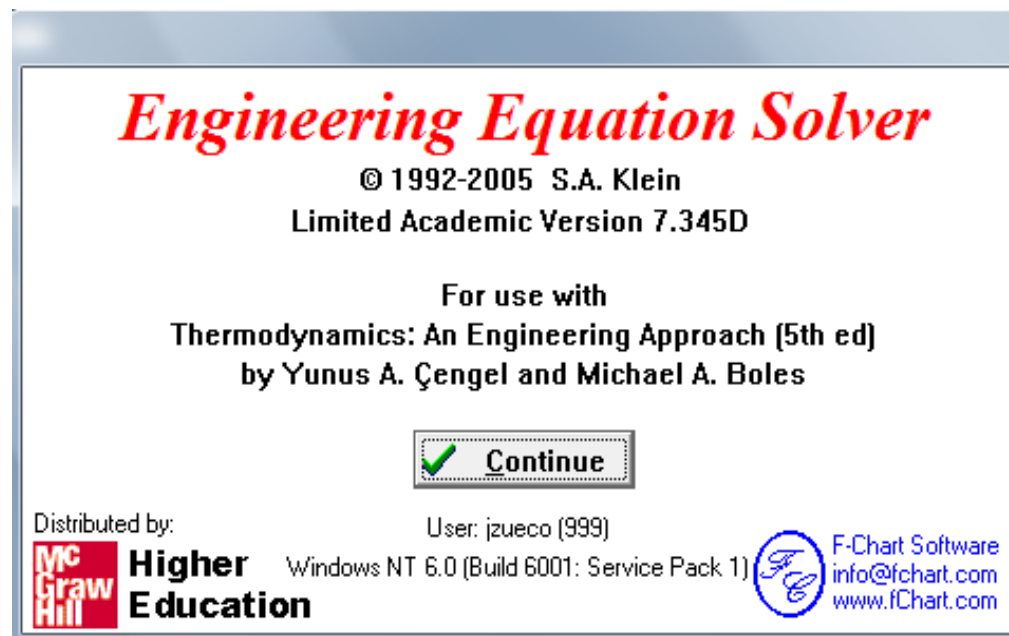
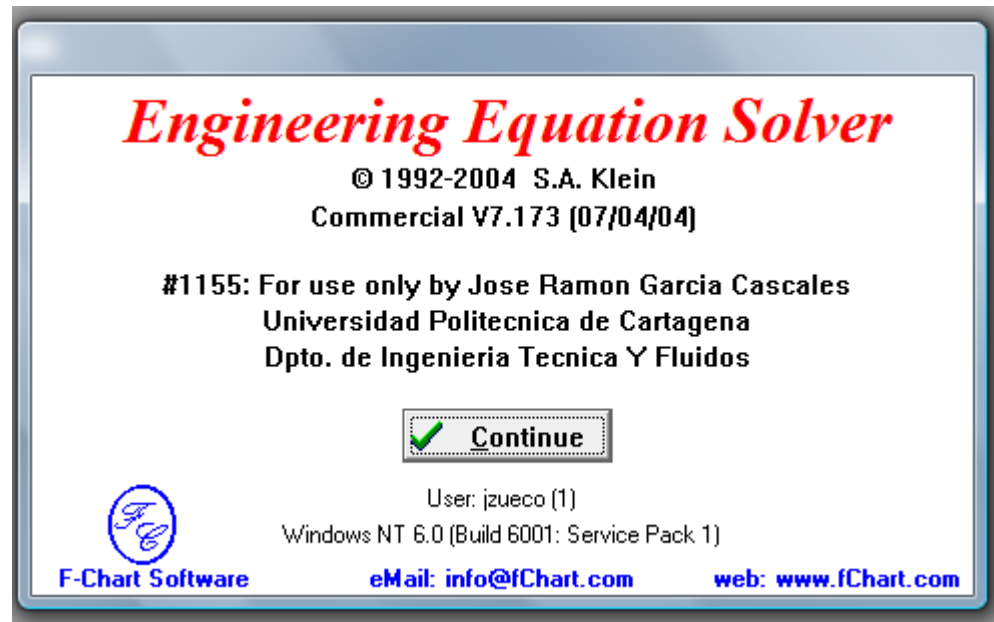
- Academic Version: Students (free with purchase of McGraw-Hill textbook)



- By Paid Subscription Only (Available through [E-Chart Software](#)):

. Professional version and commercial version

Versiones utilizadas



- La biblioteca de las funciones matemáticas y de propiedades termofísicas de EES es extensa. EES también permite que el usuario introduzca sus relaciones funcionales propias de tres maneras diferentes:

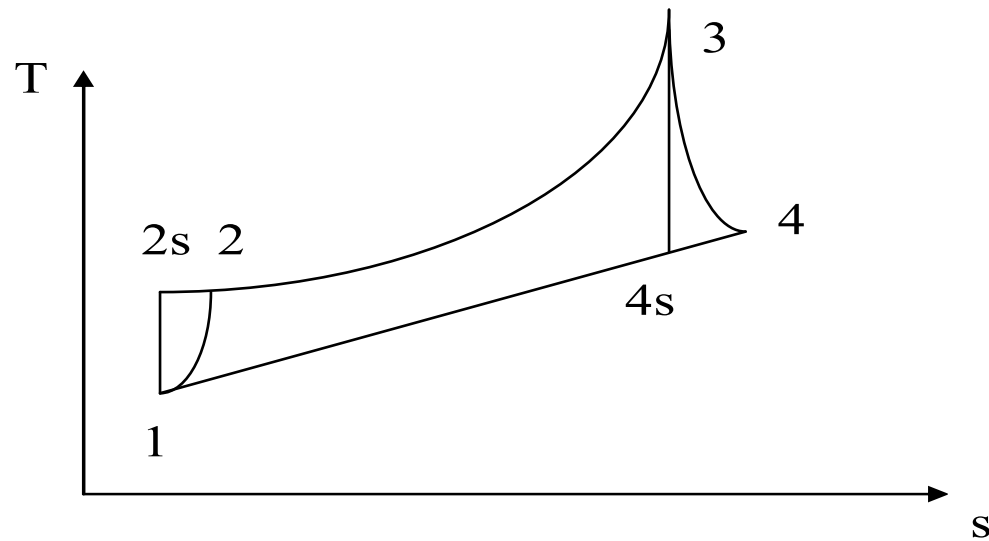
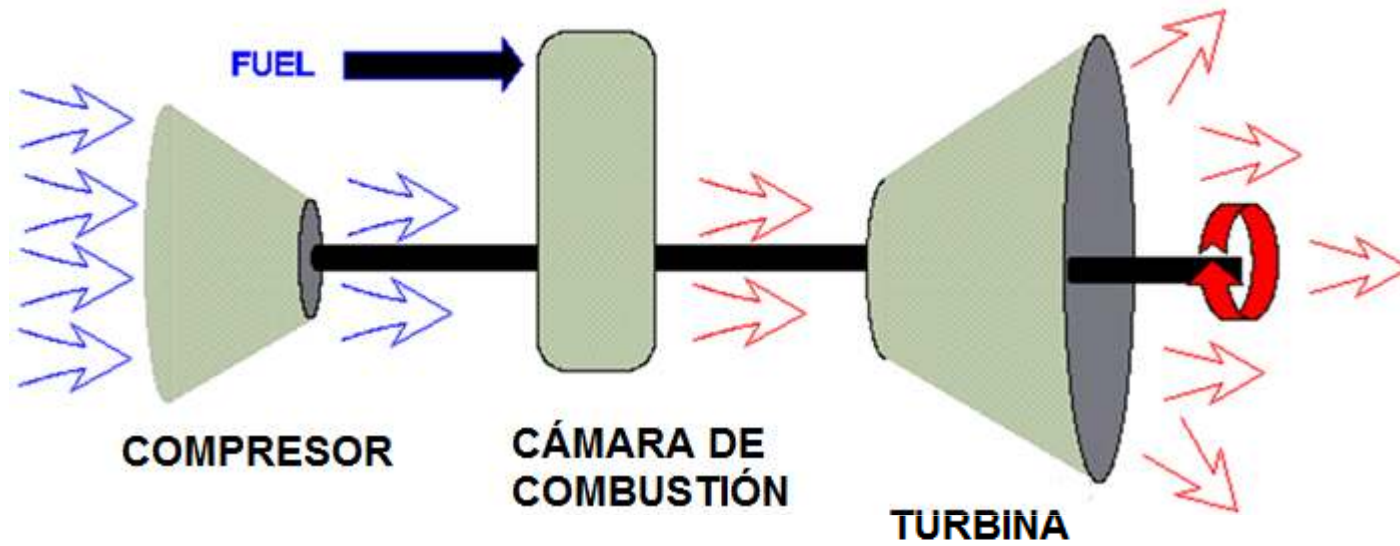
- . Mediante tablas, para el acceso y la interpolación de datos, de modo que los datos se pueden usar directamente en la solución del conjunto de ecuaciones.

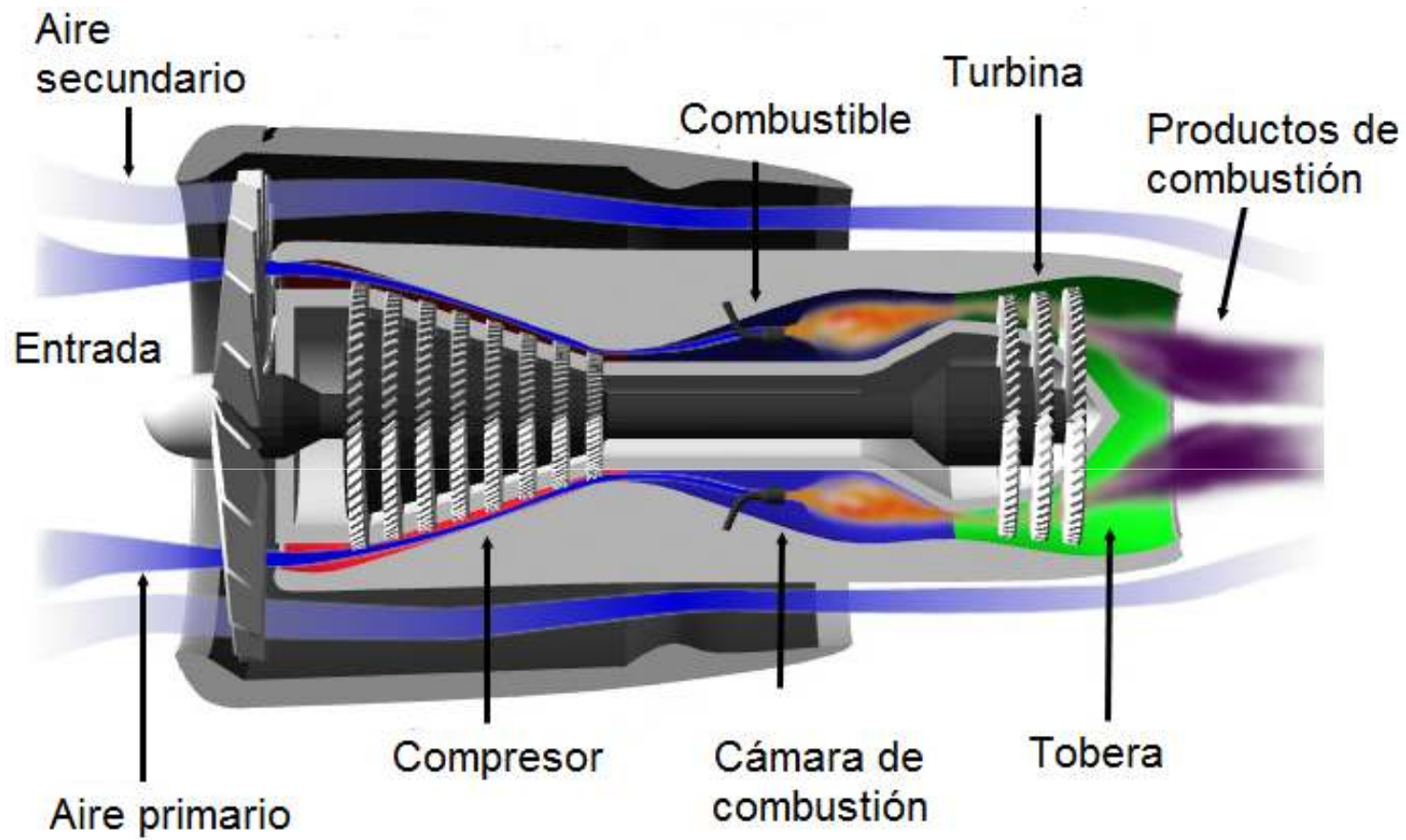
- . El lenguaje de EES permite la inclusión de funciones, procedimientos y módulos escritos por el usuario.

- . Compilado funciones y procedimientos, escritos en un lenguaje de alto nivel, como Pascal, C o FORTRAN, puede ser dinámicamente vinculados con EES.

