



**Departament de Física  
i Enginyeria Nuclear**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



**TALLER SIMULADOR :**

**SIMULADOR CONCEPTUAL DE CENTRAL NUCLEAR  
(NERG-ETSEIB-UPC)**

**Operación de la central nuclear de agua a presión  
Principio de funcionamiento del reactor nuclear de fisión**

**Javier Dies, Carlos Tapia, Francesc Puig, David Villar**

## ÍNDICE

<b>1. PRESENTACIÓN DEL SIMULADOR CONCEPTUAL DE CENTRAL NUCLEAR</b>	
<b>SIREP 1300 .....</b>	<b>3</b>
1.1. PRESENTACIÓN DEL MODELO DEL SIMULADOR.....	3
1.1.1. Organización del modelo.....	3
1.1.2. Temas principales de simulación.....	3
1.1.3. Elementos y sistemas incluidos en el modelo.....	4
1.2. REPRESENTACIONES SINÓPTICAS DEL COMPORTAMIENTO .....	5
1.2.1. Representación general de la planta .....	5
1.2.2. Representación del reactor.....	7
1.2.3. Representación del presionador .....	8
1.2.4. Representación del generador de vapor.....	9
1.2.5. Representación de la turbina.....	10
1.2.6. Pantalla de trazado de curvas .....	11
<b>2. OPERACIÓN DE LA CENTRAL DE AGUA A PRESIÓN. PRINCIPIO DE</b>	
<b>FUNCIONAMIENTO DEL REACTOR NUCLEAR DE FISIÓN.....</b>	<b>12</b>
2.1. CONCEPTOS CLAVE.....	12
2.2. DESCENSO DE POTENCIA DEL REACTOR COMO CONSECUENCIA DE UN DESCENSO EN LA	
DEMANDA DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	12
2.2.1. Introducción.....	12
2.2.2. Estado inicial del reactor.....	13
2.2.3. Operaciones .....	14
2.2.4. Cuestiones.....	15
2.2.5. Tablas de toma de datos .....	16
2.3. PARADA DE URGENCIA DEL REACTOR .....	18
2.3.1. Introducción.....	18
2.3.2. Estado inicial del reactor.....	18
2.3.3. Operaciones .....	19
2.3.4. Cuestiones.....	19
2.3.5. Tablas de toma de datos .....	20
2.4. CUESTIONES Y PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA PRÁCTICA.....	22

# 1. Presentación del Simulador Conceptual de Central Nuclear

## SIREP 1300

### 1.1. Presentación del modelo del simulador

En este apartado se presentan las características principales del modelo del simulador SIREP 1300. Este modelo corresponde al de una central nuclear tipo PWR de cuatro lazos y 1300 MWe.

#### 1.1.1. Organización del modelo

El modelo del simulador está organizado en tres módulos distintos que se encargan de diferentes aspectos de la simulación. Los módulos son los siguientes:

- NEUTRO: Modelización del núcleo y del transporte de boro.
- MODELIX: Modelización de los circuitos termohidráulicos (excepto primario), de los circuitos eléctricos y de la instrumentación de control.
- DRAC: Modelización termohidráulica del circuito primario.

#### 1.1.2. Temas principales de simulación

Algunos de los principales temas de simulación contemplados en el modelo son los siguientes:

- Interacciones primario-secundario
- Aumentos y disminuciones de nivel
- Grandes transitorios (parada automática del reactor)
- Física del núcleo

### 1.1.3. Elementos y sistemas incluidos en el modelo

El modelo incluye:

- Una representación muy detallada de la neutrónica, del presionador y del generador de vapor (concebido como un solo lazo equivalente al conjunto).
- Una representación de los elementos y sistemas siguientes:
  - Circuito primario
  - Sistema de control químico y volumétrico
  - Sistema de refrigeración de emergencia
  - Circuito de aportación de boro
  - Circuito secundario de vapor
  - Turbina
  - Alternador
  - Condensador
  - Circuito de agua de alimentación de los generadores de vapor
  - Sistema de alimentación de seguridad de los generadores de vapor

Teniendo en cuenta su finalidad esencialmente pedagógica, que es la de presentar con claridad los principios básicos del funcionamiento de una central nuclear, la representación de un PWR (Reactor de Agua a Presión) se puede simplificar.

La simulación se limita a los circuitos principales. Al mismo tiempo se representa un sólo lazo, ya que el comportamiento de todos ellos es muy similar excepto en el caso de desequilibrios particulares que no se estudian aquí.

