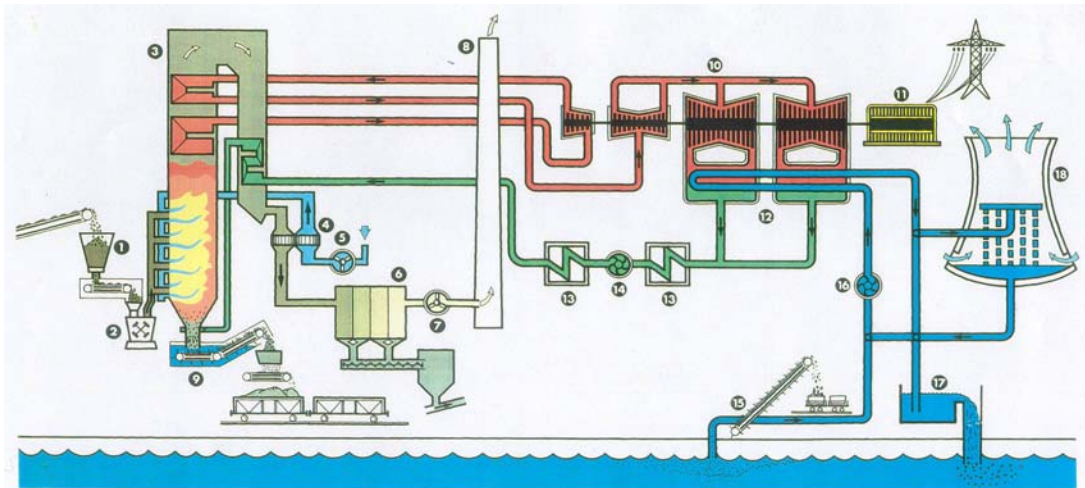


Modelización del ciclo de trabajo de una central térmica mediante el programa THERMOPTIM

Se trata de una central térmica en la que un grupo de turbinas de vapor accionan un alternador. Como combustible utiliza carbón (hulla). El ciclo termodinámico de referencia del proceso es el de Rankine-Hirn, con un recalentamiento intermedio.



La central consta en grandes bloques de una caldera, un grupo de turbinas acopladas a un generador eléctrico (alternador), condensadores y una torre de refrigeración.

De acuerdo con la numeración de la figura se tiene: 1 entrada del carbón que a través de una tolva y una cinta transportadora es conducido a un molino de martillos (2) que lo reduce a polvo. En 5 un ventilador aspira aire ambiente y lo impulsa hacia los quemadores, previamente pasa por un regenerador (4) en el que se precalienta a expensas del calor de los humos salientes de la caldera. El agua líquida, es recogida de los condensadores (12) y mediante una bomba (14) se comprime hasta la presión de caldera. Suele haber unos intercambiadores de calor (13) en los que el agua líquida se precalienta casi hasta su temperatura de ebullición a la presión de caldera, en esta caso el calentamiento se hace a expensas de vapor caliente que se extrae de las turbinas (circuito aquí no representado). El agua presurizada entra en la caldera donde primero alcanza la temperatura de ebullición en el llamado **economizador**, después hierve en el **vaporizador** y una vez ya en fase vapor se incrementa su temperatura en el **sobrecalentador** alcanzando las condiciones del llamado "vapor vivo". El vapor se expande primero en la turbina de alta presión y a su salida se reconduce a la caldera donde se vuelve a calentar en el **recalentador**. De ahí es nuevamente conducido a las turbinas, primero a las de media presión y a continuación hasta las de baja presión (10). En estas últimas turbinas el vapor se expansiona hasta la presión del condensador (12) en donde pasará al estado líquido. Para condensar el vapor es necesario enfriarlo, para ello se utiliza en este caso agua del río. El agua del río se bombea mediante la bomba (16), para evitar la entrada de elementos extraños previamente se filtra en (15), aprovechándose la circunstancia para limpiar una parte del caudal del río. El agua se calienta a expensas del calor de condensación del vapor, por lo que no es apta para ser vertida al río, debido a ello, para evitar la contaminación térmica previamente se refrigera en las torres de enfriamiento. En ellas, el agua cae en forma de ducha en contra de una corriente de aire ascendente que provoca la evaporación de una parte del agua, el agua adecuadamente mezclada con la que sale del condensador tendrá una temperatura aceptable para ser devuelta al río. Finalmente, para mejorar el tiro de la caldera se incorpora un extractor de humos (7), humos que antes de ser vertidos a la atmósfera se deben filtrar mediante precipitadores electrostáticos (6), las cenizas del hogar se recogen mediante una cinta transportadora (9) para ser conducidas a una zona de vertido o para ser eventual aprovechamiento.

Datos

Para la modelización se supondrán las siguientes condiciones de operación:

Combustible: Carbón de PC = 29000 kJ/kg

Circuito: Ciclo cerrado de agua con condensador refrigerado con agua de río.

Expansión: Subdividida entre dos grupos de turbinas con recalentamiento intermedio.