PROBLEMA 1

TURBINA DE GAS SIMPLE





Motor turbina de gas para aplicación aérea



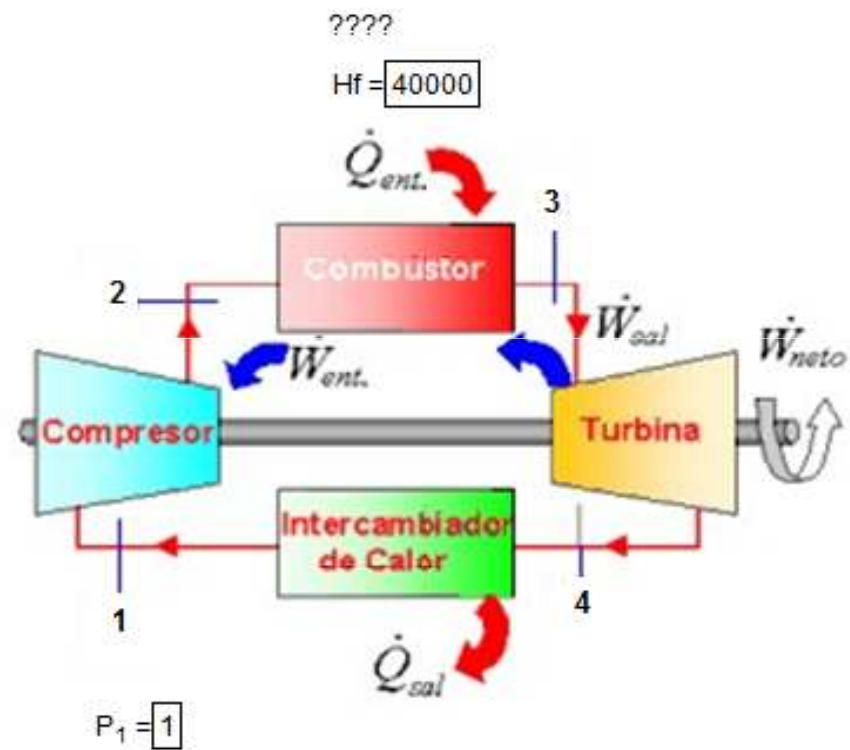
Ciclo combinado de Iberdrola en Escombreras (fuente: <http://www.iberdrola.es>)

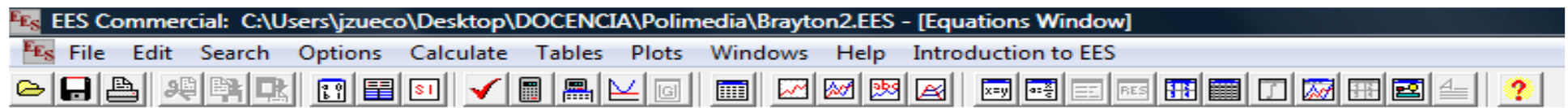


Fuente: <http://mmsengineering.ca/inpictures.php>



Fuente: <http://www.explainthatstuff.com/turbines.html>





"Ciclo de Brayton real"

"P[1]=1" {bar}

T[1]=25

T[3]=650

"eta_comp=8"

"P[2]=10"

eta_comp=P[2]/P[1] "Relación de compresión"

"P[2]=eta_comp/P[1]"

eta_cc=0.8 "Eficiencia de la cámara de combustión"

"Hf=45000 {KJ/Kg}"

mf=.75{Kg/s} "Consumo de combustible"

"ma=47" {Kg/s}

P_carga=3.0{%-} "Pérdida de carga"

F=mf/ma "Dosado absoluto"

eta_iso_comp=0.85 "Eficiencia isoentrópica del compresor"

eta_iso_tur=0.9

h[1]=enthalpy(AIR,T=T[1]) {KJ/kg}

s[1]=entropy(AIR,P=P[1],T=T[1])

hs[2]=enthalpy(AIR,P=P[2],s=s[1])

h[2]=h[1]+(hs[2]-h[1])/eta_iso_comp

Wcom=(h[1]-h[2]) "Trabajo del compresor"

h[3]=enthalpy(AIR,T=T[3]) {KJ/kg}

s[3]=entropy(AIR,P=P[3],T=T[3])

P[3]=P[2]-P_carga*P[2]/100.0 "Presión a la entrada de la turbina"

eta_cc=Q_ap/(F*Hf) "Rendimiento de la cámara de combustión"

hs[4]=enthalpy(AIR,P=P[4],s=s[3])

h[4]=h[3]-(h[3]-hs[4])*eta_iso_tur

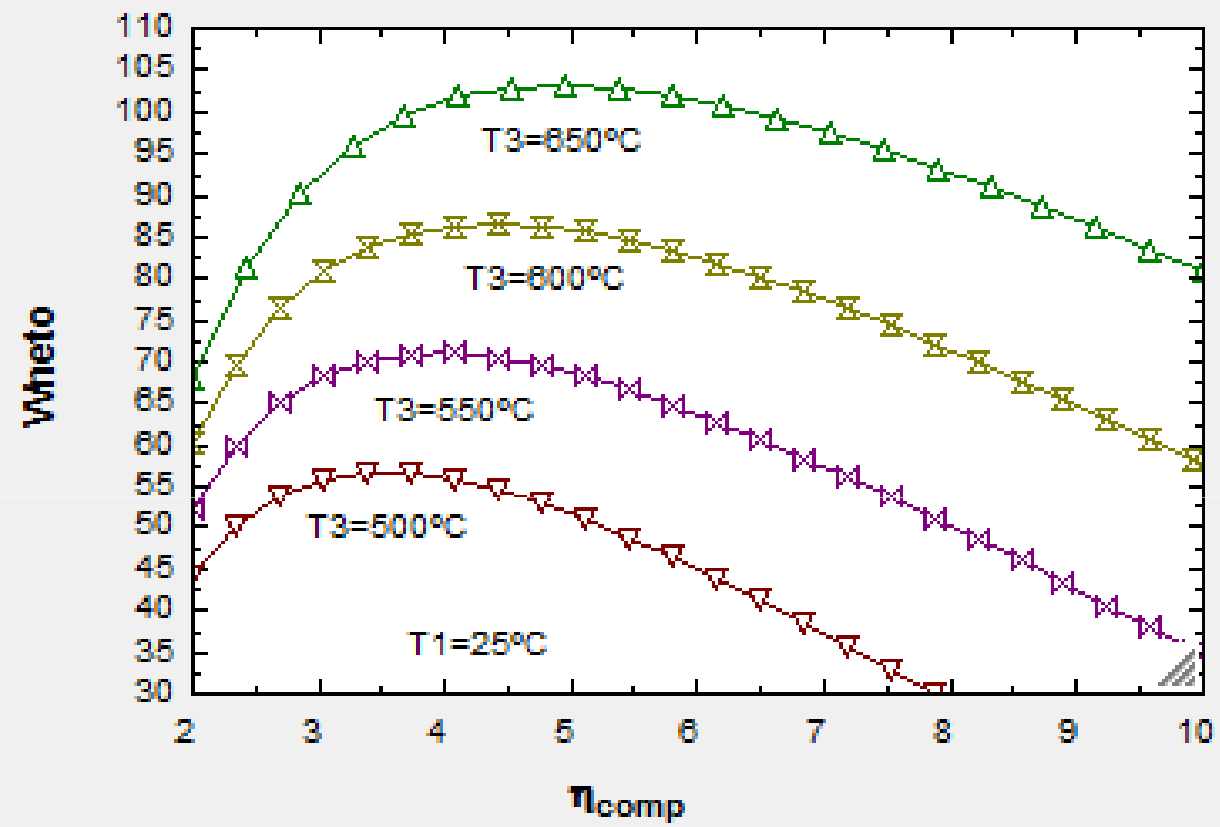
P[4]=P[1]

Q_ap=(1+F)*h[3]-h[2] "Calor aportado"

Wtur=(h[3]-h[4]) "Trabajo de la turbina"

Wneto=Wtur+Wcom "Trabajo neto"

eta_thermal=Wneto/Q_ap "Eficiencia térmica"



EES Commercial: C:\Users\jzueco\Desktop\DOCENCIA\Polimedia\Brayton2.EES - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Introduction to EES

Table 1

	1	2	3	4	5	6	7	8
	h_2 [kJ/kg]	η_{thermal}	W_{neto} [kJ/kg]	T_3 [°C]	T_1 [°C]	m_a	Q_{ap}	η_{comp}
Run 1	375.7	0.1133	68.13	650	25	39.91	601.3	2
Run 2	391.9	0.1326	77.51	650	25	41.05	584.7	2.276
Run 3	406.7	0.1486	84.59	650	25	42.15	569.4	2.552
Run 4	420.4	0.162	89.98	650	25	43.22	555.3	2.828
Run 5	433.1	0.1735	94.06	650	25	44.27	542.1	3.103
Run 6	445.1	0.1834	97.14	650	25	45.3	529.8	3.379
Run 7	456.4	0.1919	99.42	650	25	46.32	518.1	3.655
Run 8	467.1	0.1993	101	650	25	47.33	507.1	3.931
Run 9	477.3	0.2057	102.1	650	25	48.33	496.6	4.207
Run 10	487	0.2113	102.8	650	25			
Run 11	496.3	0.2162	103.1	650	25			
Run 12	505.2	0.2204	103.1	650	25			
Run 13	513.7	0.2241	102.9	650	25			
Run 14	522	0.2273	102.4	650	25			
Run 15	529.9	0.23	101.8	650	25			
Run 16	537.6	0.2324	100.9	650	25			
Run 17	545.1	0.2343	100	650	25			
Run 18	552.3	0.2359	98.91	650	25			
Run 19	559.3	0.2372	97.73	650	25			
Run 20	566.1	0.2382	96.47	650	25			
Run 21	572.8	0.2389	95.12	650	25	60.27	398.2	7.517
Run 22	579.2	0.2393	93.71	650	25	61.3	391.5	7.793
Run 23	585.5	0.2395	92.24	650	25	62.33	385.1	8.069
Run 24	591.6	0.2395	90.71	650	25	63.37	378.7	8.345
Run 25	597.6	0.2393	89.14	650	25	64.42	372.6	8.621
Run 26	603.5	0.2388	87.53	650	25	65.48	366.5	8.897
Run 27	609.2	0.2382	85.88	650	25	66.55	360.6	9.172

Calculations Completed

25 equations in 14 blocks - 16 iterations

Elapsed time = 0 sec

$W_{\text{neto}} = 103.2$

Continue

Independent Variable	Value	Best value
eta_comp	4.899	4.899

EES Commercial: C:\Users\jzueco\Desktop\DOCENCIA\Polimedia\Brayton2.EES - [Diagram Window]

File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Introduction to EES

Main

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

Maximization of $W_{\text{neto}}(\eta_{\text{comp}})$ 16 iterations: Quadratic Approximations method

$\eta_{\text{cc}} = 0.8$ [-]

$m_a = 50.81$

$\eta_{\text{comp}} = 4.899$ [-]

$m_f = 0.75$

$\eta_{\text{iso,comp}} = 0.85$

$P_{\text{carga}} = 3$

$\eta_{\text{iso,tur}} = 0.9$

$Q_{\text{ap}} = 472.3$ [-]

$\eta_{\text{thermal}} = 0.2184$ [kJ/kg]

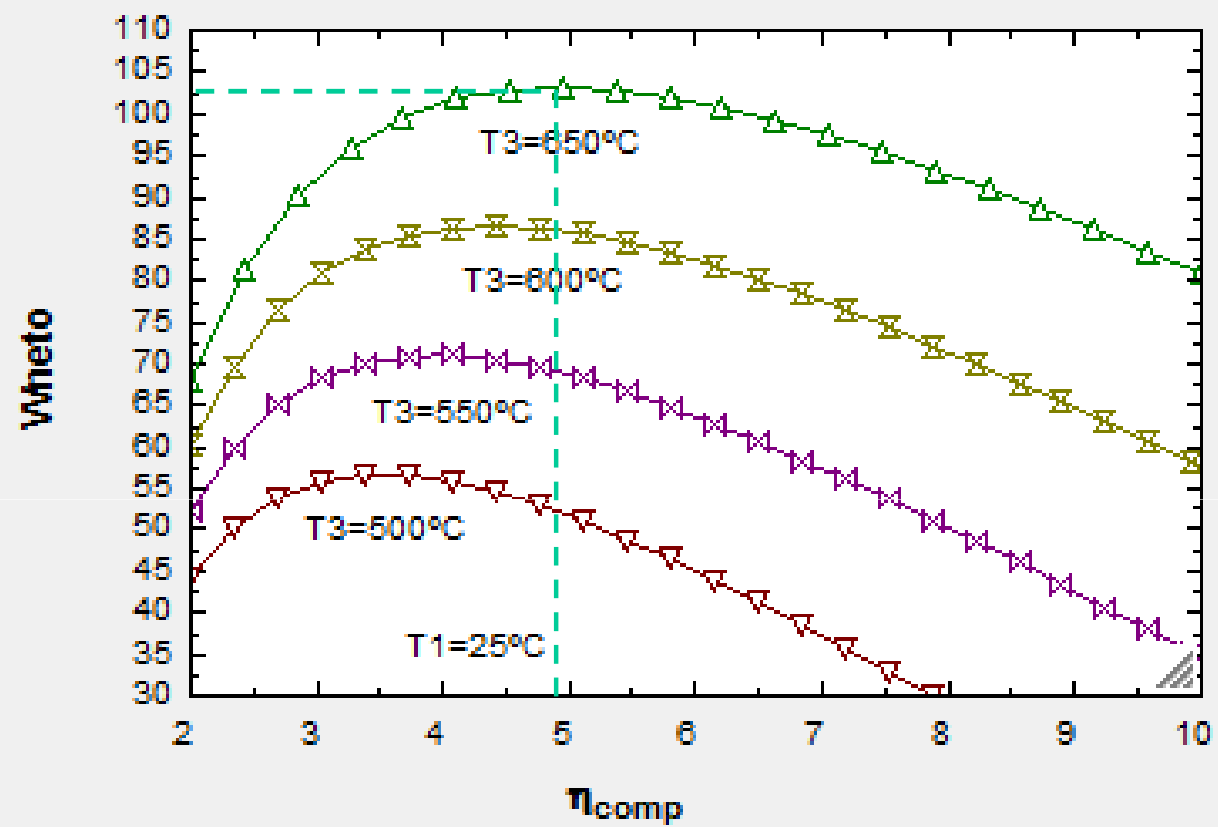
$W_{\text{com}} = -202.3$ [-]