El dominio de validez del modelo cubre todo el dominio de funcionamiento de la central desde la parada en frío hasta el funcionamiento a plena potencia.

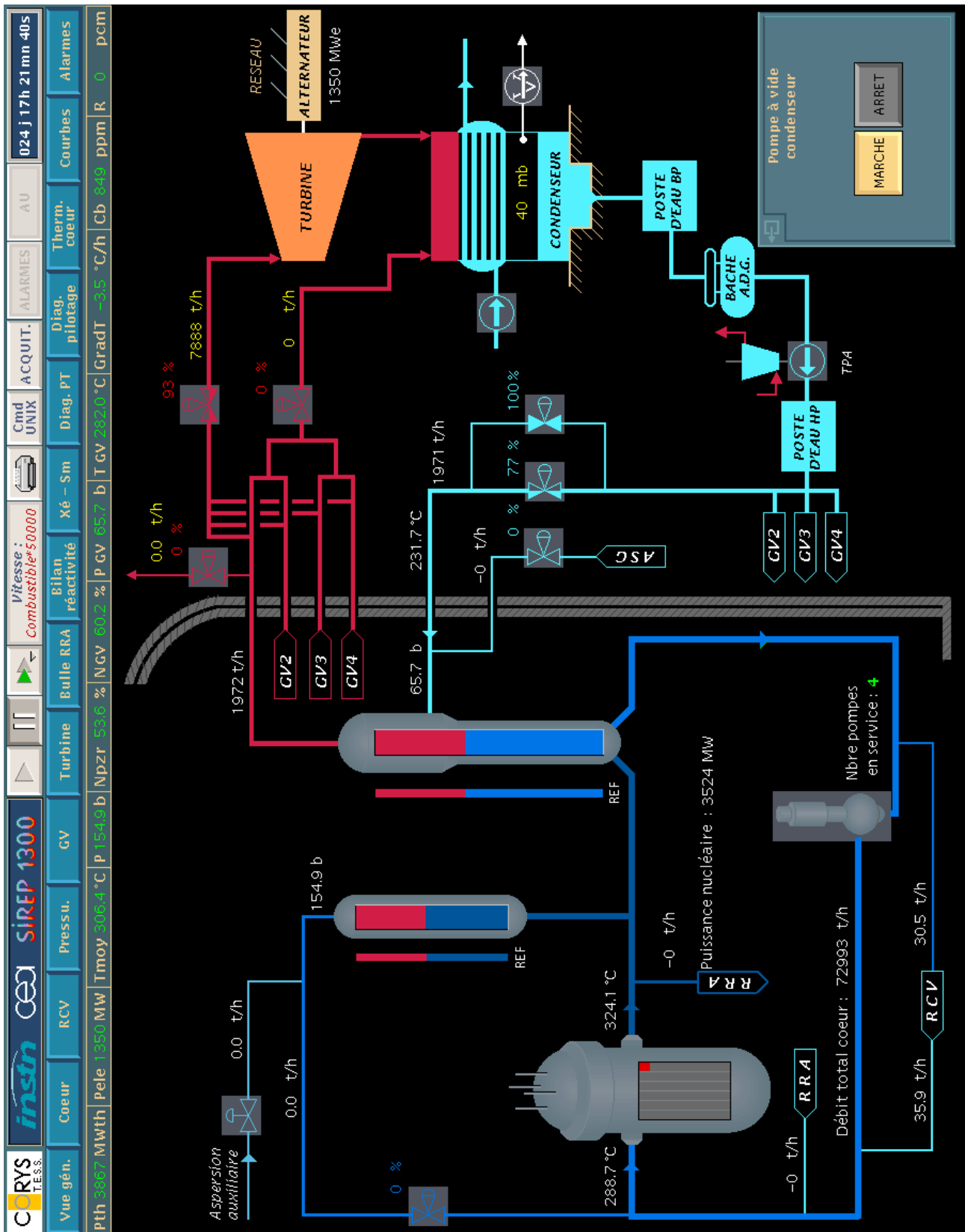
## 1.2. Representaciones sinópticas del comportamiento

