

# *Programa didáctico sobre el Ciclo de Rankine sencillo*

## **RANKINE V1.0**

Manuel C. Juárez Castelló , Manuel M<sup>a</sup> Ruiz de Adana Santiago  
Área de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de La Rioja.

### **Abstract:**

In this work we present a teaching program for the Rankine Cycle with steam as work fluid. The program offers two options: the first without superheating (Simple Rankine Cycle) and the second with superheating (Rankine Cycle with Superheating).

## **1. Introducción.**

Dada la dificultad en muchos Centros, tanto de Enseñanza Superior como de Enseñanzas medias, de disponer de ciertos aparatos para la realización de prácticas de Laboratorio, nos hemos propuesto una solución intermedia entre la enseñanza teórica en el aula y las prácticas con instalaciones reales en Laboratorio.

Esta solución consiste en la preparación de software didáctico y de simulación que permita al alumno estudiar estos fenómenos de una forma personalizada.

Una de las prácticas que no siempre se pueden realizar con instalaciones reales es el estudio del ciclo de Rankine, dado su costo y la complejidad de la instalación. Por ello, hemos realizado un programa didáctico para su estudio.

El Programa Rankine es, pues, un programa didáctico para el estudio del Ciclo isobárico-isentrópico en la zona de vapor húmedo (Ciclo de Rankine).

El fluido de trabajo del Ciclo de Rankine es vapor de agua y las opciones que se ofrecen son dos: la primera sin sobrecalentamiento (Ciclo de Rankine sencillo) y la segunda con sobrecalentamiento.

La programación se ha realizado en Visual Basic<sup>(1)</sup> y el programa, en su versión ejecutable, puede rodarse en cualquier compatible PC 486 o superior. El programa se ha desarrollado de forma que se pueda trabajar con él utilizando tan sólo el ratón, prestando así mayor atención a la información que se recibe y se aporta al programa.

Para realizar el proceso de cálculo es necesario tener los datos de propiedades termodinámicas del vapor de agua. En este programa, en lugar de introducir las tablas de vapor del agua, se han desarrollado una serie de ecuaciones o funciones analíticas que relacionan entre sí las diferentes propiedades termodinámicas, tanto en la zona de vapor saturado, como en la de vapor sobrecalentado y líquido subenfriado, en función de la presión y de la temperatura, en las que, para conseguir una elevada precisión ha sido necesario dividir el estudio de cada variable en varios tramos.

En todos los casos, por tanto, se obtienen unas variables estado a partir de otras sin utilizar Tablas de Propiedades Termodinámicas para el vapor de agua, no apreciándose, apenas, la diferencia de los resultados con respecto a los que ofrecerían las Tablas de Propiedades, utilizando métodos de interpolación.

A continuación, como muestra, se presentan las ecuaciones obtenidas correspondientes a la curva de tensión de vapor, en función de la temperatura:  $p = f(T)$

$$p = e^{(a_1 + \frac{b_1}{T\sqrt{T}} + c_1 \frac{\ln T}{T^2})} \quad 273,16 < T < 393,15$$

$$p = e^{(a_2 + b_2\sqrt{T} + \frac{c_2}{T\sqrt{T}})} \quad 393,15 < T < 483,15$$

$$p = e^{(a_3 + b_3T^3 + \frac{c_3}{T^2})} \quad 483,15 < T < 647,29$$

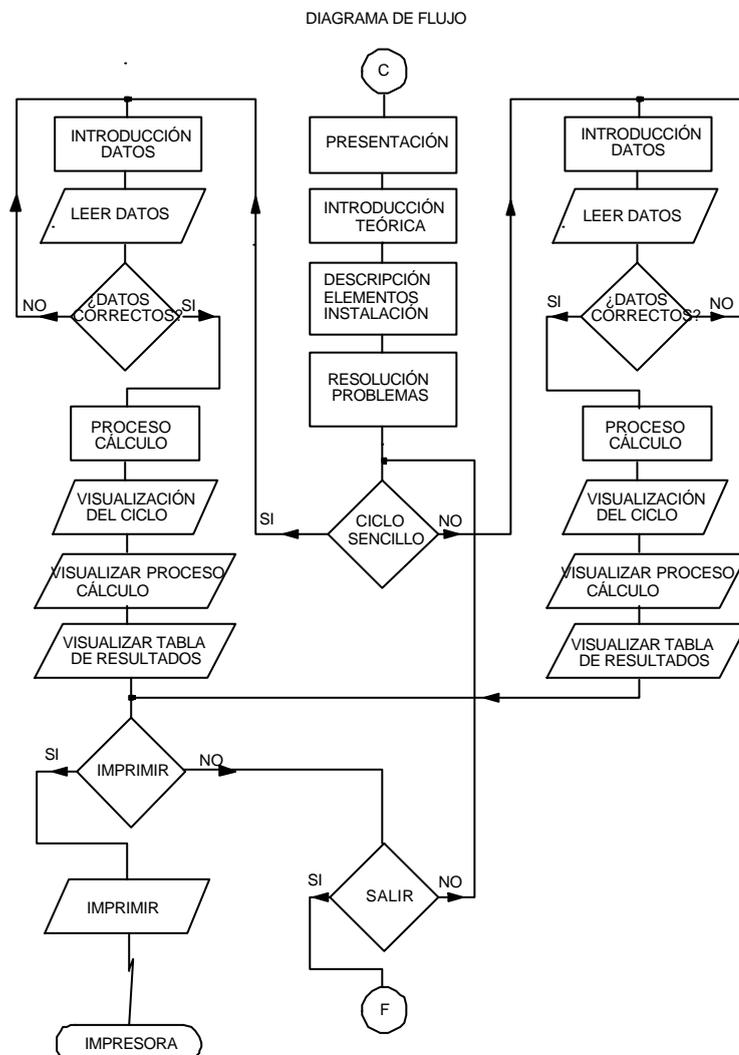
donde:

$$a_1 = 9,92948734 \quad b_1 = -105375,568 \quad c_1 = 110580,1778$$

$$a_2 = 5,315794601 \quad b_2 = 0,1387314 \quad c_2 = -57534,4967$$

$$a_3 = 6,867669442 \quad b_3 = 3,43202 \times 10^{-9} \quad c_3 = -1,006 \times 10^6$$

La estructura básica del programa puede comprenderse fácilmente en el Diagrama de Flujo simplificado que se muestra a continuación. En él, se aprecia la estructura



lógica general.