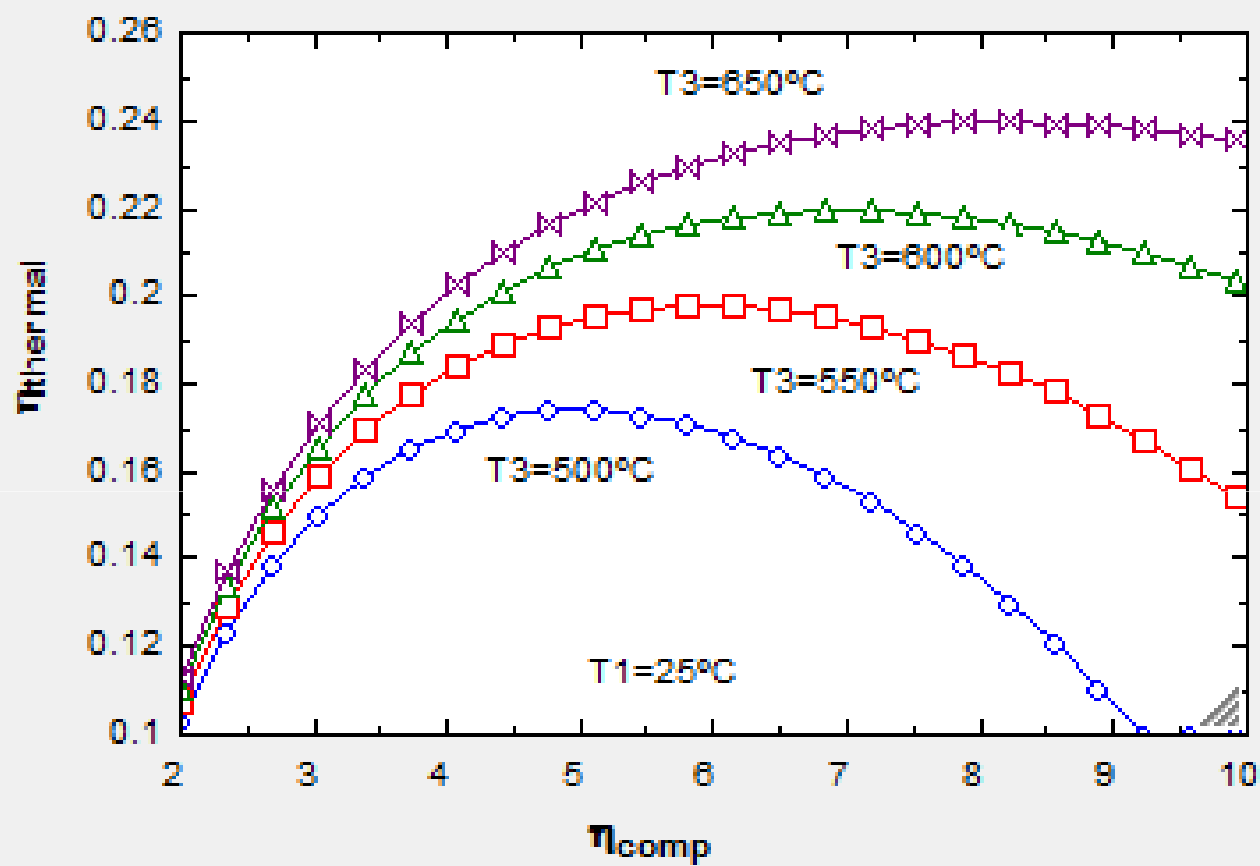
$F = 0.01476$ [-]

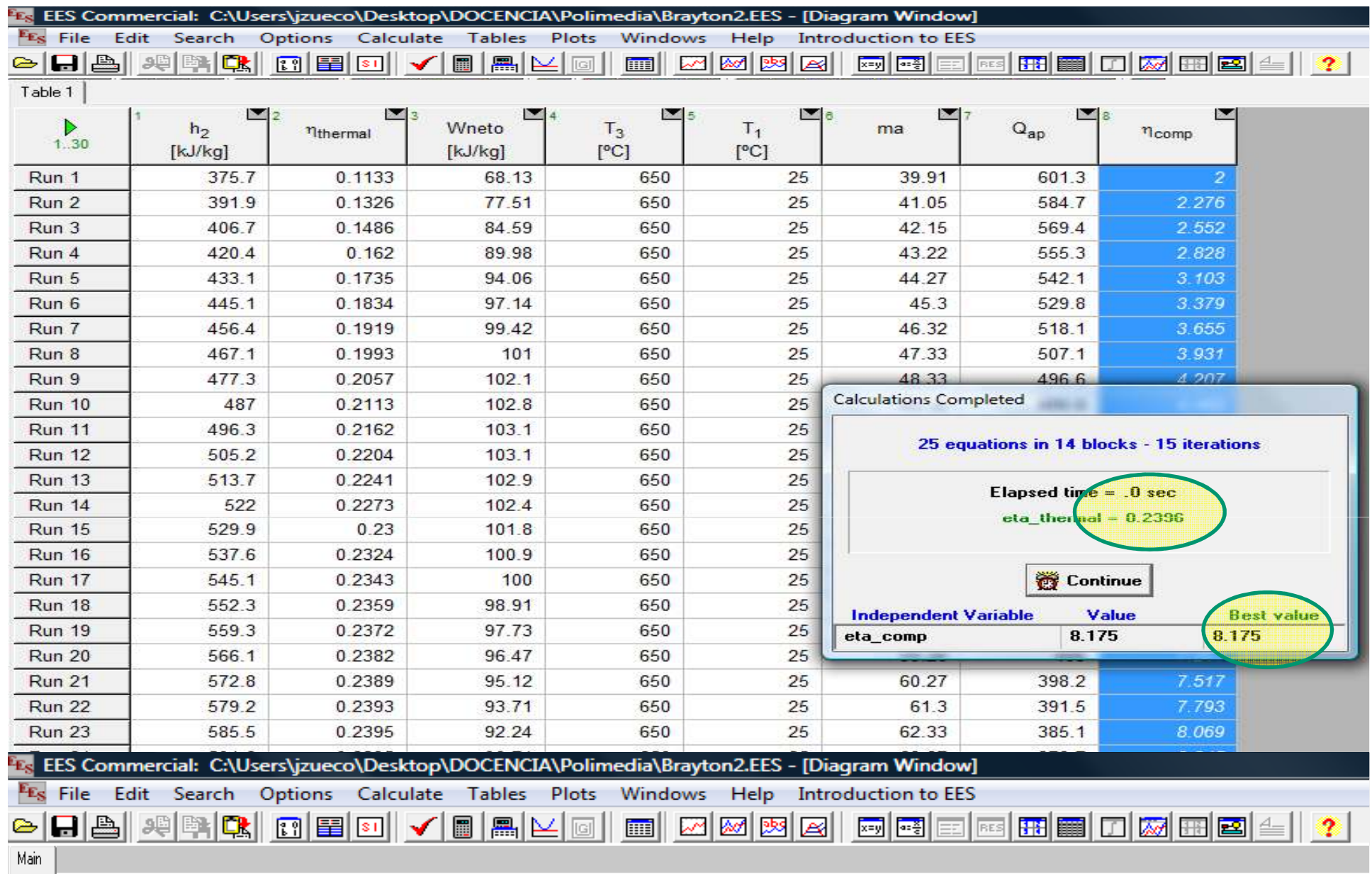
$W_{\text{neto}} = 103.2$ [kJ/kg]

$H_f = 40000$

$W_{\text{tur}} = 305.5$ [-]