Consumo de vapor: **210 Mg/h** (210 t/h)

Potencia efectiva: **70 MW**

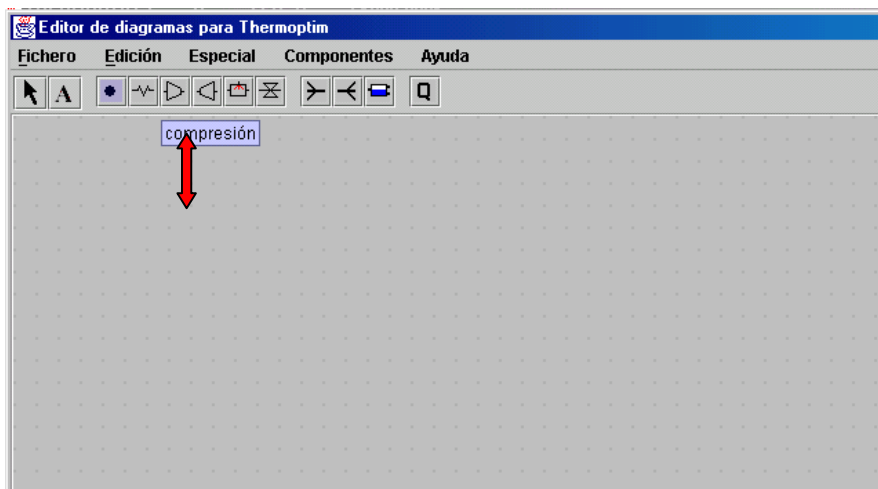
Turbina de alta presión: En ella el vapor entra a $p_5 = 125 \text{ bar}$
 $t_5 = 520^\circ\text{C}$

Recalentamiento: Tras la expansión del vapor hasta 29.3 bar se recalienta hasta:
 $t_7 = 510^\circ\text{C}$

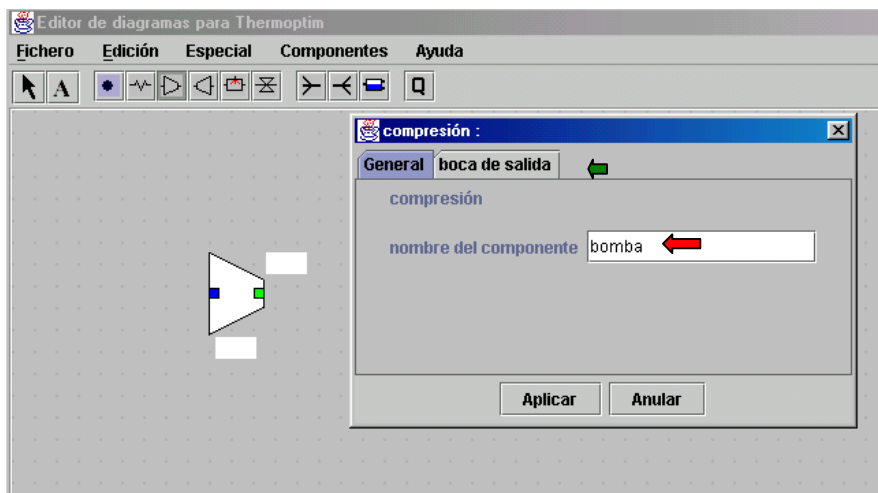
Condensador: En el condensador hay una presión de $p_8 = 0.027 \text{ bar}$

Resolución mediante THERMOPTIM

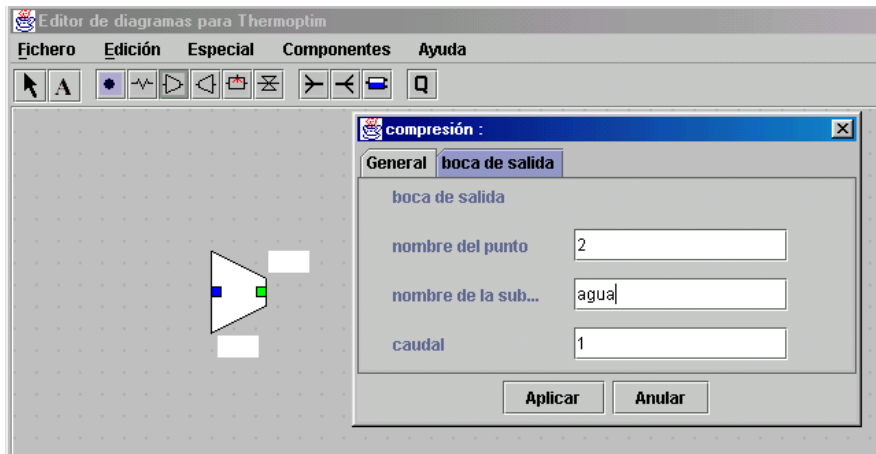
1. Abrir el programa: the_opt_java
2. Aparece la siguiente pantalla “**Editor de diagramas**” en la que se dibujará el diagrama de bloques...