Sin embargo, dada la versatilidad del lenguaje de programación, en la práctica, la mayoría de los bloques del Diagrama están interrelacionados, de forma que el usuario del programa puede elegir el orden secuencial deseado en función de su capacidad y de sus conocimientos. De ésta forma se logra que usuarios con distinto nivel de conocimientos puedan utilizar el programa con la secuencia que permita realizar un

Introducción

Como se puede apreciar en la figura, el fluido de trabajo experimenta los siguientes procesos **reversibles**:

**Proceso 1-2**

Expansión **isoentrópica** del vapor a través de la turbina, bien partiendo de vapor saturado (punto 1'), o partiendo de vapor sobrecalentado (punto 1)

**Proceso 2-3**

Tranferencia de calor **isóbara** desde el fluido de trabajo, en el condensador, resultando líquido saturado

**Proceso 3-4**

Compresión **isoentrópica** en la bomba en la zona de líquido subenfriado

**Proceso 4-1**

Tranferencia de calor hacia el fluido **isóbara** en la caldera

Continuar Salir

mejor aprendizaje.

Ilustración 1.- Pantalla de introducción.

Introducción

Como se puede apreciar en la figura, el fluido de trabajo experimenta los siguientes procesos **reversibles**:

Transformación experimentada por el sistema termodinámico que puede llevarse de nuevo a su estado inicial sin que se produzcan variaciones en el espacio exterior del sistema, es decir implica un cambio de estado cuasi-estático ( libre de fenómenos disipantes como el rozamiento)

Exp la de

sobrecalentado (punto 1)

**Proceso 2-3**

Tranferencia de calor **isóbara** desde el fluido de trabajo, en el condensador, resultando líquido saturado

**Proceso 3-4**

Compresión **isoentrópica** en la bomba en la zona de líquido subenfriado

**Proceso 4-1**

Tranferencia de calor hacia el fluido **isóbara** en la caldera

Continuar Salir

## 2. Funcionamiento del Programa.

El programa está compuesto de dos partes netamente diferenciadas: Una parte teórica, en la que se presentan los conceptos básicos sobre el Ciclo de Rankine, y una parte práctica, en la que se resuelven problemas concretos introduciendo los datos de la instalación. Además de la introducción teórica, el programa dispone de una ayuda que profundiza más en los diferentes conceptos.

Al arrancar el programa aparece inicialmente una pantalla de presentación y, posteriormente, la pantalla de la Ilustración 1 en la que se expone una introducción teórica del Ciclo de Rankine ideal sin y con sobrecalentamiento, especificando y mostrando en un diagrama T-s los diferentes procesos de que está compuesto el ciclo. En esta pantalla, al pasar el ratón por cualquiera de las palabras resaltadas con diferente color, cambia de forma, y, al pulsar el botón izquierdo, ofrece información sobre el término resaltado en hipertexto, como se muestra en la Ilustración 2. Es posible recibir información sobre los términos: Proceso reversible, transformación isoentrópica y transformación isobara.

Haciendo "click" con el ratón sobre el botón "Continuar", aparece la pantalla de la Ilustración 3, donde se muestra el esquema y los diferentes elementos que conforman una instalación característica que trabaje con un Ciclo de Rankine.

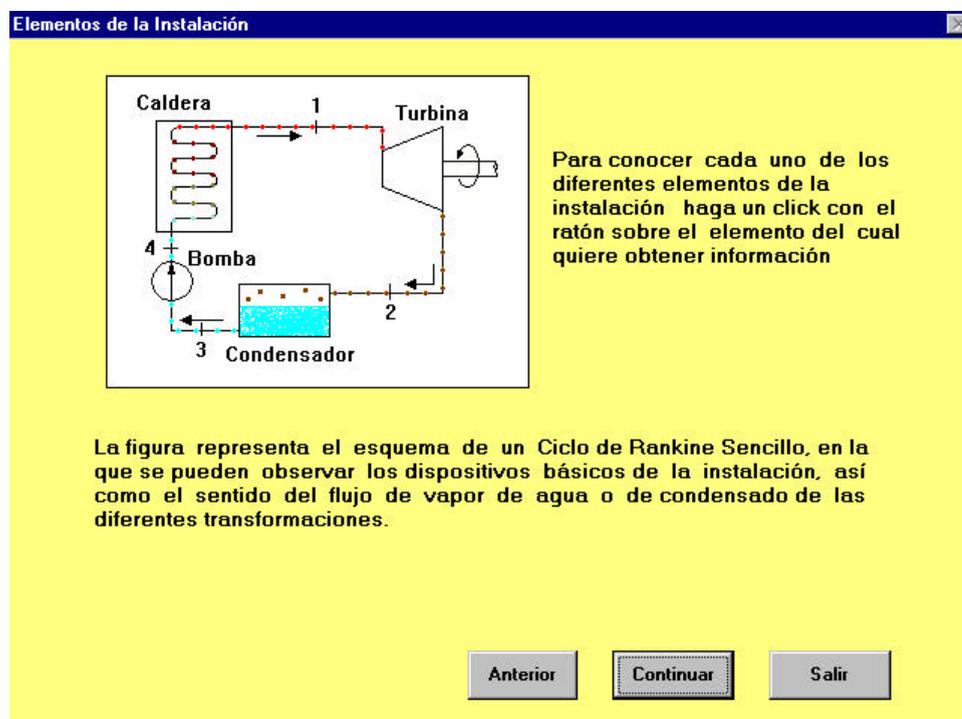


Ilustración 3.- Pantalla sobre los elementos de la instalación

Durante la ejecución del programa, el esquema tiene un efecto gráfico de movimiento de las flechas y puntos que se muestran en la figura, lo que llamará la atención, permitiendo memorizar el esquema más fácilmente.

En esta pantalla se puede profundizar en el conocimiento de cada elemento pulsando con el ratón sobre el elemento deseado, lo que hace que se abra una ventana en la que se muestra información adicional sobre cada uno de ellos, así como la expresión con la que se obtienen los intercambios de calor y trabajo. Por otra parte, en las pantallas correspondientes se definen los rendimientos isoentrópicos de la bomba y de la turbina.