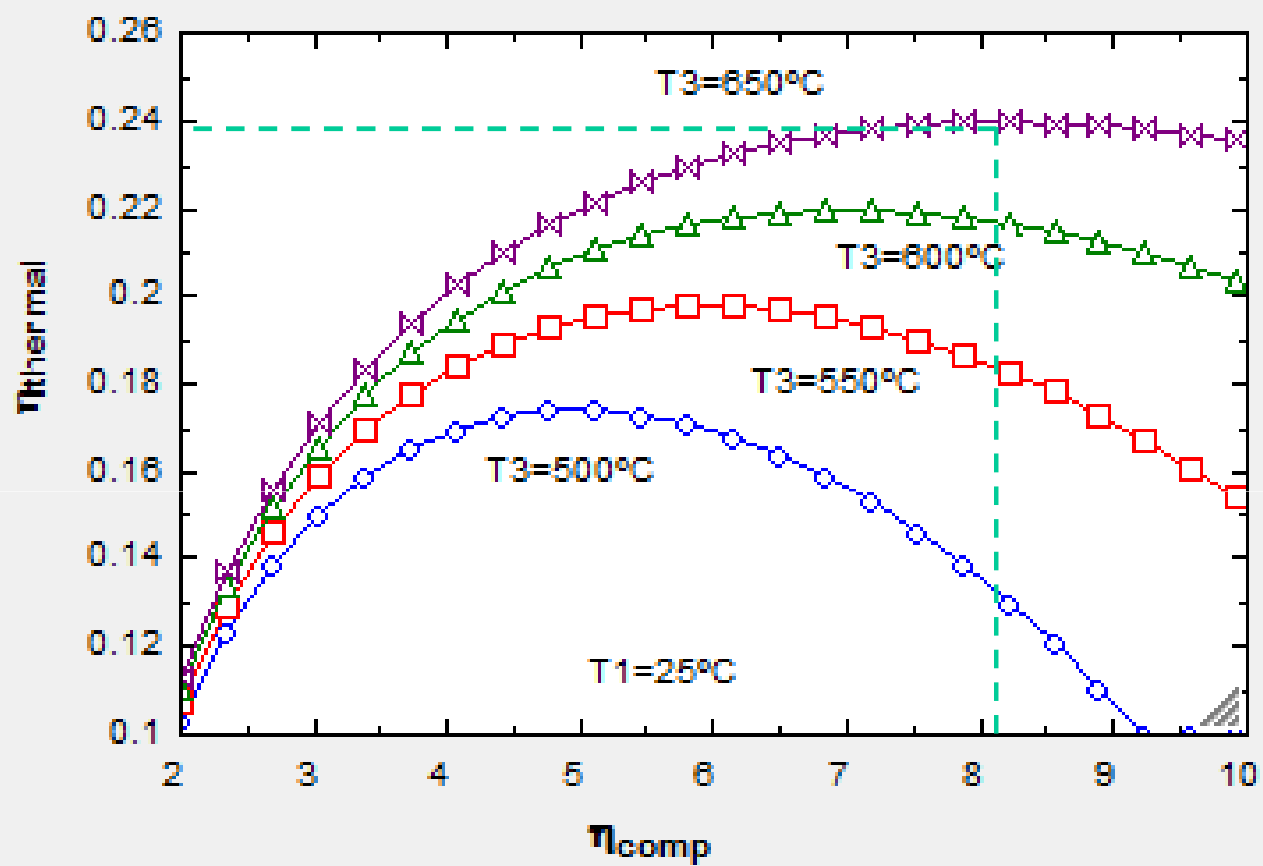


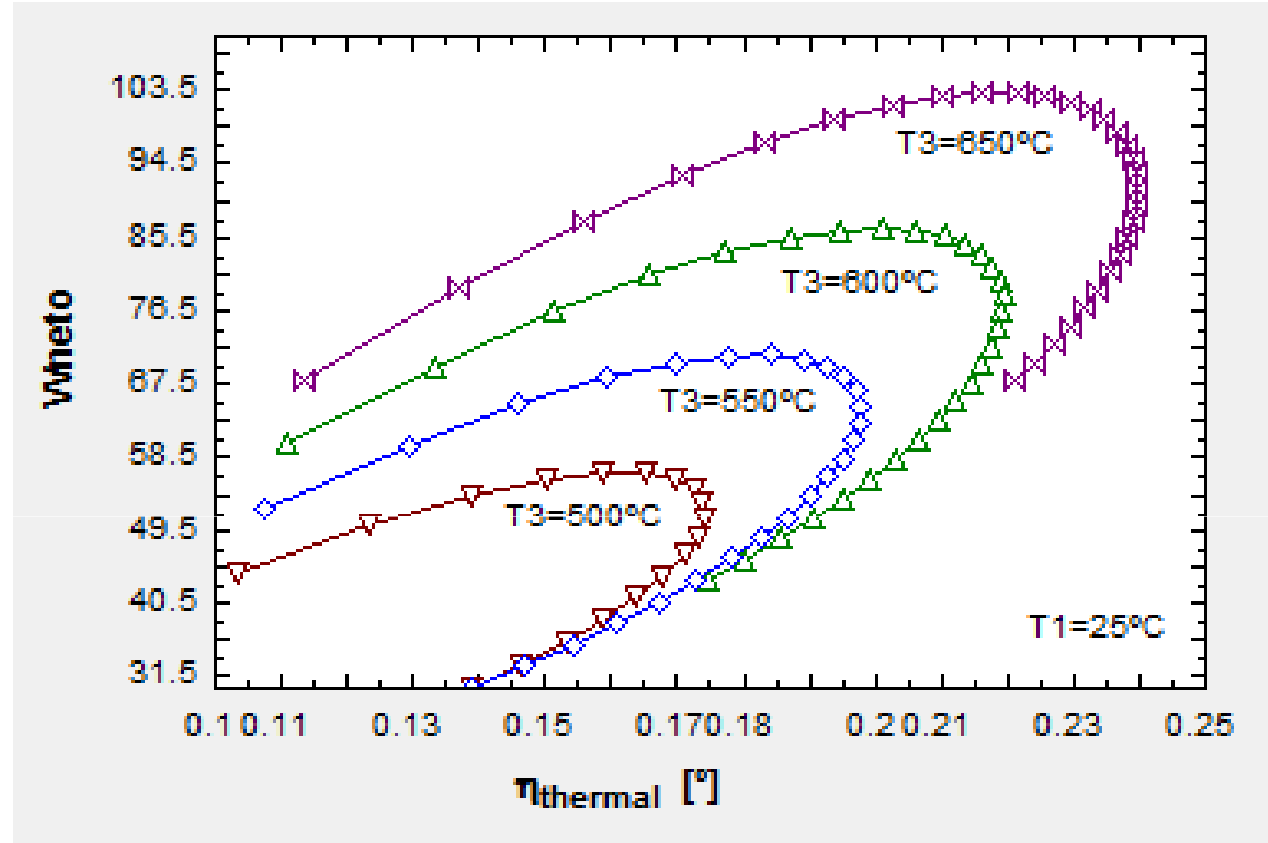


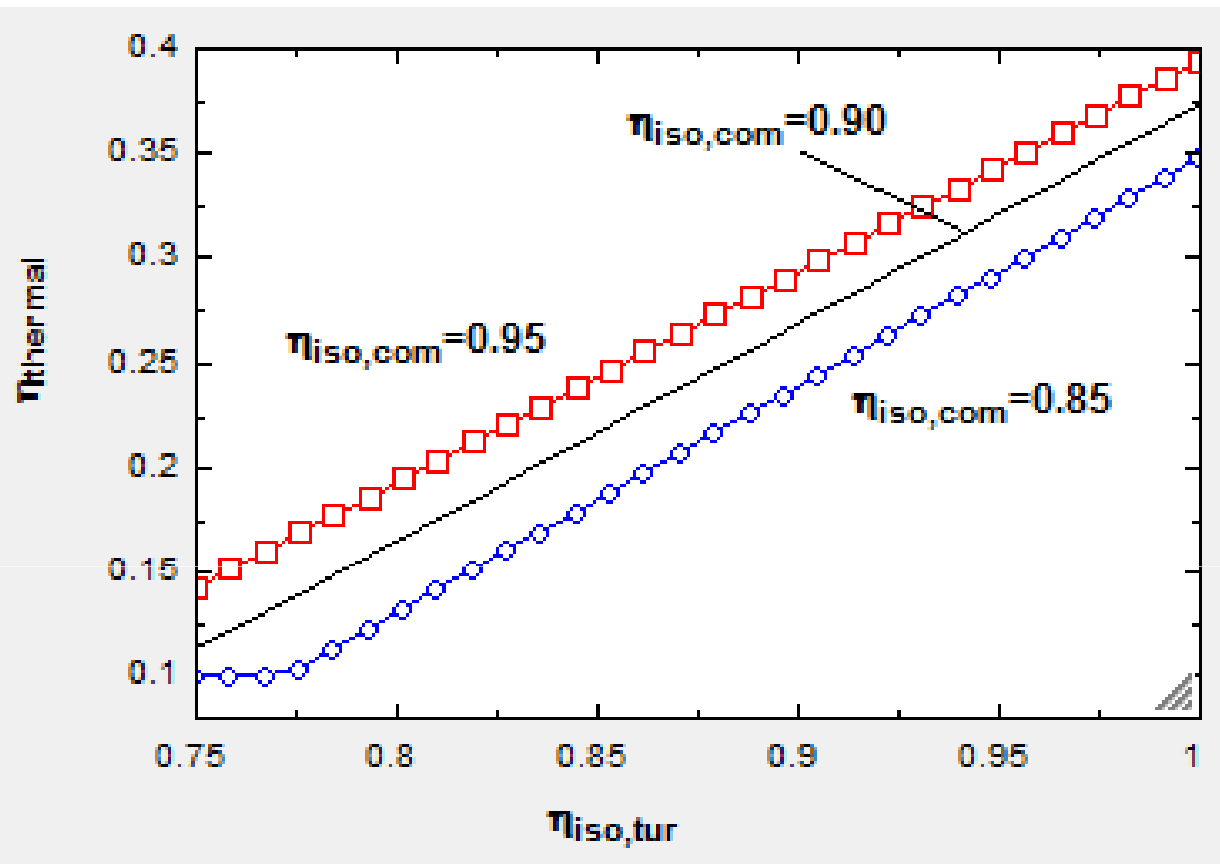
Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

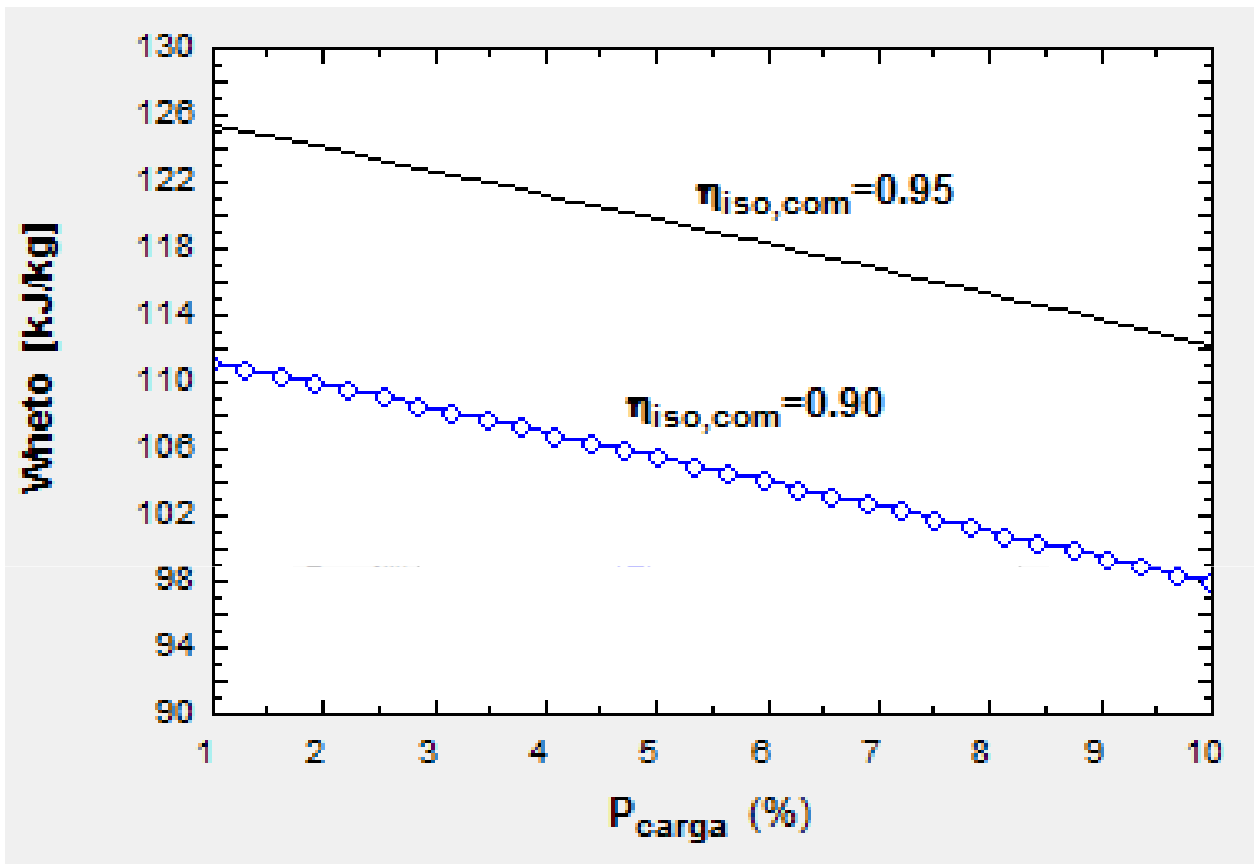
Maximization of eta_thermal(eta_comp) 15 iterations: Quadratic Approximations method

$\eta_{\text{cc}} = 0.8$ $\eta_{\text{comp}} = 8.175$ $\eta_{\text{iso,comp}} = 0.85$ $\eta_{\text{iso,tur}} = 0.9$ $\eta_{\text{thermal}} = 0.2396$ $F = 0.01196$ $H_f = 40000$ $ma = 62.73$
 $mf = 0.75$ $P_{\text{carga}} = 3$ $Q_{\text{ap}} = 382.6$ $W_{\text{com}} = -289.3$ $W_{\text{neto}} = 91.66$ [kJ/kg] $W_{\text{tur}} = 381$









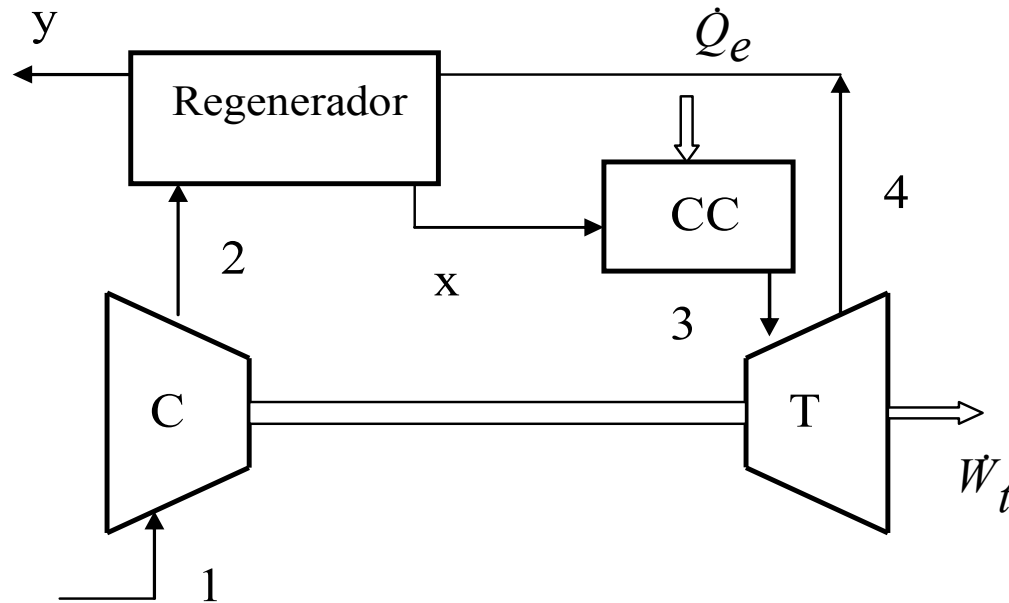
Problema a resolver:

- Grupos de dos alumnos

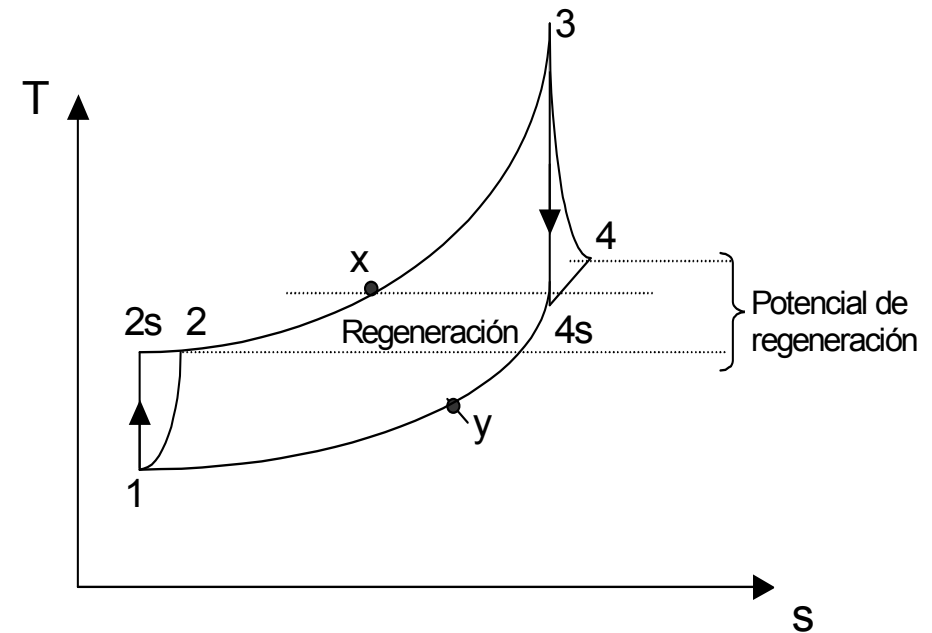
- Elegir uno de los siguientes problemas:

- . Turbina de gas regenerativa
- . Turbina de gas con recalentamiento
- . Turbina de gas con refrigeración en la compresión
- . Turbina de gas regenerativa con recalentamiento
- . Turbina de gas regenerativa, con refrigeración en la compresión y recalentamiento intermedio