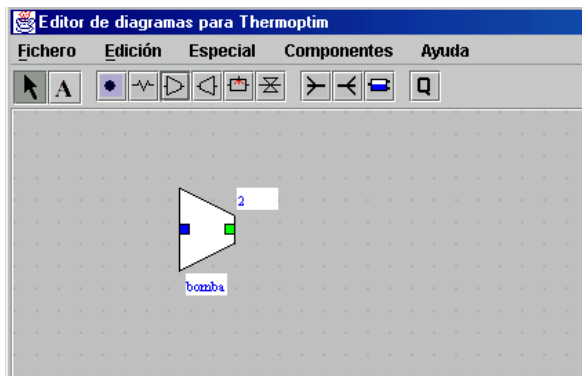
3. ..para ello se seleccionan y arrastran los correspondientes elementos del circuito, empezando por ejemplo por la bomba que genéricamente se considera como un elemento de compresión. En el momento de soltarlo sobre el panel del Editor de diagramas se abre la ficha del elemento. La ficha tiene dos pestañas una de identificación “General” (nombre)... introducimos : bomba



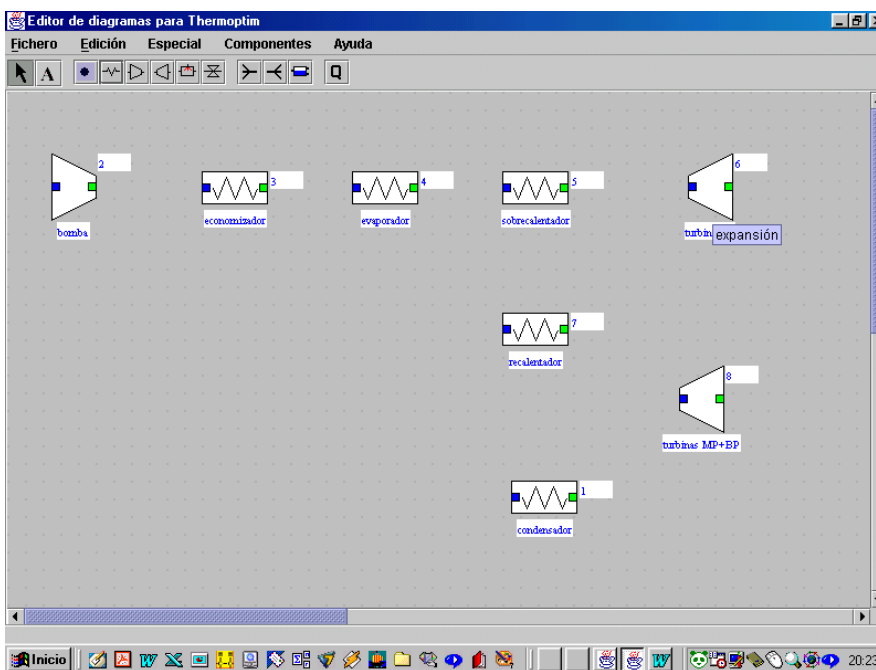
4. ...y la otra “boca de salida” que al clicarla aparece la ficha en la que se entrará los datos del fluido a la salida del elemento: en este caso su identificador (nombre o número), el tipo de sustancia de entre las de la base de datos “agua” y el caudal másico de referencia.
5. En lugar de entrar “agua” opcionalmente haciendo doble clic sobre el campo aparecerá la lista de sustancias disponibles.



6. Al pulsar Aplicar quedará el elemento definido:

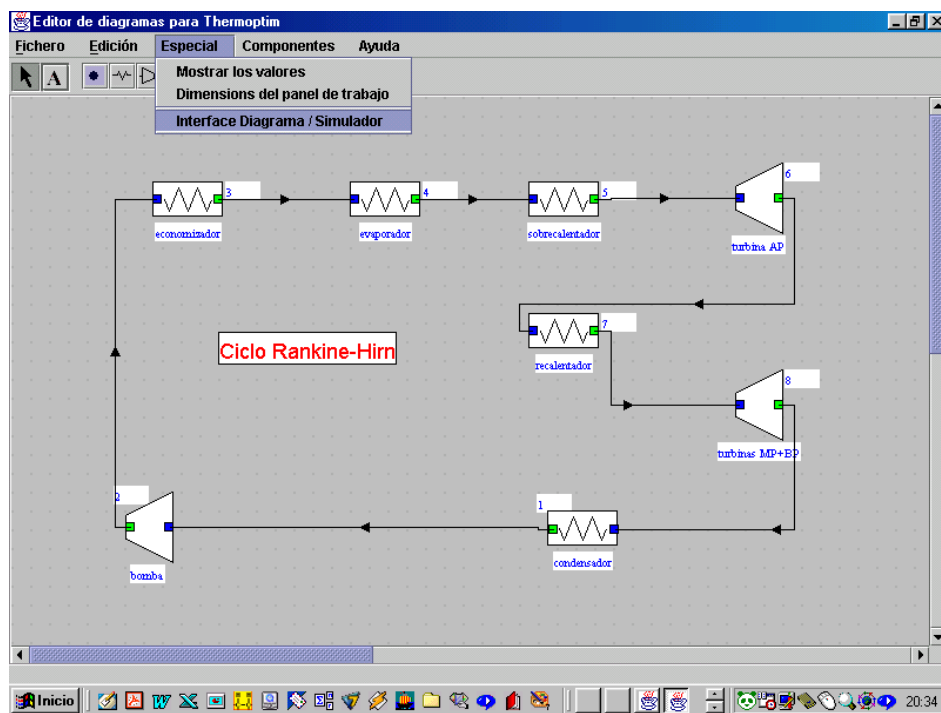


7. Así iremos introduciendo sucesivamente todos los elementos de la planta, dando para cada



uno el nombre, sustancia, como en el caso del compresor.