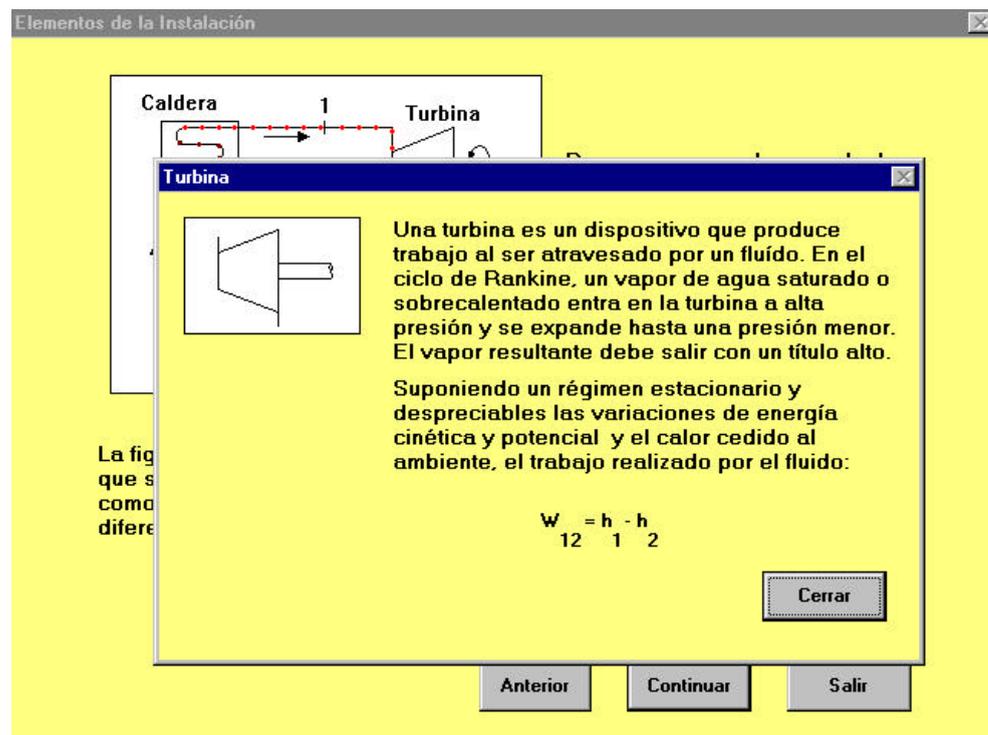


Ilustración 4.- Ejemplo de ventana aclaratoria sobre los elementos de la instalación

Se puede obtener información sobre los cuatro elementos básicos que componen la instalación: caldera, turbina, condensador y bomba. Un ejemplo se puede observar en la Ilustración 4.