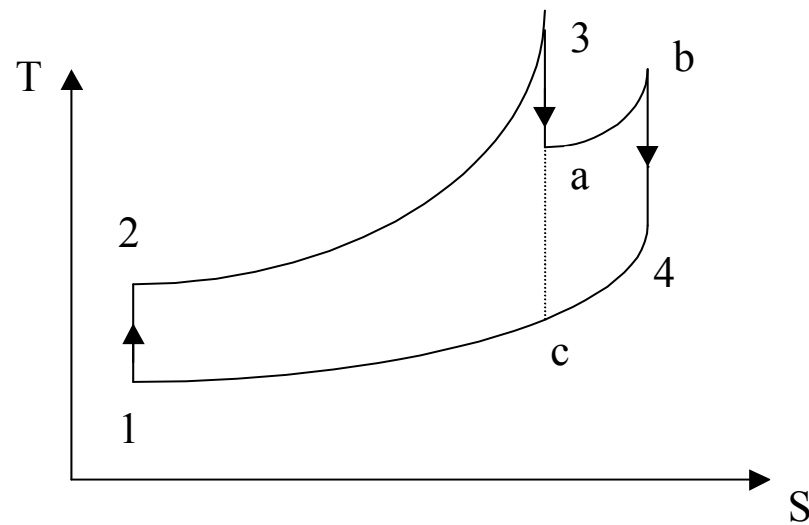
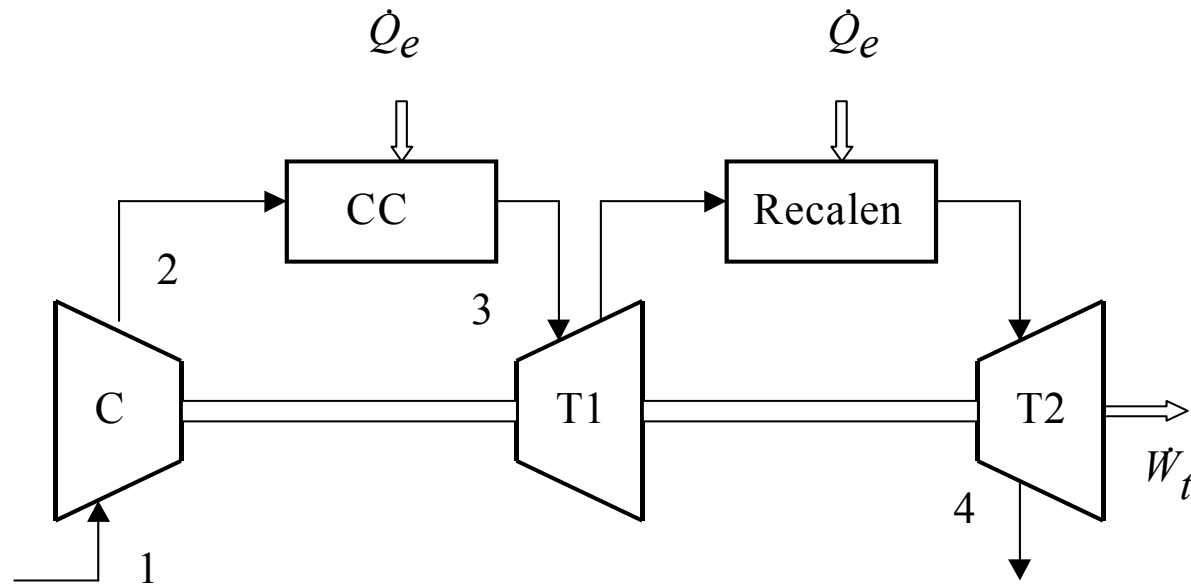
Esquema de la instalación regenerativa



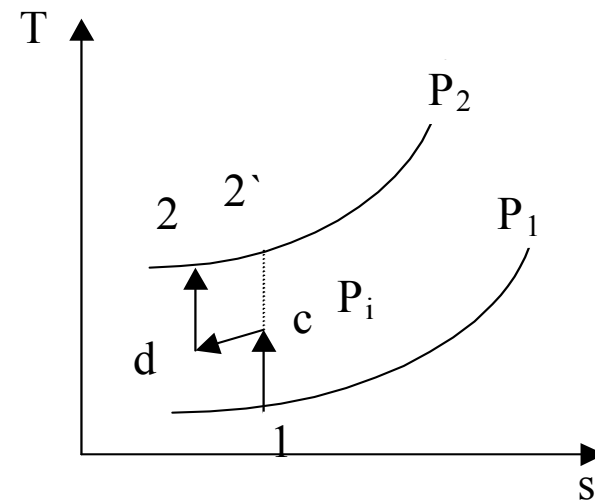
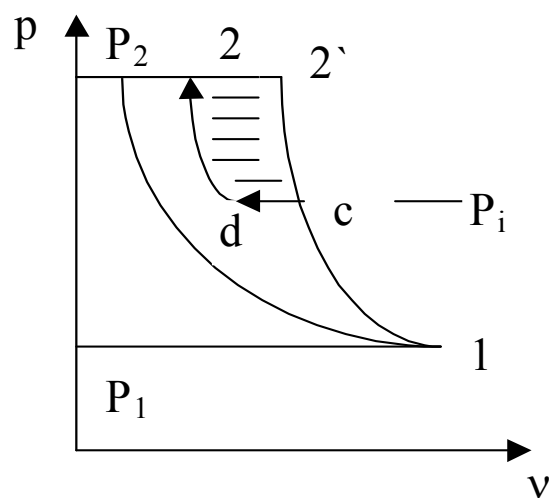
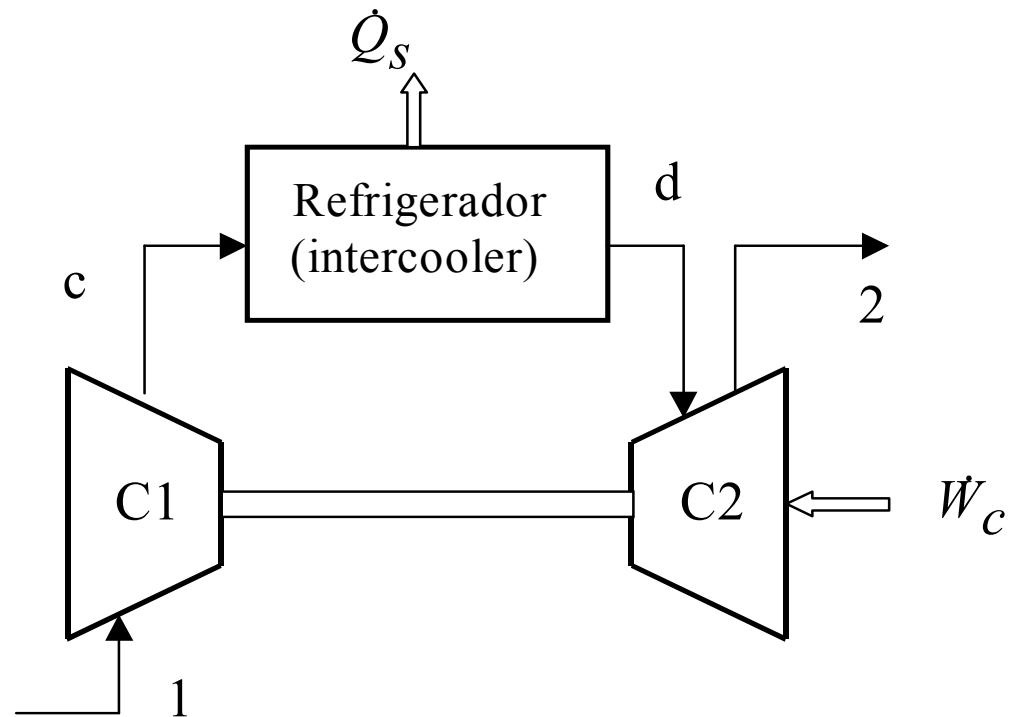
$$\eta_{\text{reg}} = \frac{h_x - h_2}{h_4 - h_2}$$



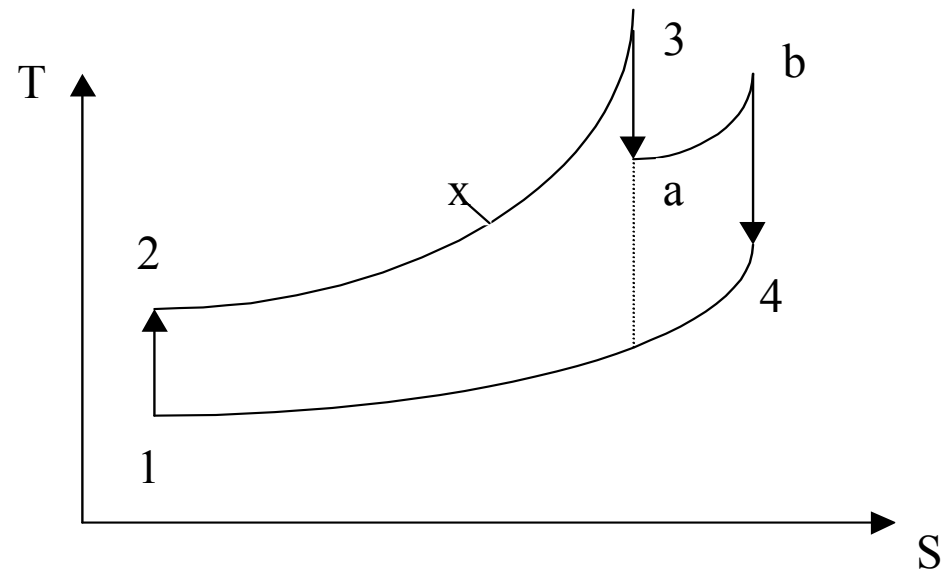
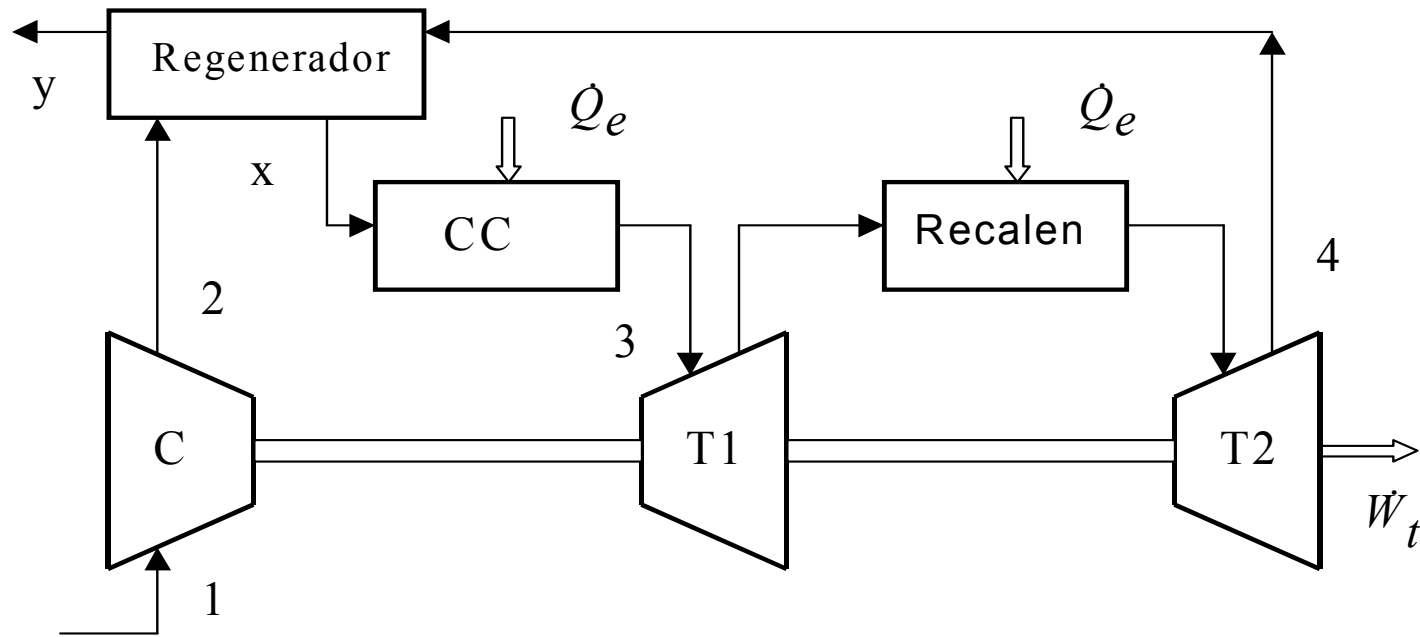
Turbina de gas con recalentamiento