Para permitir una visualización óptima de los diferentes parámetros durante la simulación, el usuario tiene a su disposición diferentes pantallas sinópticas de los diferentes sistemas, parámetros y fenómenos de la planta. Estas representaciones son también interactivas, permitiendo al usuario actuar fácilmente sobre múltiples elementos y sistemas. Algunas de las pantallas ilustrativas que presenta el simulador, de interés para el desarrollo de la presente práctica, son las siguientes:

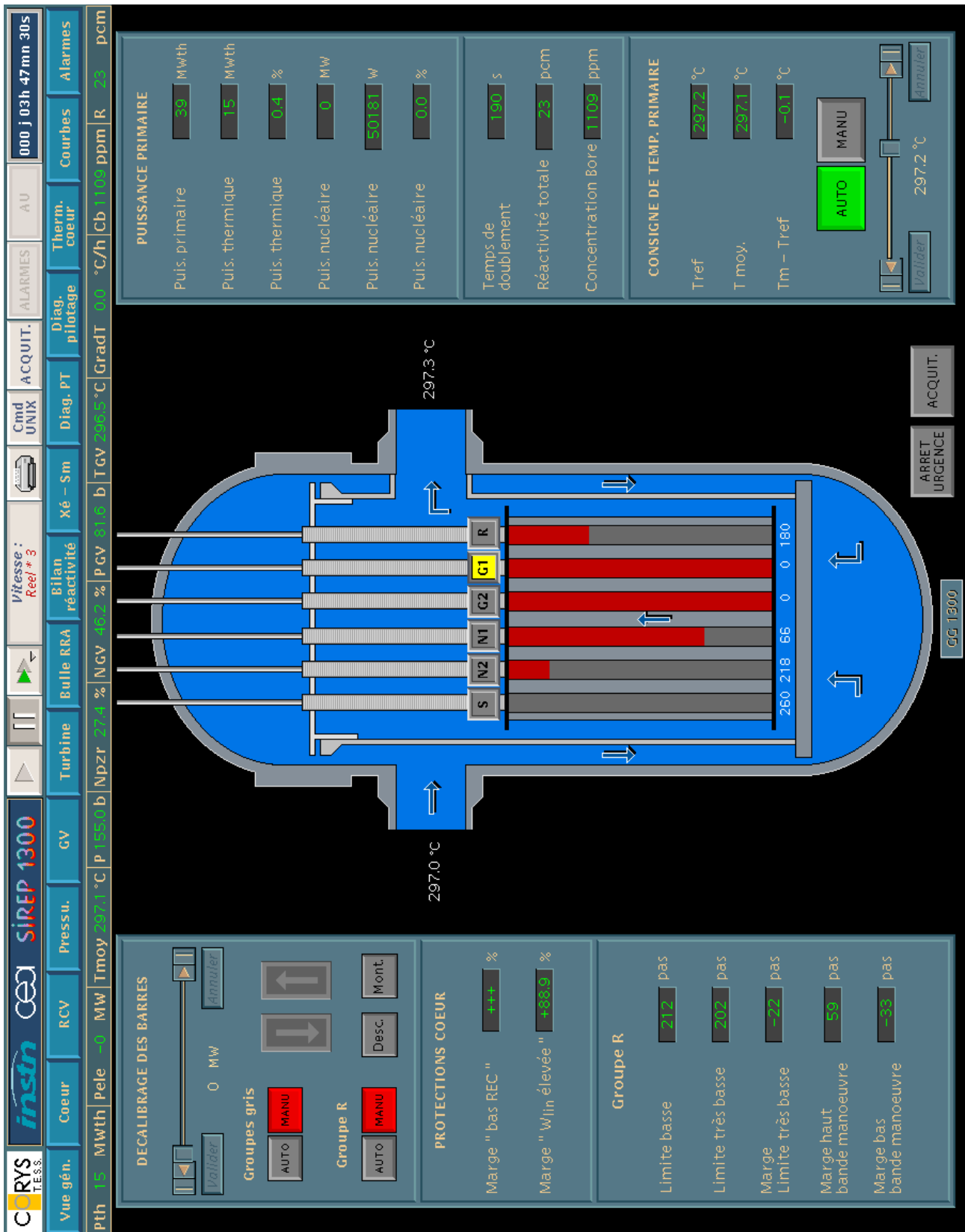
- Pantalla de instructor
- Vista general de la planta, circuito primario y secundario (reactor, presionador, generador de vapor, bombas, turbina, alternador, condensador y circuito de agua de alimentación)
- Reactor (vasija, núcleo y barras de control)
- Presionador (calentadores y aspersion principal y auxiliar)
- Generador de vapor (incluyendo líneas de vapor y agua de alimentación)
- Turbina (incluyendo secundario y sistema eléctrico y auxiliar)
- Pantalla de trazado de curvas de la evolución de las distintas variables
- Cuadro de alarmas

Todas las pantallas descritas anteriormente, y que conforman parte de la interfase gráfica del simulador se presentan a continuación en forma de figuras.