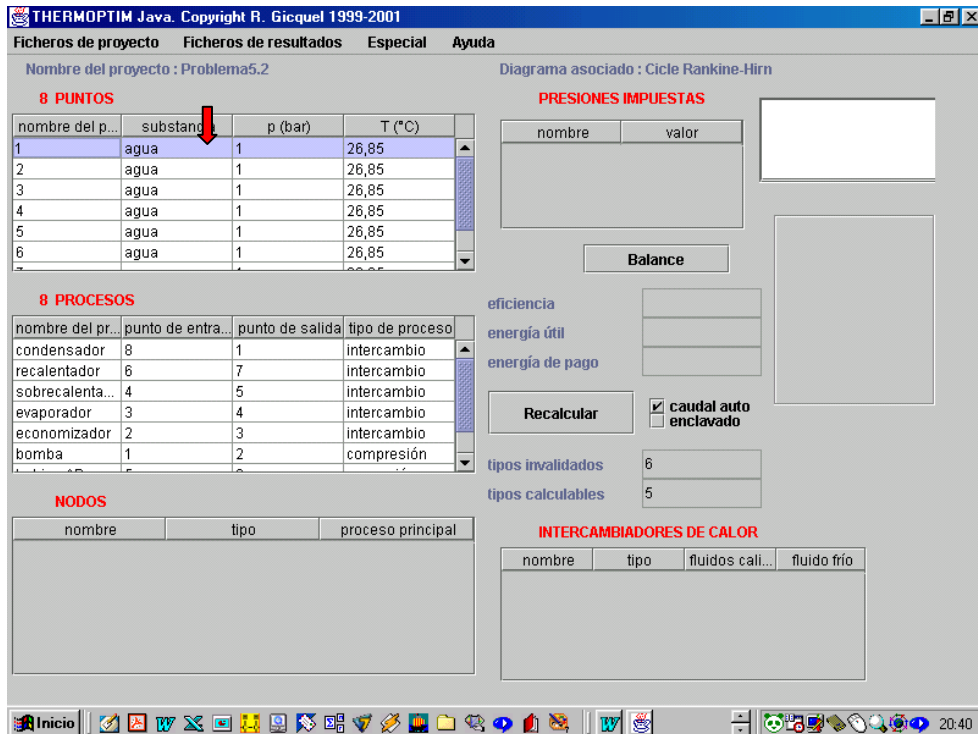
8. Cuando estén todos dibujados se unen entre sí señalando la salida de uno (verde) con la entrada del siguiente (azul)
9. Una vez trazados se pueden recolocar arrastrándolos una vez seleccionados señalándolos por su parte izquierda. Seleccionados se pueden arrastrar con el ratón o con las flechas del teclado.
10. Mediante la herramienta de texto se le puede poner un rótulo.
11. Una vez terminado el dibujo del diagrama de bloques se pasará a la definición de cada uno de sus elementos para ello, en el menú especial seleccionamos **Interface Diagrama/Simulador**



12. Aparecerá una nueva pantalla en la que pulsaremos en las teclas de la derecha: 1º **Actualizar la tabla de elementos**, y 2º de **Actualizar el simulador a partir del esquema**.

componente	tipo	simulador	Diagrama	seleccionado
bomba	compresión		X	<input checked="" type="checkbox"/>
economizador	intercambio		X	<input checked="" type="checkbox"/>
evaporador	intercambio		X	<input checked="" type="checkbox"/>
sobrecalentador	intercambio		X	<input checked="" type="checkbox"/>
turbina AP	expansión		X	<input checked="" type="checkbox"/>
recalentador	intercambio		X	<input checked="" type="checkbox"/>
turbinas MP+BP	expansión		X	<input checked="" type="checkbox"/>
condensador	intercambio		X	<input checked="" type="checkbox"/>

13. Con lo que aparecerá un listado de fichas de “puntos” 8 y de “procesos” 8



13. Ahora se trata de ir entrando los datos que conocemos de cada uno de los elementos. Para irlos seleccionando bastará empezar por uno de ellos clicando en su nombre de la lista superior. Observar que por defecto todos se hallan a una temperatura de $26,85^{\circ}\text{C}=300\text{K}$ y una presión de 1 bar.

14. Por ejemplo aquí: primer elemento: punto 1 Aparecerá la primera de las pantallas que tabulamos a continuación, y mediante las flechas \leftarrow \rightarrow podremos ir pasando de elemento en elemento. En cada ficha entraremos los datos que de momento conocemos...

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto:

punto:

substancia:

Sistema abierto (T,p,h) Sistema cerrado (T,v,u) Mezclas vapor/gas de agua

p (bar) h (kJ/kg)

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg)

T (°C) imponer psat

T (K) imponer Tsat

título Tsat desv

u (kJ/kg)

s (kJ/kg/K)

V (m3/kg)

Punto 1

Entrada bomba, el agua líquida procedente del condensador tiene una presión de 0,027 bar (dato) y la temperatura correspondiente a la T saturación.