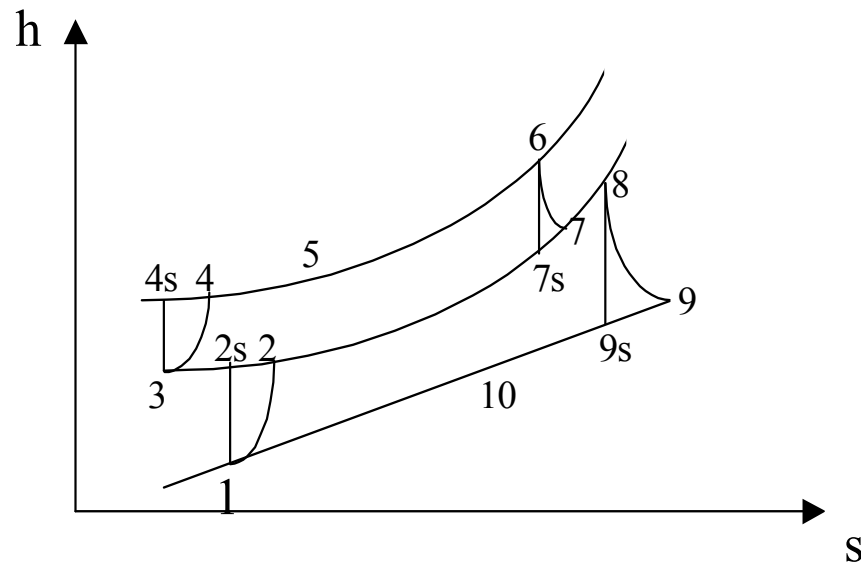
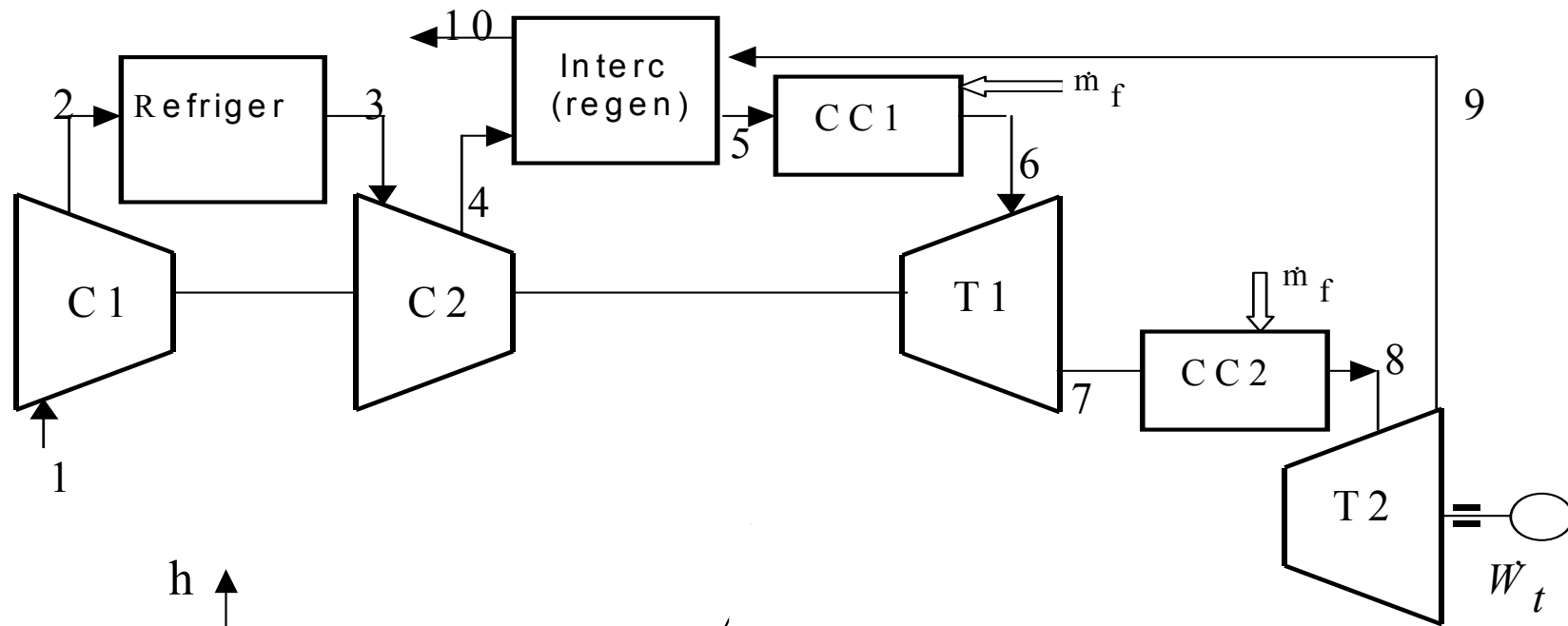
Turbina de gas con refrigeración en la compresión



Turbina de gas regenerativa con recalentamiento



Turbina de gas regenerativa, con refrigeración en la compresión y recalentamiento intermedio



Psicrometría

PROBLEMA 2

Ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo

Aire húmedo	=	Aire seco $R_a = 0,287 \text{ kJ/kgK}$	+	Vapor de agua $R_v = 0,4615 \text{ kJ/kgK}$
-------------	---	---	---	--

$$P = P_a + P_v$$

$$P_a V = m_a R_a T$$

$$P_v V = m_v R_v T$$

n_a, m_a : aire seco

n_v, m_v : vapor de agua

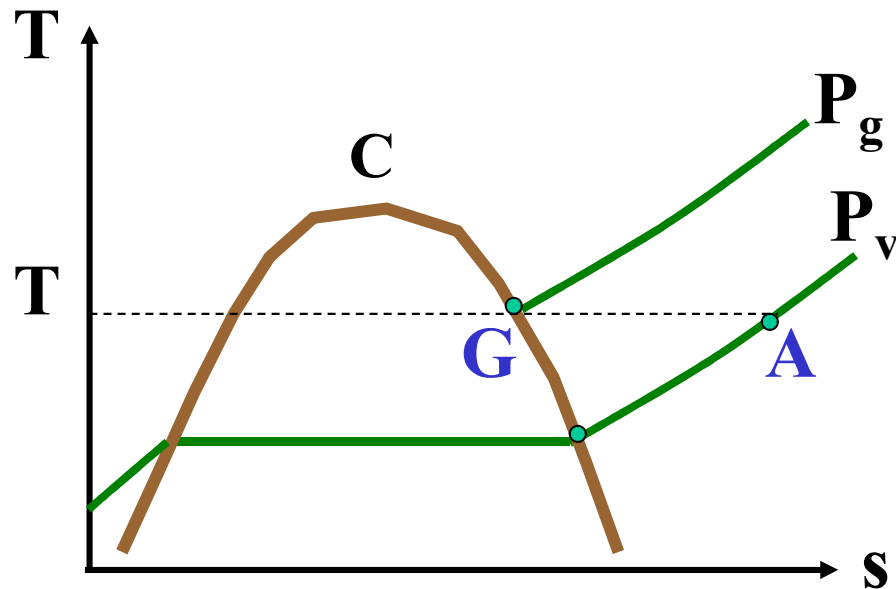
n, m : mezcla

P, T, V

Parámetros característicos

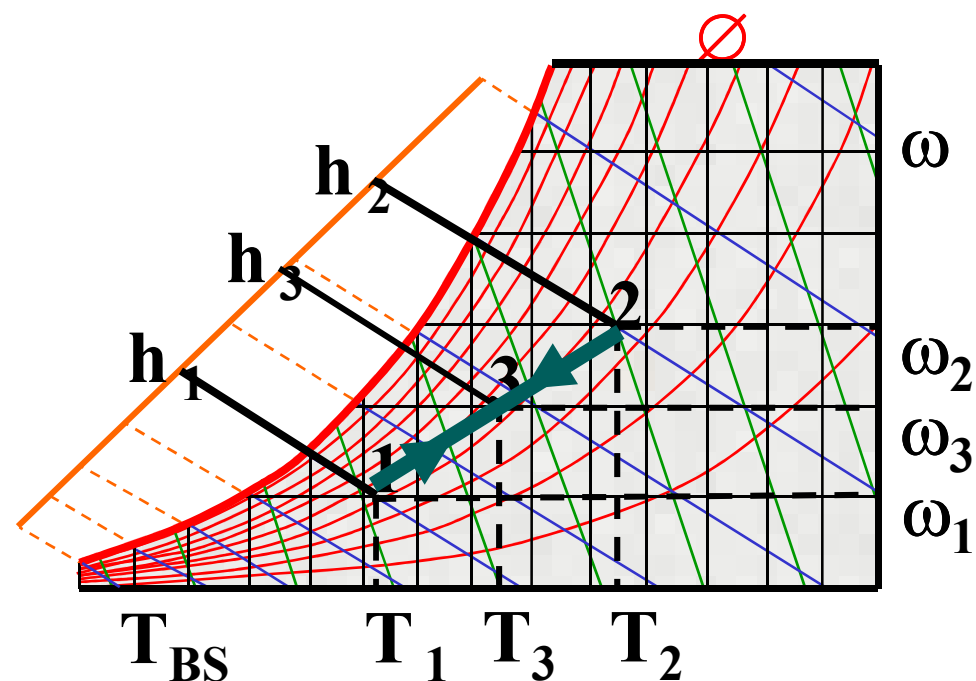
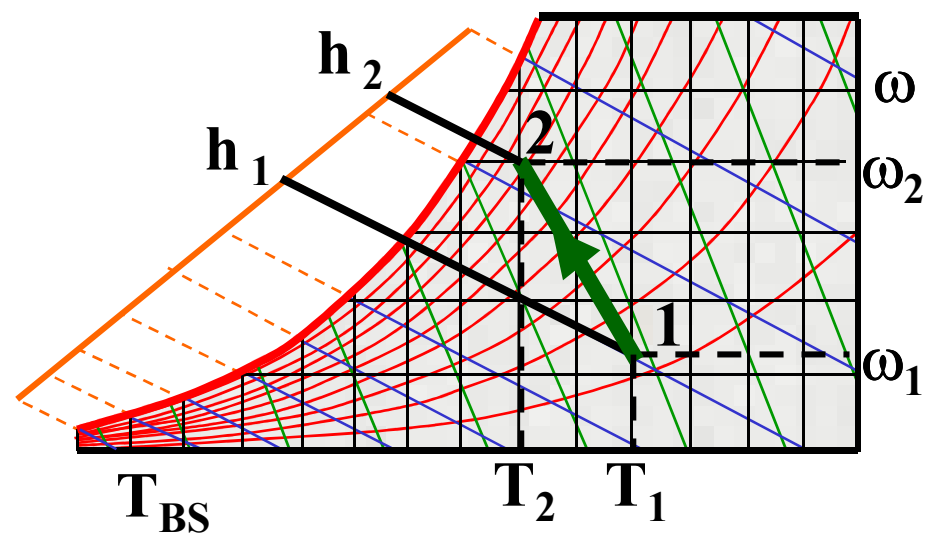
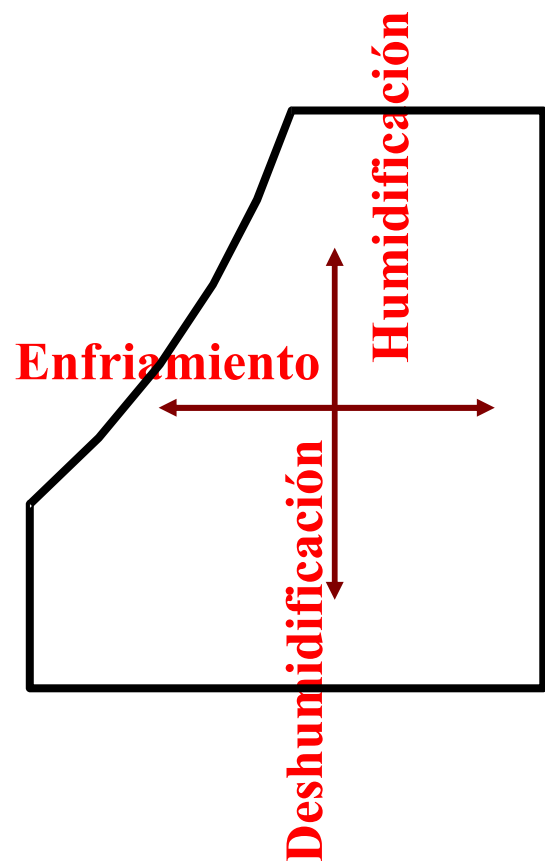
Humedad específica $\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad \frac{\text{kg v.}}{\text{kg a.}} \quad \omega = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v}$

Humedad relativa $\phi = \frac{y_v}{y_{v,\text{sat}}} \bigg|_{P,T} = \frac{P_v}{P_g} \bigg|_{P,T}$ **Aire saturado 100 %**
Aire seco 0 %