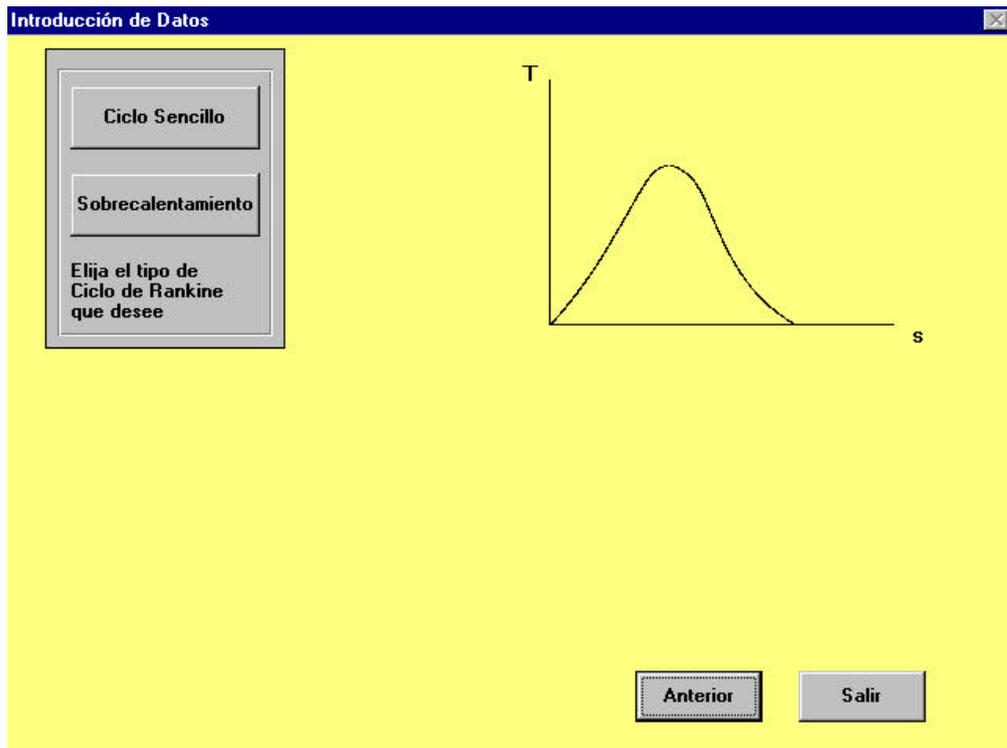


Ilustración 5.- Elección del tipo de ciclo

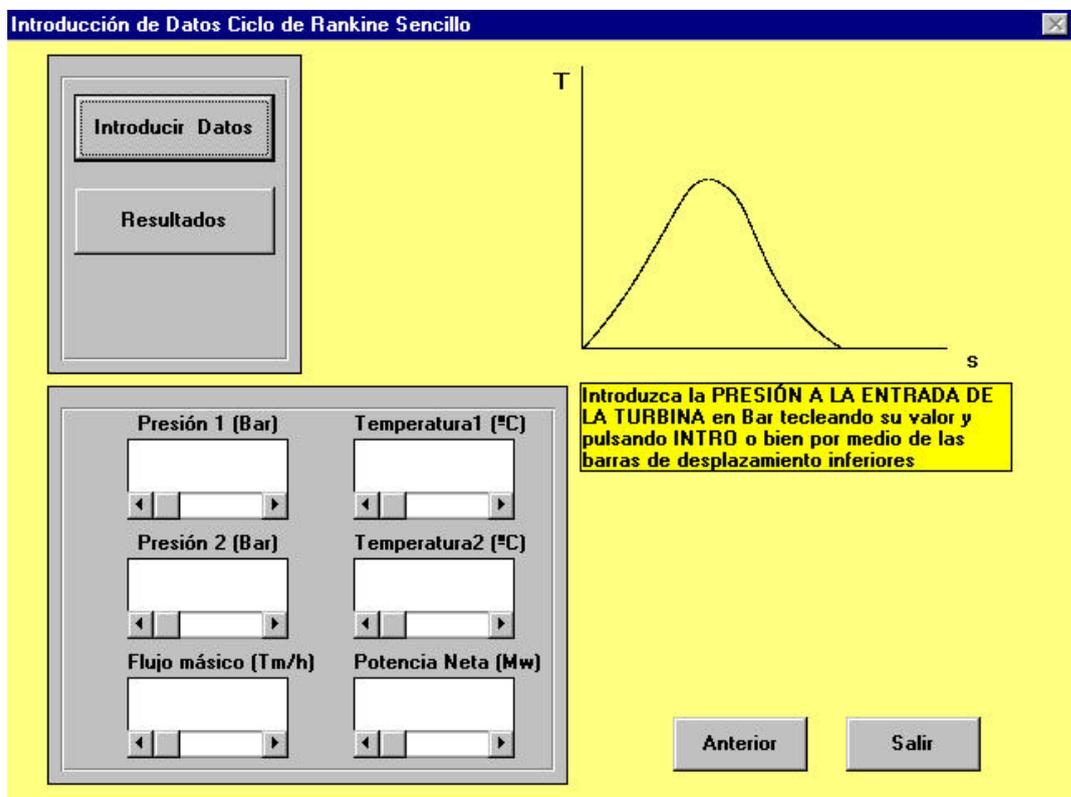


Ilustración 6.- Información sobre los datos a introducir

En todas las pantallas se ofrece la posibilidad de volver a la pantalla anterior haciendo "click" con el ratón sobre el botón "Anterior", por si los conceptos no han sido claramente asimilados, y de la pantalla anterior, continuar el proceso cuantas veces sea necesario.

Pasada esta introducción teórica útil para aprender o recordar los conceptos fundamentales, comienza la parte práctica del programa. En todo caso, en cualquier instante, se puede acceder a la ayuda, pulsando la tecla "F1" sobre la que, posteriormente, hablaremos.

La primera posibilidad que se presenta en la siguiente pantalla, que muestra la Ilustración 5, es la elección entre el Ciclo de Rankine sencillo y el Ciclo con recalentamiento. Comentamos, a continuación cada una de las dos opciones.

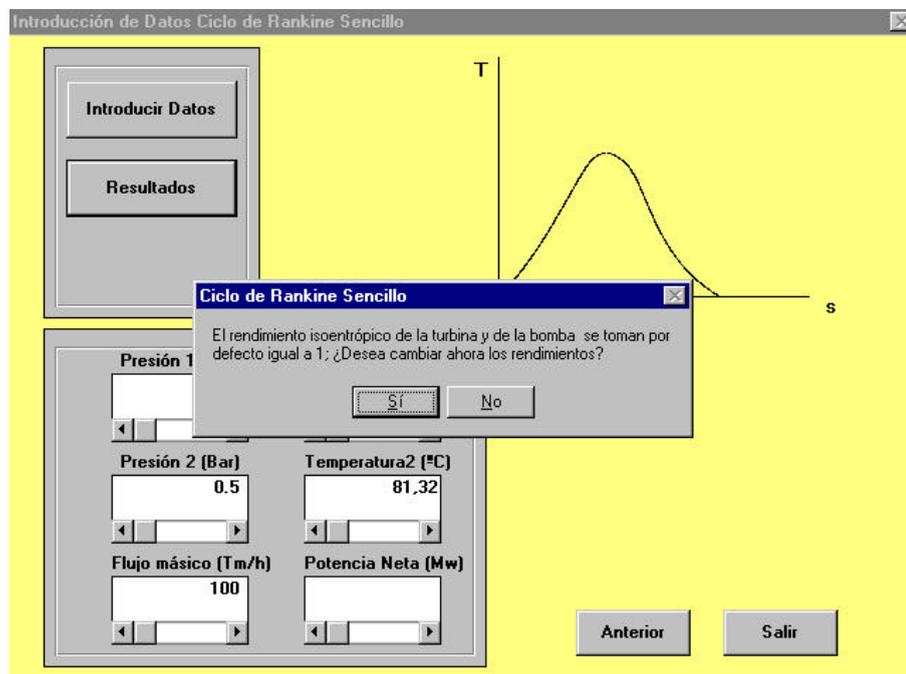
### *Ciclo de Rankine sin sobrecalentamiento*

Elegida esta opción, se visualiza la segunda pantalla de introducción de datos de la Ilustración 6. Si los datos no son adecuados o están incompletos, el programa obliga a corregirlos o completarlos.



*Ver Noticias ADIE.*

Al pasar el ratón por las ventanas en las que se deben introducir los datos, éste cambia su aspecto apareciendo a la derecha y resaltada, la información sobre los datos que se deben introducir y la forma de hacerlo, como muestra en la Ilustración 6.