Entrar: p (bar) **0,027**
 Marcar : **imponer Tsat**

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto:

punto:

substancia:

Sistema abierto (T,p,h) Sistema cerrado (T,v,u) Mezclas vapor/gas de agua

p (bar) h (kJ/kg)

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg)

T (°C) imponer psat

T (K) imponer Tsat

título

u (kJ/kg)

s (kJ/kg/K)

V (m3/kg)

Punto 2

La bomba ha elevado la presión del agua líquida hasta 125 bar.

Entrar: p (bar) **125**

de momento no conocemos nada más

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto: Problema5.2

punto: 3

substancia: agua

enlaces

Duplicar Salvar

Suprimir Cerrar

Sistema abierto (T,p,h) Sistema cerrado (T,v,u) Mezclas vapor/gas de agua

p (bar): 125 h (kJ/kg): 1.511,9764033

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg): 494,8711

T (°C): 327,78475 imponer psat

T (K): 600,93 imponer Tsat

título: 0 Tsat desv: 0

u (kJ/kg): 1.492,64335806

s (kJ/kg/K): 3,52977727

v (m3/kg): 0,00154664362

Calcular

Punto 3

Entrada en el evaporador, el agua empezará a hervir a la presión de 125 bar y a la temperatura de saturación

Entrar: p (bar) 125

título: 0

Marcar : imponer Tsat

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto:

punto: 4

substancia: agua

enlaces

Duplicar Salvar

Suprimir Cerrar

Sistema abierto (T,p,h) Sistema cerrado (T,v,u) Mezclas vapor/gas de agua

p (bar): 125 h (kJ/kg): 2.678,33910413

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg): 1.101,9457

T (°C): 327,78475 imponer psat

T (K): 600,93 imponer Tsat

título: 1 Tsat desv: 0

u (kJ/kg): 2.509,41327089

s (kJ/kg/K): 5,47073896

v (m3/kg): 0,0135140667

Calcular

Punto 4

Entrada en el sobrecalentador, el agua ya está totalmente vaporizada a la presión de 125 bar y a la temperatura de saturación

Entrar: p (bar) 125

título: 1

Marcar : imponer Tsat

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto: Problema5.2

punto: 5

substancia: agua

Sistema abierto (T,p,h) | Sistema cerrado (T,v,u) | Mezclas vapor/gas de agua

p (bar): 125

h (kJ/kg): 3.396,42311508

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg): 1.513,7881

T (°C): 520

T (K): 793,15

título: 1

u (kJ/kg): 3.064,32634657

s (kJ/kg/K): 6,53352441

V (m3/kg): 0,0265677415

Calcular

Punto 5

“Vapor vivo” Salida del sobrecalentador y entrada en turbina de alta presión. Su presión y temperatura son datos.

Entrar: p (bar) 125
T(°C) 520

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto: Problema5.2

punto: 6

substancia: agua

Sistema abierto (T,p,h) | Sistema cerrado (T,v,u) | Mezclas vapor/gas de agua

p (bar): 29,3

h (kJ/kg): 112,62577516

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg): -0,61336

T (°C): 26,85

T (K): 300

título: 0

u (kJ/kg): 112,52544066

s (kJ/kg/K): 0,392986768

V (m3/kg): 0,00100334502

Calcular

Punto 6

En la turbina de alta presión el vapor se expansiona hasta 29,3 bar (dato)

Entrar: p (bar) 29,3
de momento no se conoce nada más

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto: Problema5.2

punto: 7

substancia: agua

enlaces

Duplicar Salvar

Suprimir Cerrar

Sistema abierto (T,p,h) Sistema cerrado (T,v,u) Mezclas vapor/gas de agua

p (bar): 29,3 h (kJ/kg): 3.479,23792708

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg): 1.382,956

T (°C): 510

imponer psat

T (K): 783,15

imponer Tsat

título: 1

u (kJ/kg): 3.125,87041156

s (kJ/kg/K): 7,27496775

V (m3/kg): 0,120603248

Calcular

Punto 7

El vapor que sale de la turbina de AP se reconduce al recalentador en donde manteniendo su presión se recalienta hasta 510°C

Entrar: p (bar) **29,3**
T(°C) **510**

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

Pantalla para el cálculo de un punto

proyecto:

punto: 8

substancia: agua

enlaces

Duplicar Salvar

Suprimir Cerrar

Sistema abierto (T,p,h) Sistema cerrado (T,v,u) Mezclas vapor/gas de agua

p (bar): 0,027 h (kJ/kg): 112,62577516

presión controlada

p y h conocidas

p y T conocidas

exergía (kJ/kg): -0,61336

T (°C): 26,85

imponer psat

T (K): 300

imponer Tsat

título: 0

u (kJ/kg): 112,52544066

s (kJ/kg/K): 0,392986768

V (m3/kg): 0,00100334502

Calcular

Punto 8

En las turbinas de media y baja presión el vapor se expande hasta la presión del condensador (dato)

Entrar: p (bar) **0,027**
de momento no se conoce nada más

Clicar en: **Calcular**

y pasar al siguiente punto

15. Una vez entrados todos los puntos se pasará a definir los procesos que tiene lugar entre ellos.

16. Para ello se vuelve a la pantalla de la tabla de PUNTOS y PROCESOS (se puede hacer también con las pestañas situadas en la barra de iconos inferior)