$$P_v = y_v P \quad P_g = y_{v,\text{sat}} P$$

Procesos de acondicionamiento de aire



Torres de refrigeración

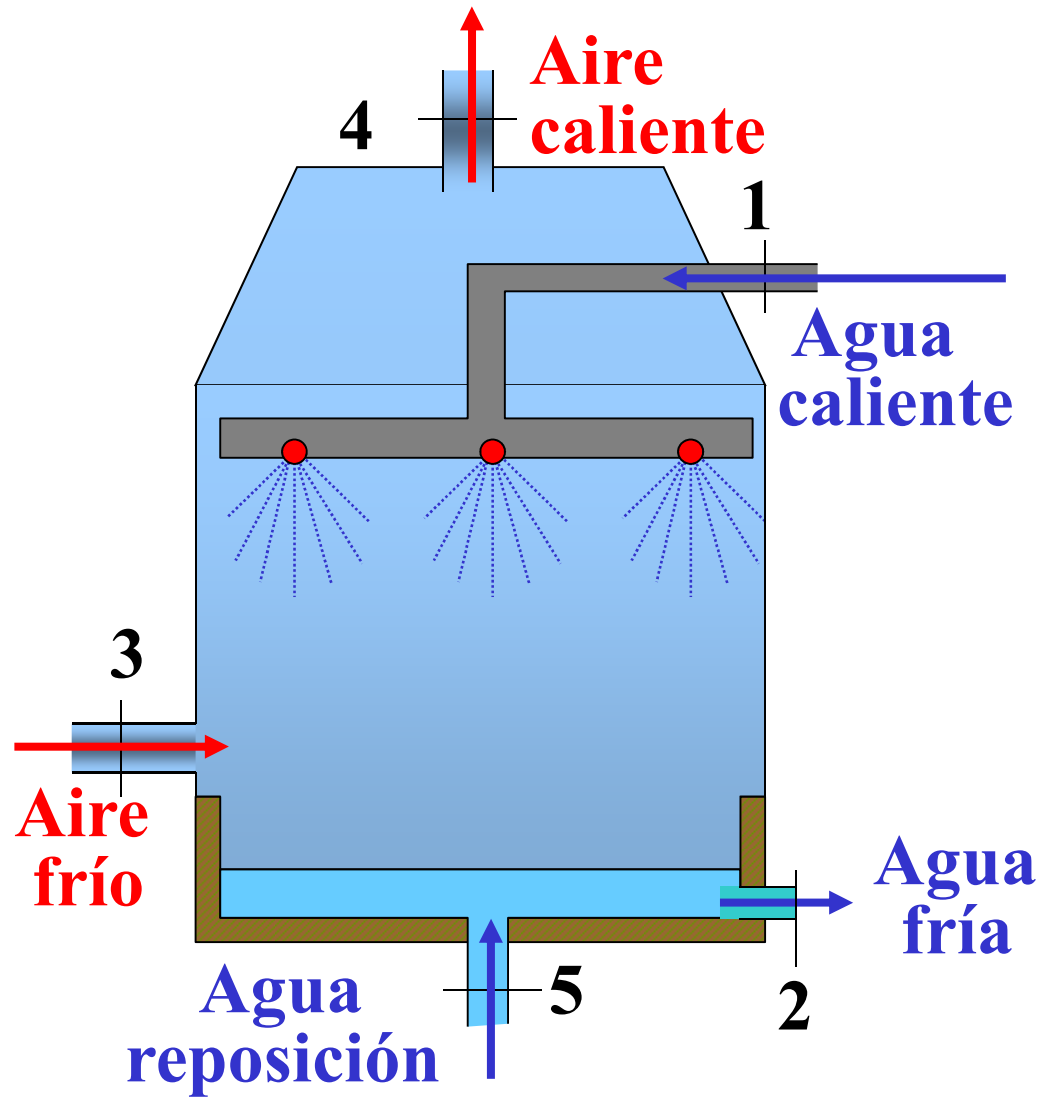


Fuente: <http://es.dreamstime.com>



Fuente: Wikipedia

Torre de refrigeración



Balances de masa

Aire seco

$$\sum \dot{m}_{a,e} = \sum \dot{m}_{a,s}$$

$$\dot{m}_{a3} = \dot{m}_{a4}$$

Vapor de agua

$$\sum \dot{m}_{v,e} = \sum \dot{m}_{v,s}$$

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_{w5} + \dot{m}_{v3} = \dot{m}_{w2} + \dot{m}_{v4}$$

$$(\dot{m}_{w1} = \dot{m}_{w2})$$

Balance de materia

$$\dot{m}_a (\omega_4 - \omega_3) = \dot{m}_{w5}$$

Procesos de acondicionamiento de aire

Balance de energía

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e \quad \rightarrow \quad \sum \dot{m}_s h_s = \sum \dot{m}_e h_e$$

$$\dot{m}_a h_4 + \dot{m}_{w2} h_{f2} = \dot{m}_{w5} h_{f5} + \dot{m}_{w1} h_{f1} + \dot{m}_a h_3$$

$$h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{v3}$$

$$h_4 = h_{a4} + \omega_4 h_{v4}$$

Dividiendo por caudal másico de aire

$$h_4 + \dot{m}_{w2}/\dot{m}_a h_{f2} = (\omega_4 - \omega_3) h_{f5} + \dot{m}_{w1}/\dot{m}_a h_{f1} + h_3$$

Balance de entropía

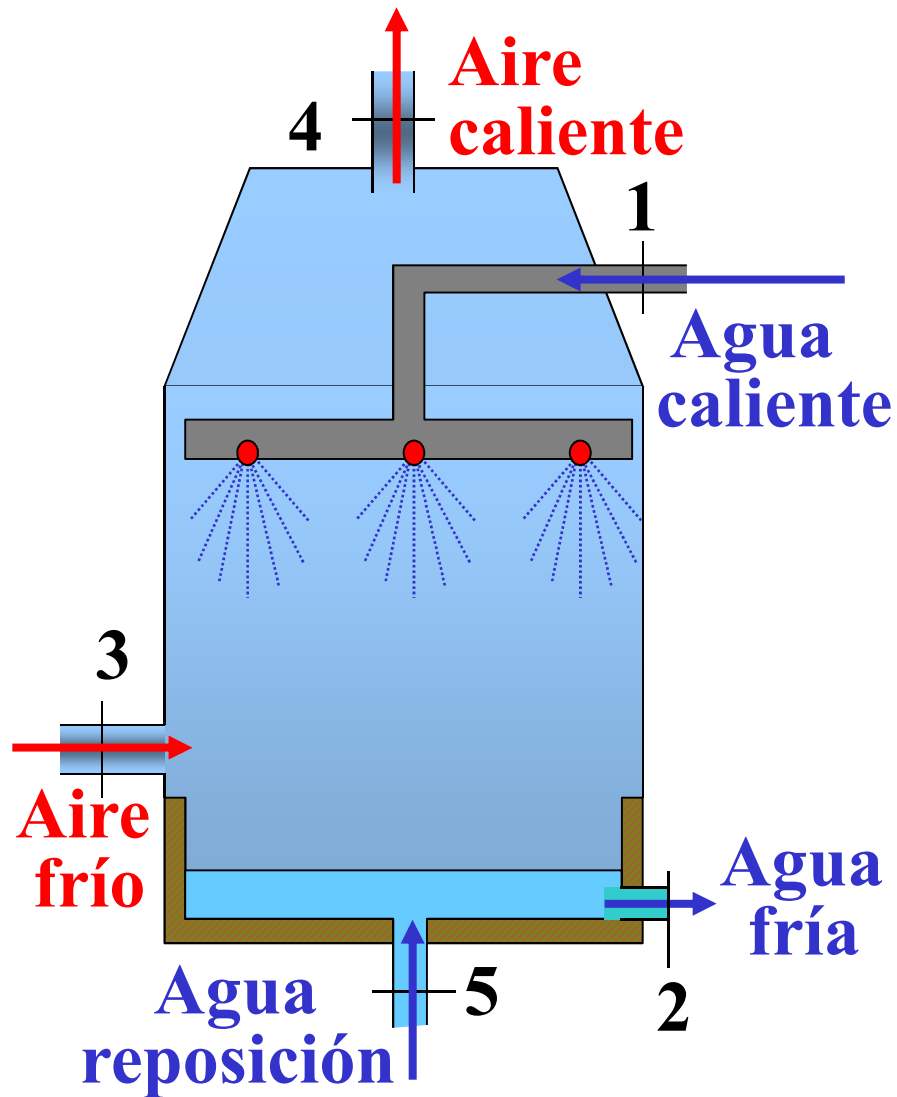
$$\dot{S}_g = \sum_s \dot{m} s - \sum_e \dot{m} s - \sum \frac{Q_i}{T_i} + \left(\frac{dS}{dt} \right) \geq 0$$

$$\dot{S}_g = \dot{m}_a s_4 + \dot{m}_{w2} s_2 - \dot{m}_a s_3 - \dot{m}_{w1} s_1 - \dot{m}_{w5} s_5$$

Rendimiento exergético

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_w (e_{x1} - e_{x2})}{\dot{m}_a (e_{x3} - e_{x4})}$$

$$e_x = h - T_0 s$$



Torres de refrigeración

Balance de materia

$$\dot{m}_a (\omega_4 - \omega_3) = \dot{m}_5$$

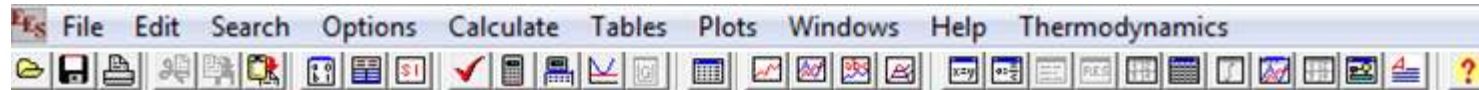
Eficiencia exergética

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_w (e_{x1} - e_{x2})}{\dot{m}_a (e_{x3} - e_{x4})}$$

$$\begin{cases} h_3 = h_{a3} + \omega_3 h_{v3} \\ h_4 = h_{a4} + \omega_4 h_{v4} \end{cases}$$

Balance de energía

$$h_4 + \dot{m}_2 / \dot{m}_a h_{f2} = (\omega_4 - \omega_3) h_{f5} + \dot{m}_2 / \dot{m}_a h_{f1} + h_3$$



$S5 = \text{entropy}(\text{water}, T = T5, x = 0)$ "Reposition water entropy"

$Ex1 = h1 - T_o * S1$ "Entrance water exergy"

$Ex2 = h2 - T_o * S2$ "Out water exergy"

"Wet air"

$Psat3 = \text{pressure}(\text{water}, T = T3, x = 0) / 100$

$Hesp3 = 0.622 * Pv3 / (P1 - Pv3)$ "Entrance air specific humidity"

$Pv3 = HR3 * Psat3$

$Psat4 = \text{pressure}(\text{water}, T = T4, x = 0) / 100$

$Hesp4 = 0.622 * Pv4 / (P1 - Pv4)$ "Out air specific humidity"

$Pv4 = HR4 * Psat4$

$h3 = \text{enthalpy}(\text{air}, T = T3)$ "Entrance air enthalpy"

$h4 = \text{enthalpy}(\text{air}, T = T4)$ "Out air enthalpy"

|

$S3 = \text{entropy}(\text{air}, T = T3, P = P1 - Pv3)$ "Entrance air entropy"

$S4 = \text{entropy}(\text{air}, T = T4, P = P1 - Pv4)$ "Out air entropy"

$Ex3 = h3 - T_o * S3$ "Entrance air exergy"

$Ex4 = h4 - T_o * S4$ "Out air exergy"

"Vapour"

$h3w = \text{enthalpy}(\text{water}, T = T3, x = 1)$ "Entrance vapour enthalpy"

$h4w = \text{enthalpy}(\text{water}, T = T4, x = 1)$ "Out vapour enthalpy"

$S3w = \text{entropy}(\text{water}, T = T3, P = Pv3)$ "Entrance vapour entropy"

$S4w = \text{entropy}(\text{water}, T = T4, P = Pv4)$ "Out vapor entropy"

$Ex3w = h3w - T_o * S3w$ "Entrance vapour exergy"

$Ex4w = h4w - T_o * S4w$ "Out vapour exergy"

"Energy balance"

$ma * (h3 + Hesp3 * h3w) + mw1 * h1 + mwrep * h5 = ma * (h4 + Hesp4 * h4w) + mw2 * h2$

$Qint = -ma * ((h3 + Hesp3 * h3w) - (h4 + Hesp4 * h4w)) / 60$

$mw2 = mw1$

"Flow reposition water"

$mwrep = ma * (Hesp4 - Hesp3)$

$T5 = T2$

"Entropy balance"

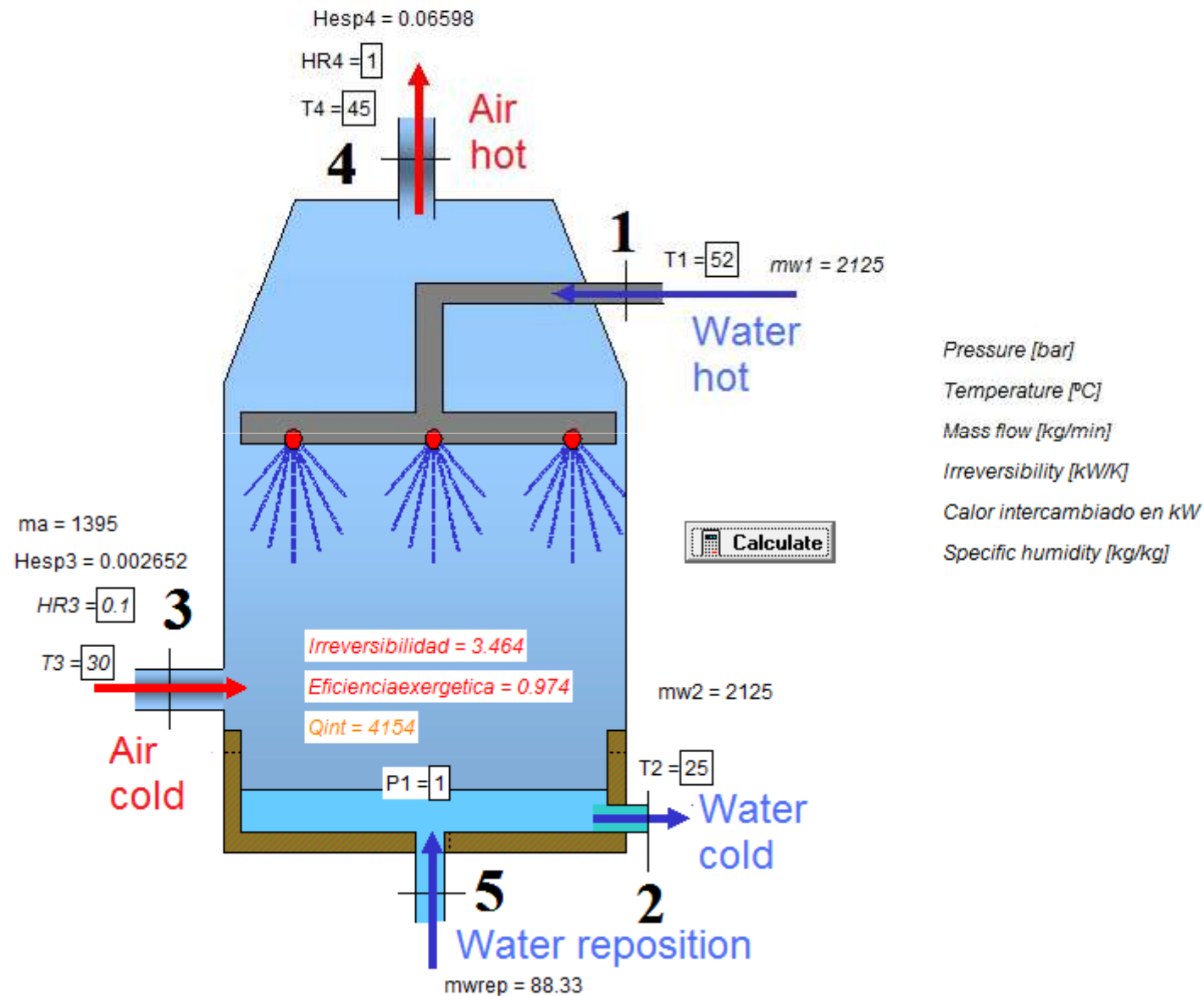
$\text{Irreversibilidad} * 60 + ma * (S3 + Hesp3 * S3w) + mw1 * S1 + mwrep * S5 = ma * (S4 + Hesp4 * S4w) + mw2 * S2$