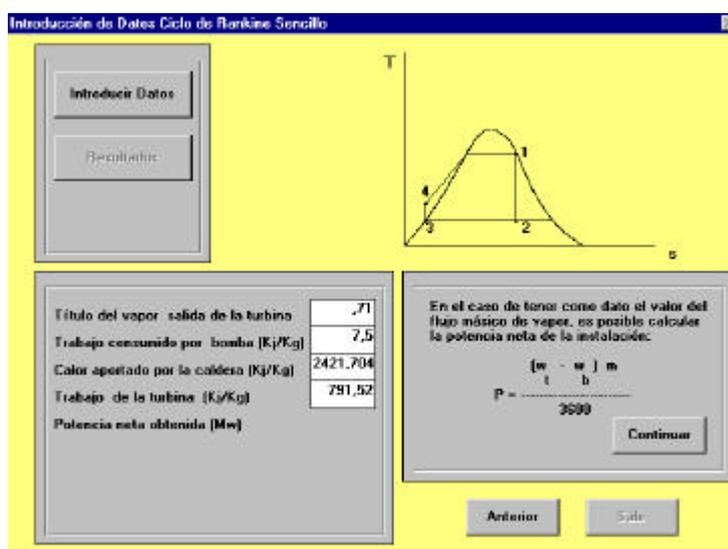


### Ilustración 7.- Elección de los rendimientos isoentrópicos

No es posible introducir cualquier dato, sino que están limitados a los valores factibles habituales para el Ciclo de Rankine: de 0 a 220 bar o de 0 a 374,14 °C a la entrada de la turbina y de 0 a 20 bar a la salida de la misma.

Dado que estamos trabajando en puntos situados en las curvas de líquido y vapor saturado, al introducir valores de las presiones, se dan automáticamente los valores de las temperaturas y viceversa.

Al pulsar el botón de resultados, y antes de efectuar los cálculos, se ofrece la opción de modificar los rendimientos isoentrópicos de la turbina y de la bomba, que inicialmente tienen un comportamiento ideal con rendimiento igual a la unidad. Ver Ilustración 7.



### Ilustración 8.- Proceso de cálculo

En el ejemplo que se muestra en las ilustraciones, se ha optado por mantener los rendimientos isoentrópicos iguales a la unidad.

A continuación, el programa muestra los cálculos que va realizando paso a paso siendo necesario pulsar el botón "Continuar", de manera que quede bien comprendida la dinámica de los problemas relacionados con el Ciclo de Rankine.

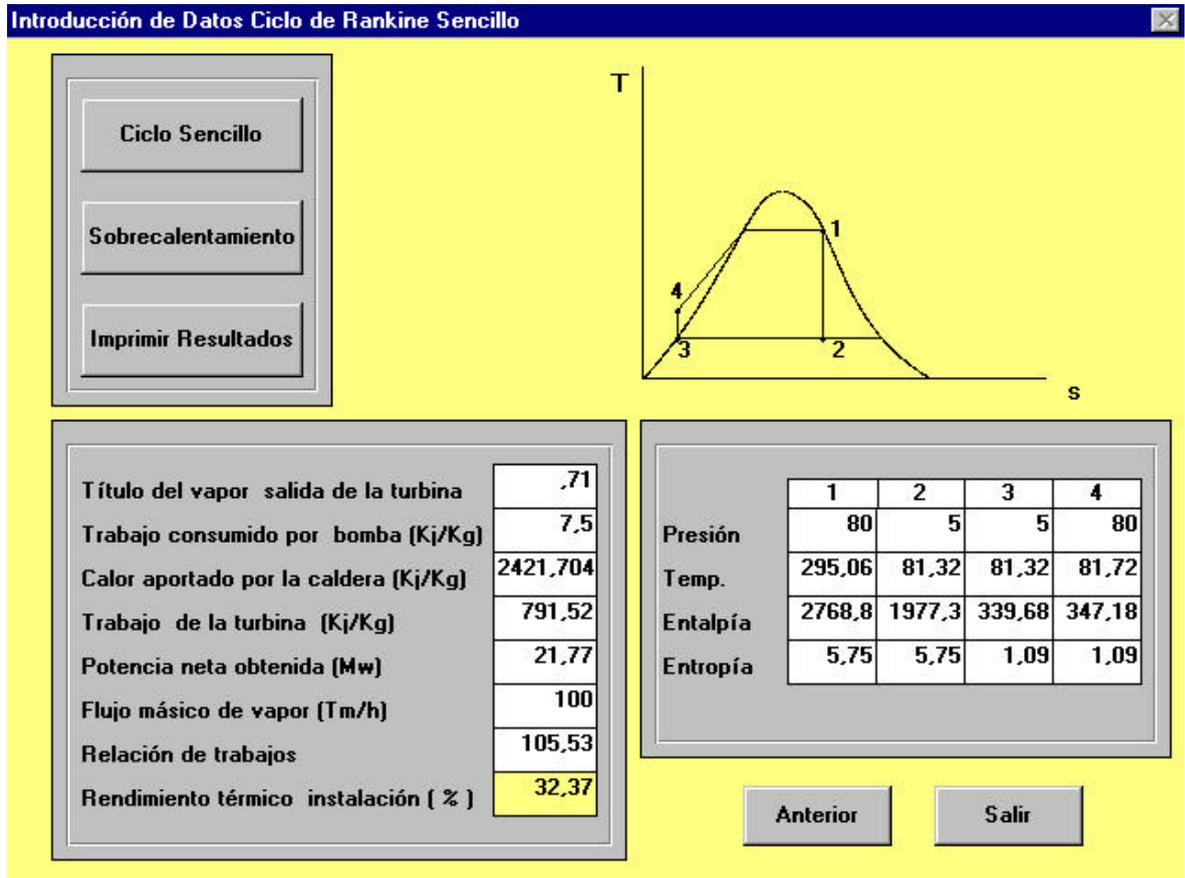


Ilustración 9.- Resultados completos

Partiendo de los datos, el programa va calculando y mostrando los resultados, en el Sistema Internacional y en el siguiente orden:

- 1.- Título del vapor a la salida de la turbina.
- 2.- Trabajo consumido por la bomba.
- 3.- Calor aportado por la caldera.
- 4.- Trabajo desarrollado por la turbina.
- 5.- Potencia neta obtenida.
- 6.- Flujo másico de vapor.
- 7.- Relación de trabajos.