THERMOPTIM Java. Copyright R. Gicquel 1999-2001

Ficheros de proyecto Ficheros de resultados Especial Ayuda

Nombre del proyecto : Problema5.2

8 PUNTOS

nombre del p...	substancia	p (bar)	T (°C)
1	agua	1	22,35568
2	agua	125	26,85
3	agua	125	327,78475
4	agua	125	327,78475
5	agua	125	520
6	agua	1	26,85
7	agua	1	520

8 PROCESOS

nombre del pr...	punto de entra...	punto de salida	tipo de proceso
sobrecalentam...	4	5	intercambio
evaporador	3	4	intercambio
economizador	2	3	intercambio
bomba	1	2	compresión
turbina AP	5	6	expansión
turbinas MP+...	7	8	expansión

17. Elegimos el primero, haciendo doble clic sobre la línea **bomba**, aparecerá:

Proceso de Compresión

proceso: bomba2 tipo: compresión

tipo de energía: útil

caudal definido: caudal: 1

punto de entrada: 1 Delta_H: 12,48

T (°C): 22,35568 p (bar): 0,027 h (kJ/kg): 93,75 título: 0

punto de salida: 2

T (°C): 22,57 p (bar): 125 h (kJ/kg): 106,24

Q: 0

sistema abierto sistema cerrado observado

isentrópico politrópica

compresión no adiabática

r. isentrópico: 1 exponente politrópico: 1.530,47392

relación de presión (>= 1): 4.629,63 calculado impuesto

Imponer el rendimiento y calcular el proceso

enlaces: Salvar, Suprimir, Cerrar

Calcular

18. Del proceso de compresión suponemos que es isoentrópico.

19. Verificamos que las presiones de entrada y salida sean las especificadas y pulsamos Calcular.

20. El siguiente proceso pendiente de definición es el de la turbina de alta presión. Seleccionando y clicando la línea correspondiente de la tabla accedemos a la ficha del proceso.

21. en este caso supondremos que la compresión es isoentrópica. Los datos se introducen en las correspondientes casillas, y luego se pulsa calcular.

Proceso de Expansión

proceso: turbina AP tipo: expansión Salvar

tipo de energía: útil caudal definido enlaces sistema cerrado observado

punto de entrada: 5 caudal: 1 sistema abierto

Delta_H: -411,62 Calcular

T (°C): 520 Q: 0

p (bar): 125 isentrópico politrópica

h (kJ/kg): 3.396,42 expansión no adiabática

título: 1 r. isentrópico: 1 exponente politrópico: 1,28292

punto de salida: 6 relación de expansión (>= 1): 4,27 calculado

T (°C): 295,16 impuesto

p (bar): 29,3 Imponer el rendimiento y calcular el proceso

h (kJ/kg): 2.984,8 Calcular el rendimiento, conocido el punto de salida

título: 1

- (eventualmente podríamos haber señalado politrópica y dar su rendimiento isoentrópico <1).
22. Análogamente efectuaremos con la(s) turbina(s) de media y baja presión.
 23. Para los demas procesos: economizador, vaporizador, sobrecalentador etc. el proceso puesto que ya están definidos los puntos aguas abajo y aguas arriba, bastará verificar si está señalada la opción "calcular delta H, conocido el punto aguas abajo".
 24. A efectos del balance, en cada ventana de la caldera seleccionaremos el tipo de energía "de pago" haciendo doble clic en la correspondiente tecla.
 25. Esto permitirá pulsando en la tecla **Balance** obtener los correspondientes resultados del problema

THERMOPTIM Java. Copyright R. Gicquel 1999-2001

Ficheros de proyecto Ficheros de resultados Especial Ayuda

Nombre del proyecto: RankineHirn Diagrama asociado: Ciclo Rankine-Hirn

8 PUNTOS

nombre del punto	substancia	p (bar)	T (°C)
3	agua	125	327,78475
4	agua	125	327,78475
5	agua	125	520
6	agua	29,3	295,15641
7	agua	29,3	510
8	agua	0,027	22,35568

8 PROCESOS

nombre del proceso	punto de entr...	punto de sali...	tipo de proce...
sobrecalentador	4	5	intercambio
vaporizador	3	4	intercambio
economizador	2	3	intercambio
bomba	1	2	compresión
turbina AP	5	6	expansión
turbina MP+BP	7	8	expansión