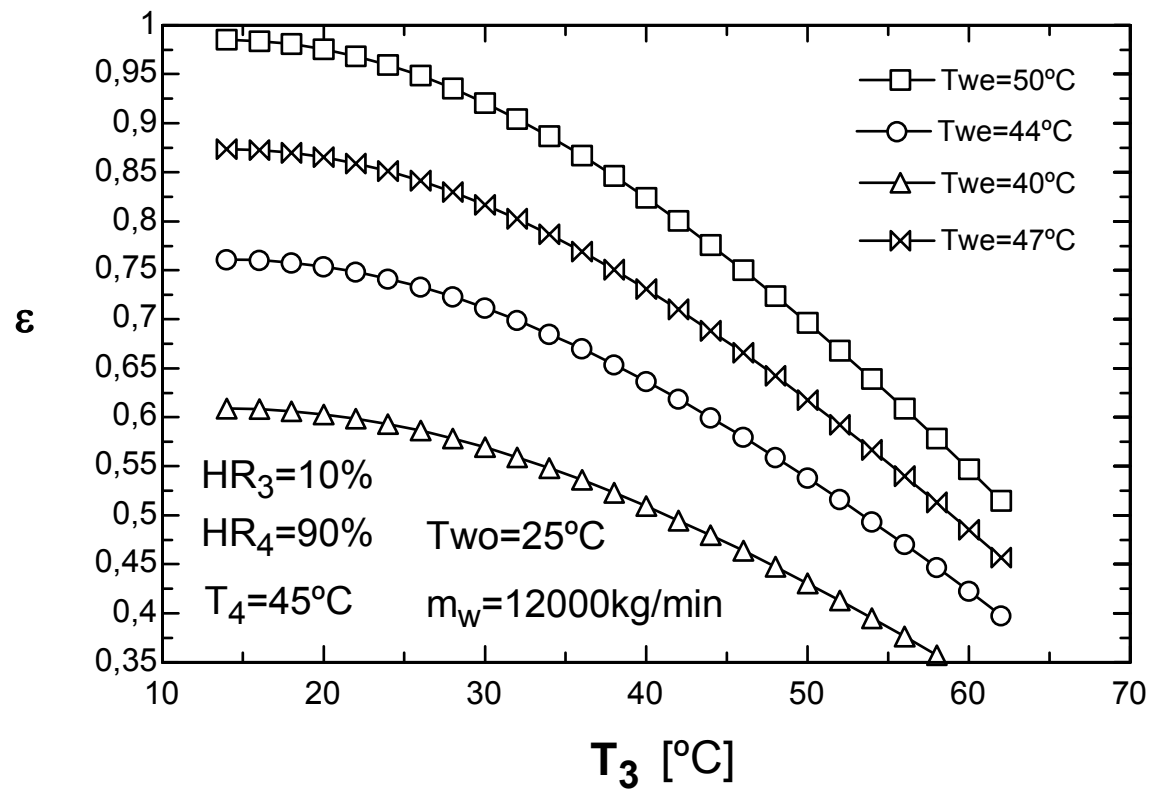
$T_o = 298$

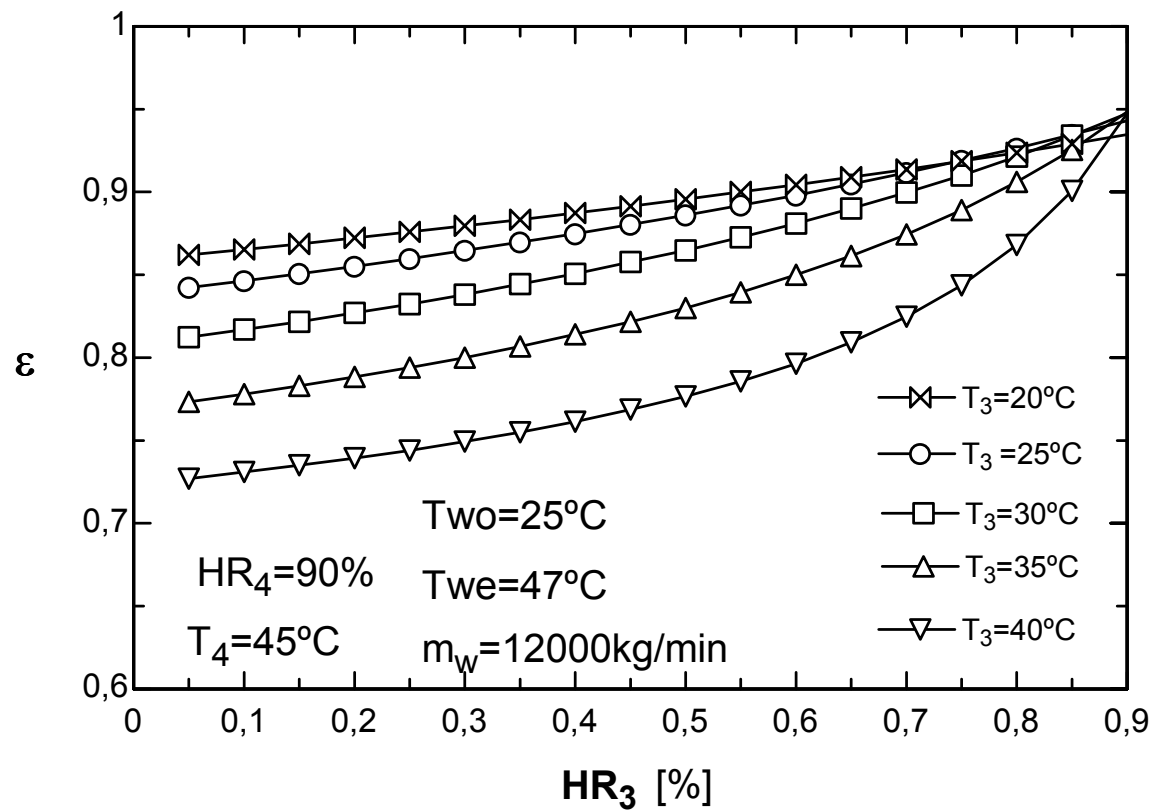
"Reference temperature"

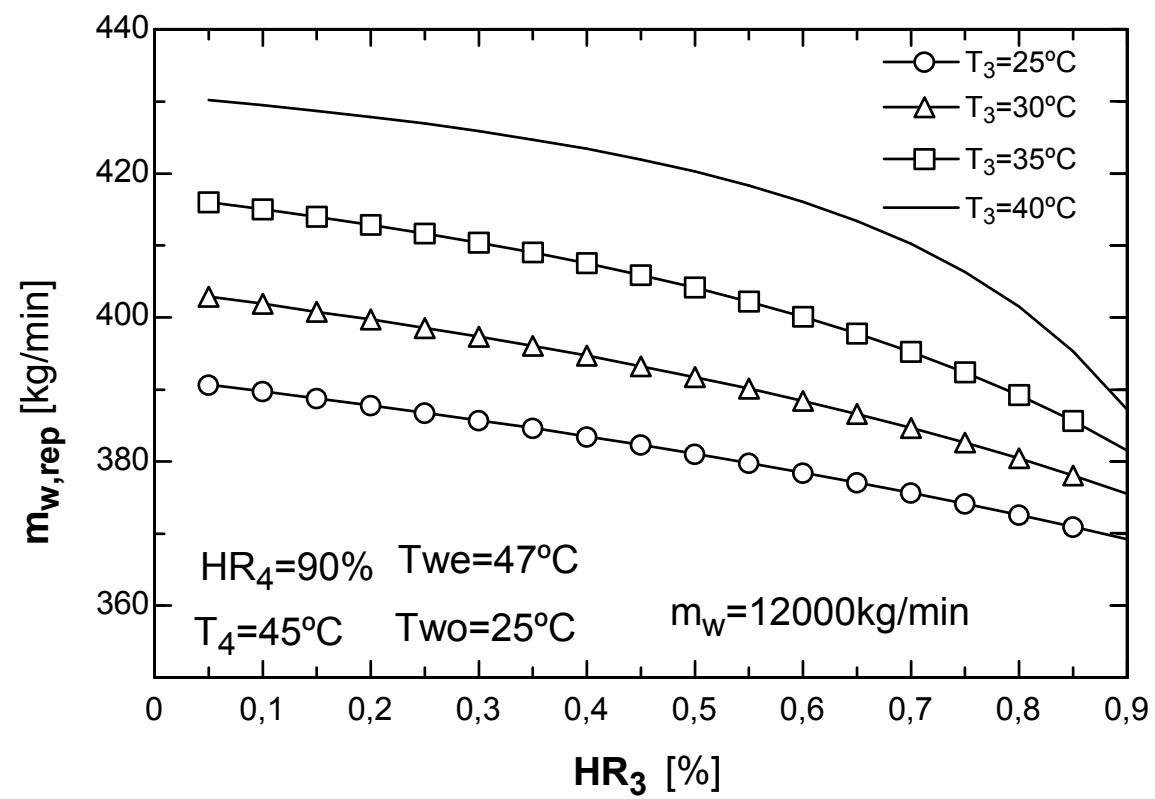
"Exergy-Efficiency"

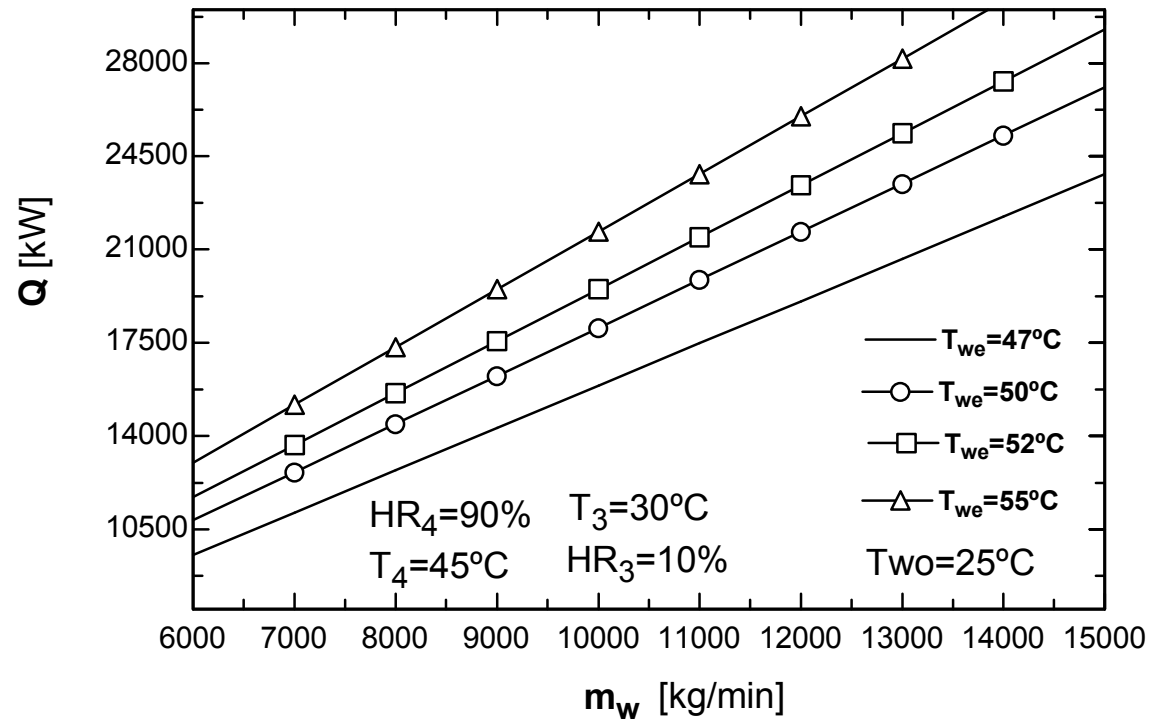
$\text{Eficienciaexergetica} = mw1 * (Ex1 - Ex2) / (ma * (Ex3 - Ex4))$











Problemas a resolver:

- Grupos de dos alumnos
- Elegir uno de los siguientes problemas:
 - . Análisis de sensibilidad
 - . Nuevos resultados
 - . Ect