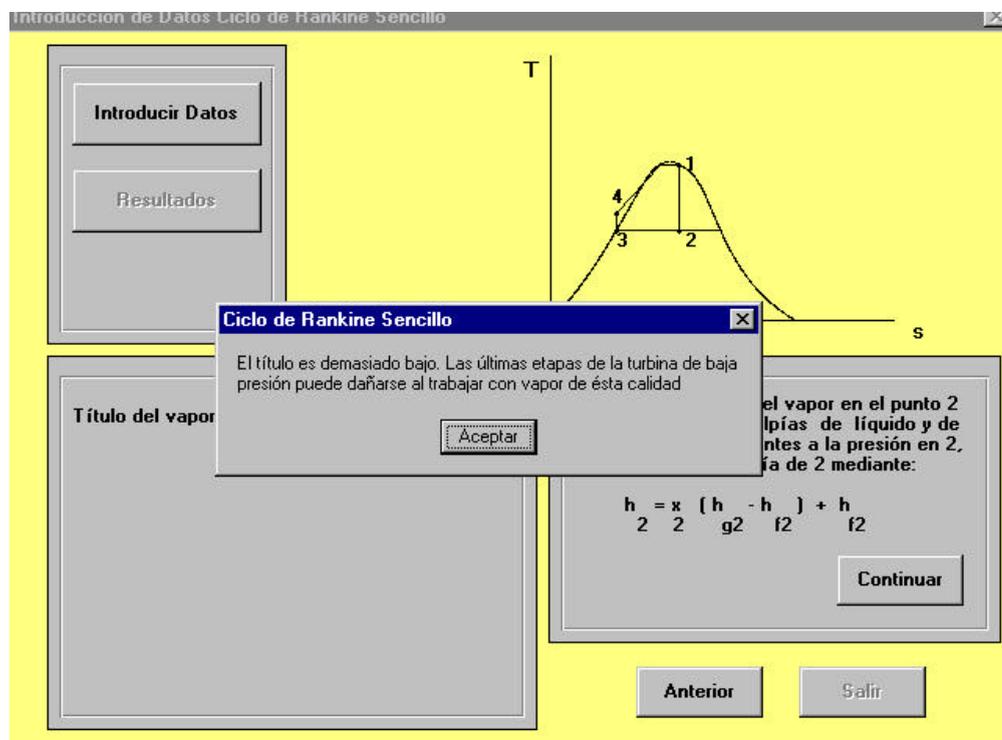
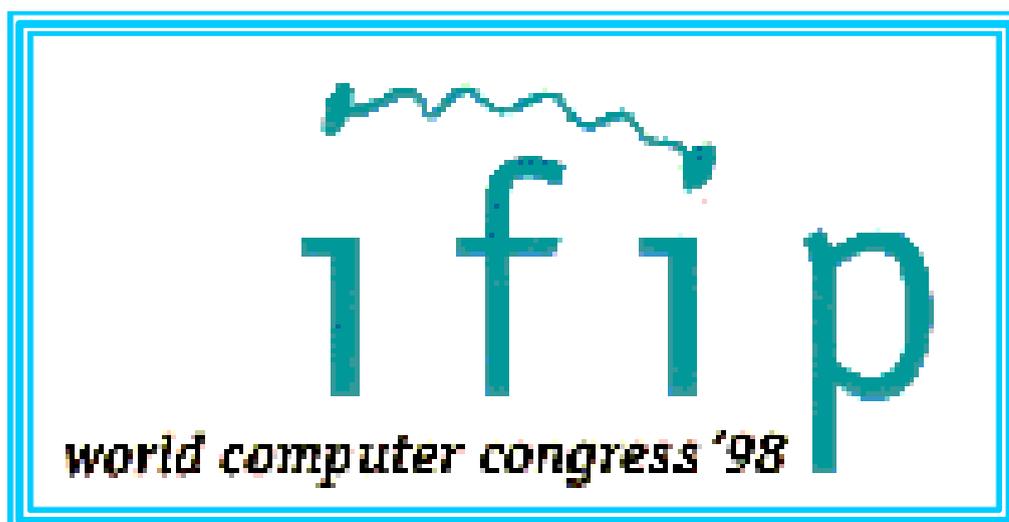


Ilustración 10.- Proceso de cálculo. Caso en que el título del vapor a la salida de la turbina sea demasiado bajo

La secuencia de cálculo finaliza ofreciendo, también, la posibilidad de imprimir los resultados y la representación del ciclo por impresora, pudiendo entonces iniciar otra vez el proceso del Ciclo Sencillo o con Sobrecalentamiento, o volver atrás

Ésta presentación secuencial de la resolución del problema paso a paso va acompañada de la representación en diagrama T-s así como de la presentación de los resultados que se van obteniendo, como se muestra en la Ilustración 8. La presentación completa de los resultados se muestra en la Ilustración 9.



Ver Noticias ADIE.

Introducción de Datos Ciclo de Rankine con Sobrecalentamiento

Introducir Datos

Resultados

Rendimiento isoentrópico

Turbina	Bomba
0.85	.85

Aceptar

Introduzca el rendimiento isoentrópico de la bomba tecleando su valor y pulsando INTRO o bien por medio de las barras de desplazamiento inferiores

Anterior

Salir

Presión 1 (Bar)	60	Temperatura1 (°C)	600
Presión 2 (Bar)	0.5	Temperatura2 (°C)	81.32
Flujo másico (Tm/h)	100	Potencia Neta (Mw)	

Ilustración 11.- Introducción de los rendimientos isoentrópicos

Introducción de Datos Ciclo de Rankine con Sobrecalentamiento

Introducir Datos

Resultados

Título del vapor salida de la turbina	.89
Trabajo consumido por bomba (Kj/Kg)	6.82
Calor aportado por la caldera (Kj/Kg)	3160,233
Trabajo de la turbina (Kj/Kg)	1044.38
Potencia neta obtenida (Mw)	28.82
Flujo másico de vapor (Tm/h)	100
Relación de trabajos	153.05
Rendimiento térmico instalación (%)	

Conocido el trabajo desarrollado por la turbina, el trabajo consumido por la bomba y el calor aportado por la caldera se calcula el rendimiento térmico de la instalación:

$$n = \frac{w_t - w_b}{Q_{caldera}}$$

Continuar

Anterior

Salir

## Ilustración 12.- Proceso de cálculo: Ciclo con Sobrecalentamiento

El programa realiza una serie de comentarios sobre los inconvenientes o no de la realización práctica del ciclo estudiado, así como de los distintos factores que suponen una mejora del rendimiento y una optimización de la instalación. Como ejemplo de lo dicho se muestra en la Ilustración 10 el caso de que resulte un título demasiado bajo a la salida de la turbina, mostrando los inconvenientes y ofreciendo, mediante un cuadro de mensaje, la posibilidad de cambiar los datos en la siguiente ventana.