0 NODOS

nombre	tipo	proceso principal
--------	------	-------------------

PRESIONES IMPUESTAS

nombre	valor
--------	-------

Balance

eficiencia: 0,461018

energía útil: 1.744,78

energía de pago: 3.784,62

Recalcular caudal auto enclavado

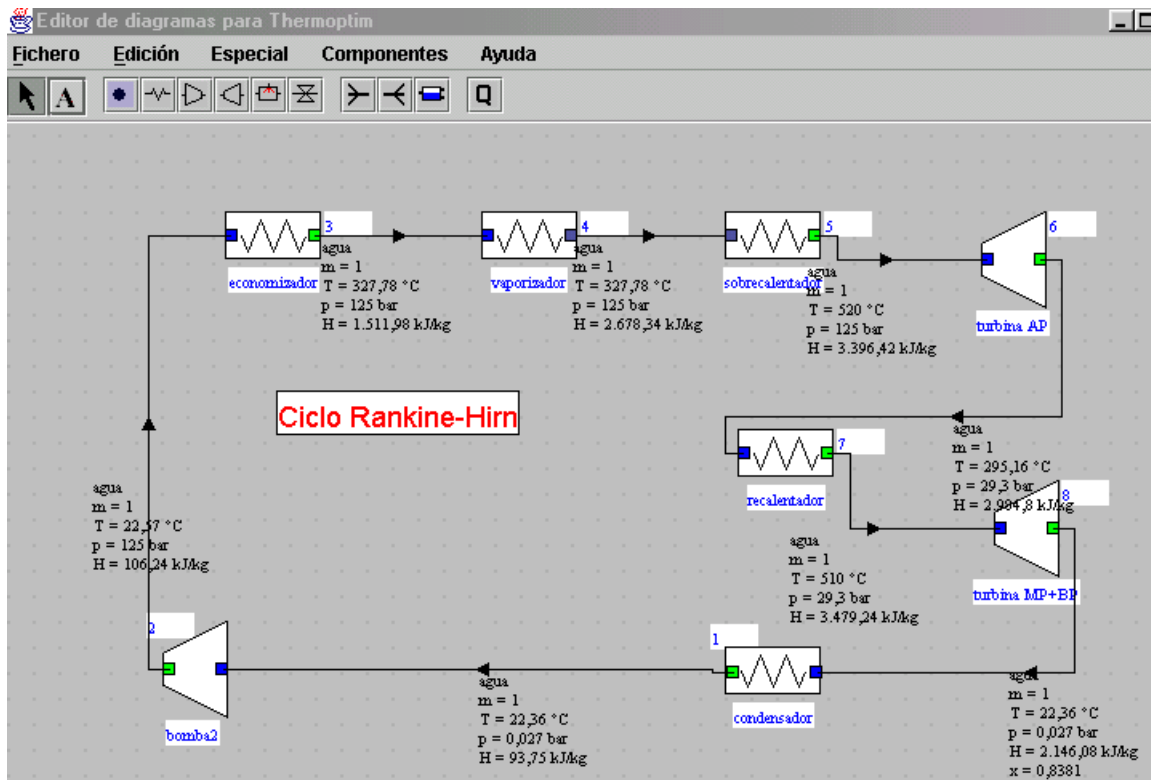
tipos invalidados: 3

tipos calculables: 3

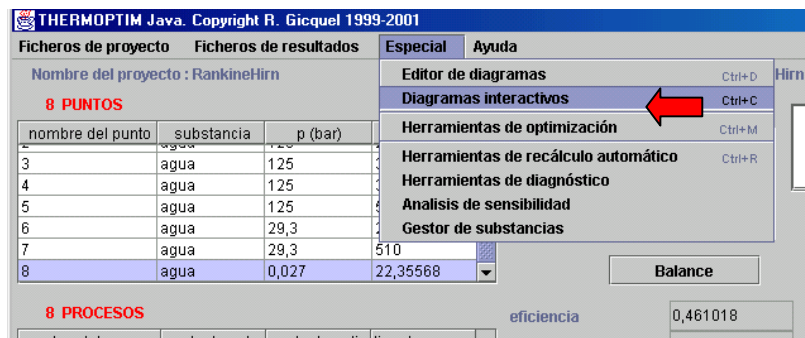
0 INTERCAMBIADORES DE CALOR

nombre	tioo	fluidos cali..
--------	------	----------------

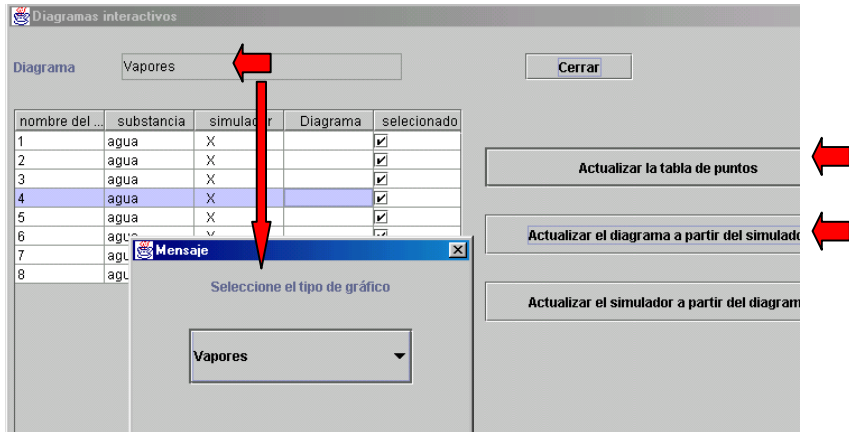
26. Pasaremos de nuevo a la ventana del editor de diagramas y en el menú seleccionaremos mostrar valores. Obteniendo el diagrama de bloques con los valores en cada elemento.