Una vez completados los cálculos con los datos corregidos y obtenidos los resultados deseados, el programa permite obtener un resumen de los resultados y la representación del ciclo, por la impresora.

### ***Ciclo de Rankine con sobrecalentamiento***

Elegida esta opción, se permite la introducción de datos, en éste caso, en intervalos diferentes a los del Ciclo sencillo. En este caso las presiones pueden variar de 0 a 220 bar a la entrada de la turbina y de 0 a 20 bar a la salida. La temperatura a la entrada de la turbina puede variar de 0 a 650 °C.

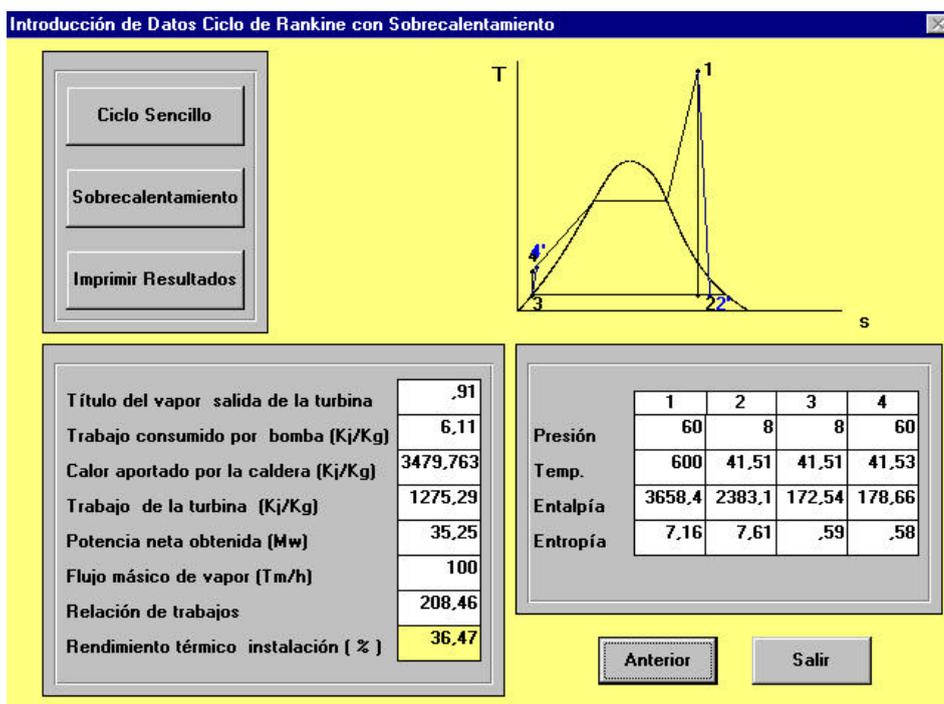
De igual forma que en el Ciclo Sencillo, es posible cambiar los rendimientos isoentrópicos de la turbina y de la bomba, como se muestra en la Ilustración 11.

Una vez aceptados los datos introducidos, comienza el proceso de cálculo paso a paso, de una forma similar al caso de Ciclo de Rankine sin sobrecalentamiento, realizando la representación gráfica del ciclo con sobrecalentamiento en un Diagrama T-s.

En el ejemplo que se muestra en la Ilustración 12, se ve el proceso y la tabla de resultados, en este caso, con rendimientos isoentrópicos inferiores a la unidad, tanto en la bomba como en la turbina.

Debe resaltarse el hecho de la obtención de resultados paso a paso, debiéndose pulsar el botón "Continuar" a cada paso.

Los resultados y la forma en que se obtienen es similar a la del Ciclo Sencillo. En la Ilustración 13 se muestra la pantalla de resultados final en el caso del ciclo con



sobrecalentamiento.

Ilustración 13.- Pantalla de resultados final

Al igual que en el caso anterior, el programa analiza los valores obtenidos y, en caso necesario, permite corregir los datos.

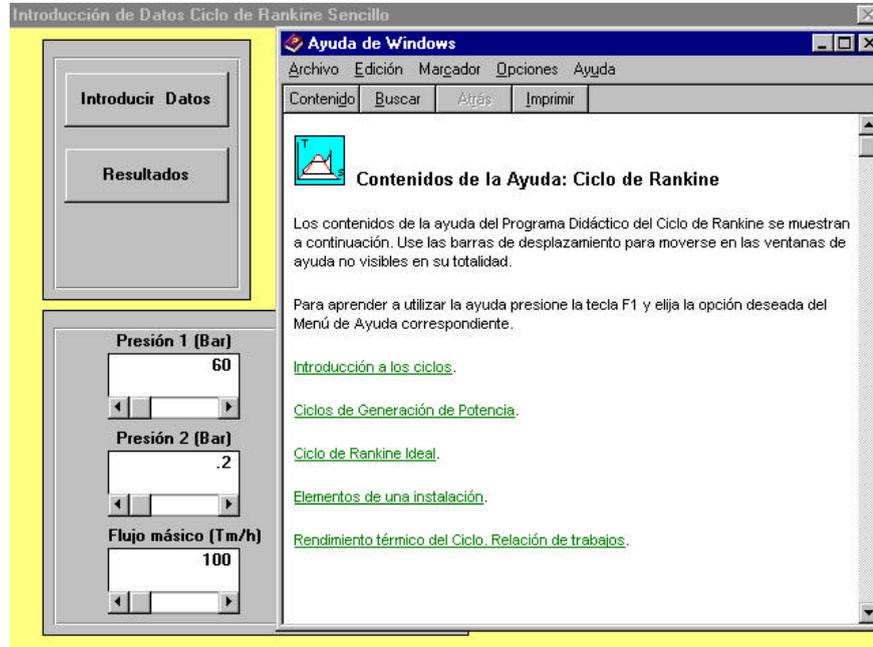
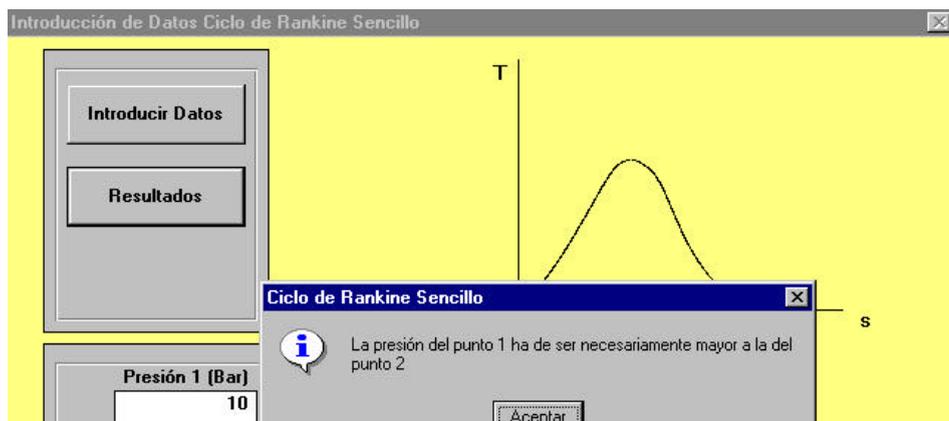