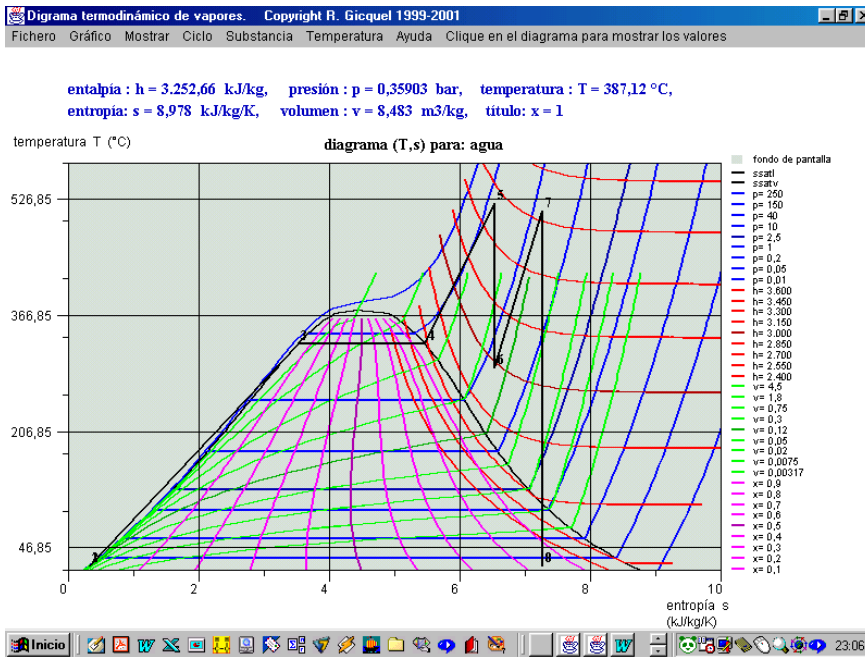
27. Otra posibilidad es la representación gráfica del ciclo en diagrama de Izard (T-s). Para ello se selecciona del menú **Especial** de la página de tablas la opción **Diagramas interactivos**.



27. Tras ello se abre la ventana siguiente se selecciona **Actualizar tabla de puntos...** y **Actualizar diagrama a partir del simulador** para transferir los puntos. Atención: en la sub-ventana de diálogo se elegirá **Vapores**

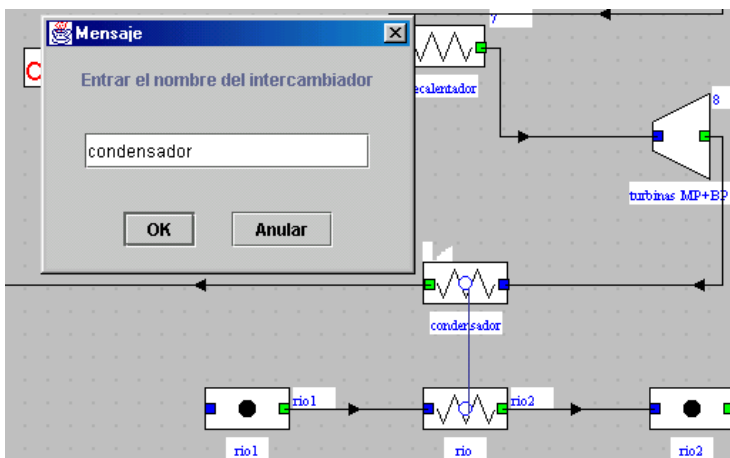
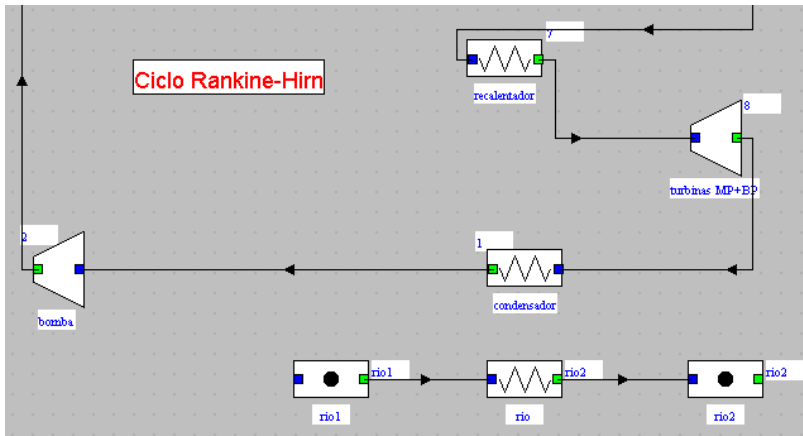


Volviendo a la página del diagrama, podremos mostrar el ciclo (opción puntos conexos, trazo fino...)



B) Cálculo del condensador enfriado con agua del río.

Volvemos al diagrama e introduciremos los siguientes elementos una toma de agua "rio1" y un intercambiador de calor y un sumidero "rio2".



proceso tipo

tipo de energía caudal definido sistema cerrado observado

caudal sistema abierto

punto de entrada Delta_H

T (°C)
 p (bar)
 h (kJ/kg)
 título

pinch mínimo

fluido del método pinch

punto de salida

T (°C)
 p (bar)
 h (kJ/kg)
 título

Calcular Delta H, conocido el punto de salida
 Imponer Delta H y modificar el punto de salida