Ilustración 14.- Sistema de ayuda

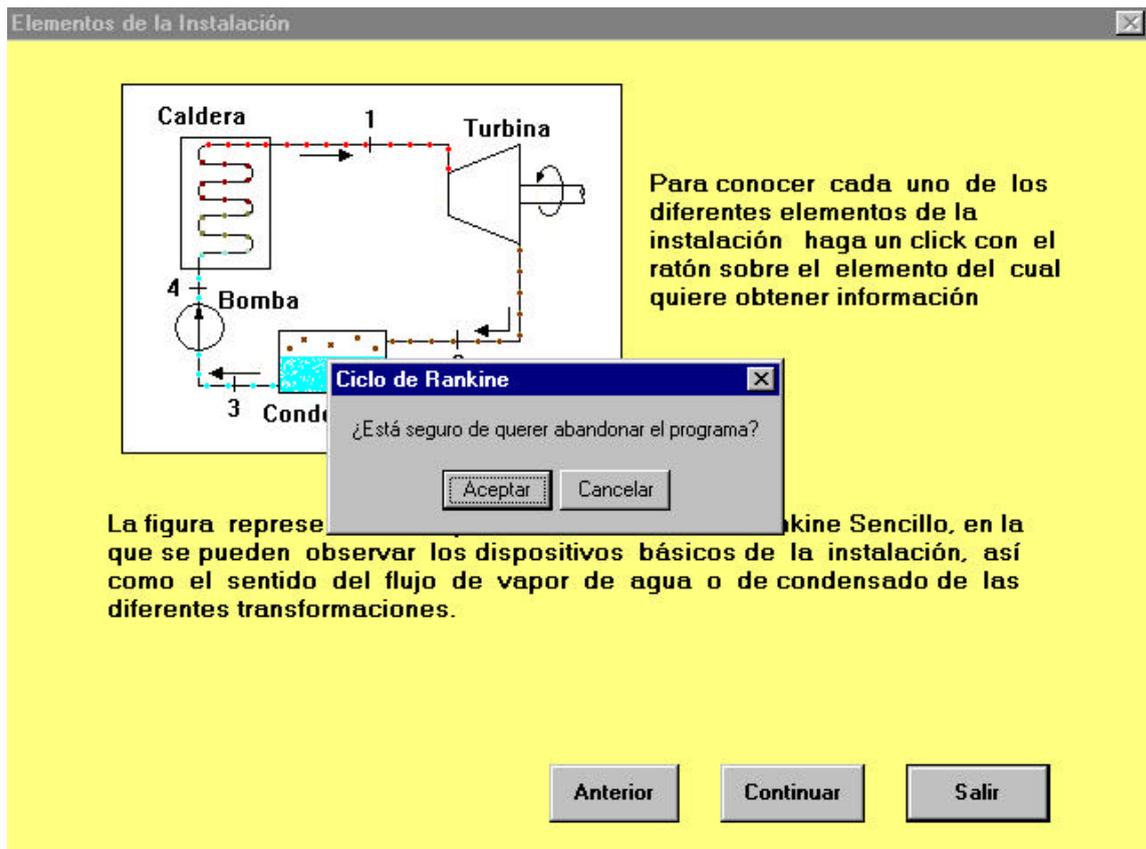
### 3. Sistema de Ayuda.

El sistema de ayuda del programa se divide en dos partes. Por una parte el sistema de ayuda de contenidos mediante el cual es posible consultar y aprender cualquier tema relacionado con el Ciclo de Rankine, su fundamento teórico, etc. Ésta ayuda incluye un índice de materias relacionadas con el tema a partir del cual es posible localizar fácilmente los temas, materias y conceptos necesarios siendo preceptivo para poder utilizar convenientemente el programa. Un ejemplo puede verse en la Ilustración 14.

Paralelamente a lo anterior, y para facilitar al máximo el rodaje del programa, se dispone de un sistema de ayuda formal, que se compone de ayudas puntuales de funcionamiento del programa que van apareciendo conforme se utiliza el programa. Ésta ayuda se muestra mediante pequeñas cajas de diálogo o informativas, las cuales indican la forma en la que se debe utilizar los distintos controles de cada pantalla, como ya se ha mencionado en el caso de la introducción de datos.



*Ilustración 15.- Mensaje informativo*



La figura representa el Ciclo de Rankine Sencillo, en la que se pueden observar los dispositivos básicos de la instalación, así como el sentido del flujo de vapor de agua o de condensado de las diferentes transformaciones.

Ilustración 16.- Abandonar el programa

#### 4. Otras Cuestiones.

Durante todo el desarrollo del programa, pueden aparecer diferentes avisos en caso de que los datos introducidos no sean correctos, la opción elegida no sea conveniente, etc. En la Ilustración 15 se muestra uno de los mencionados avisos.

La versatilidad del programa permite que, en cualquier momento, pulsando la opción "Salir" se puede abandonar la ejecución del programa, debiendo ser refrendada esta opción pulsando el botón "Aceptar" que se ve en la Ilustración 16.

(<sup>1</sup>.) Visual Basic V 3.0 Microsoft Corporation 1993