### 1.2.1. Representación general de la planta



### 1.2.2. Representación del reactor

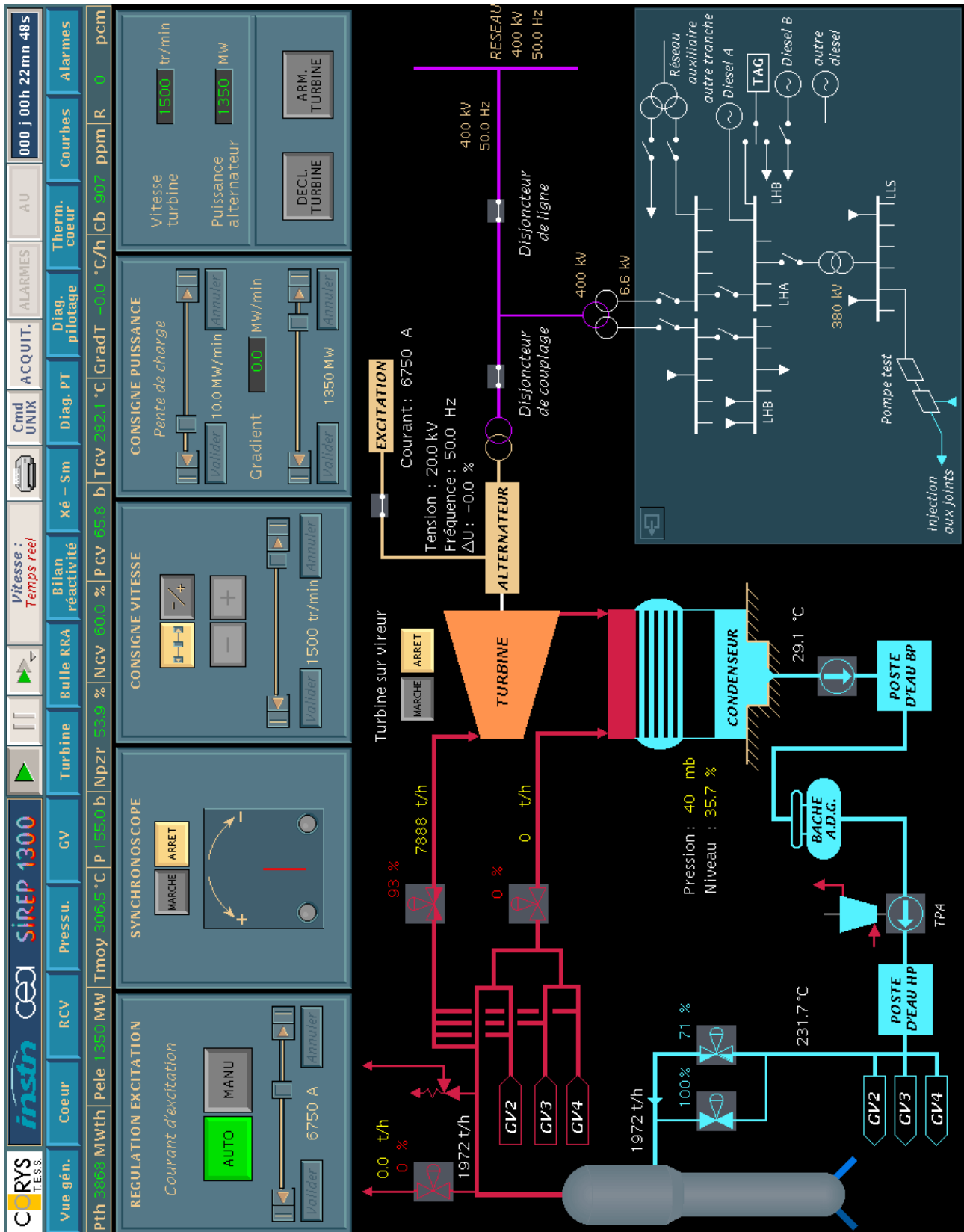




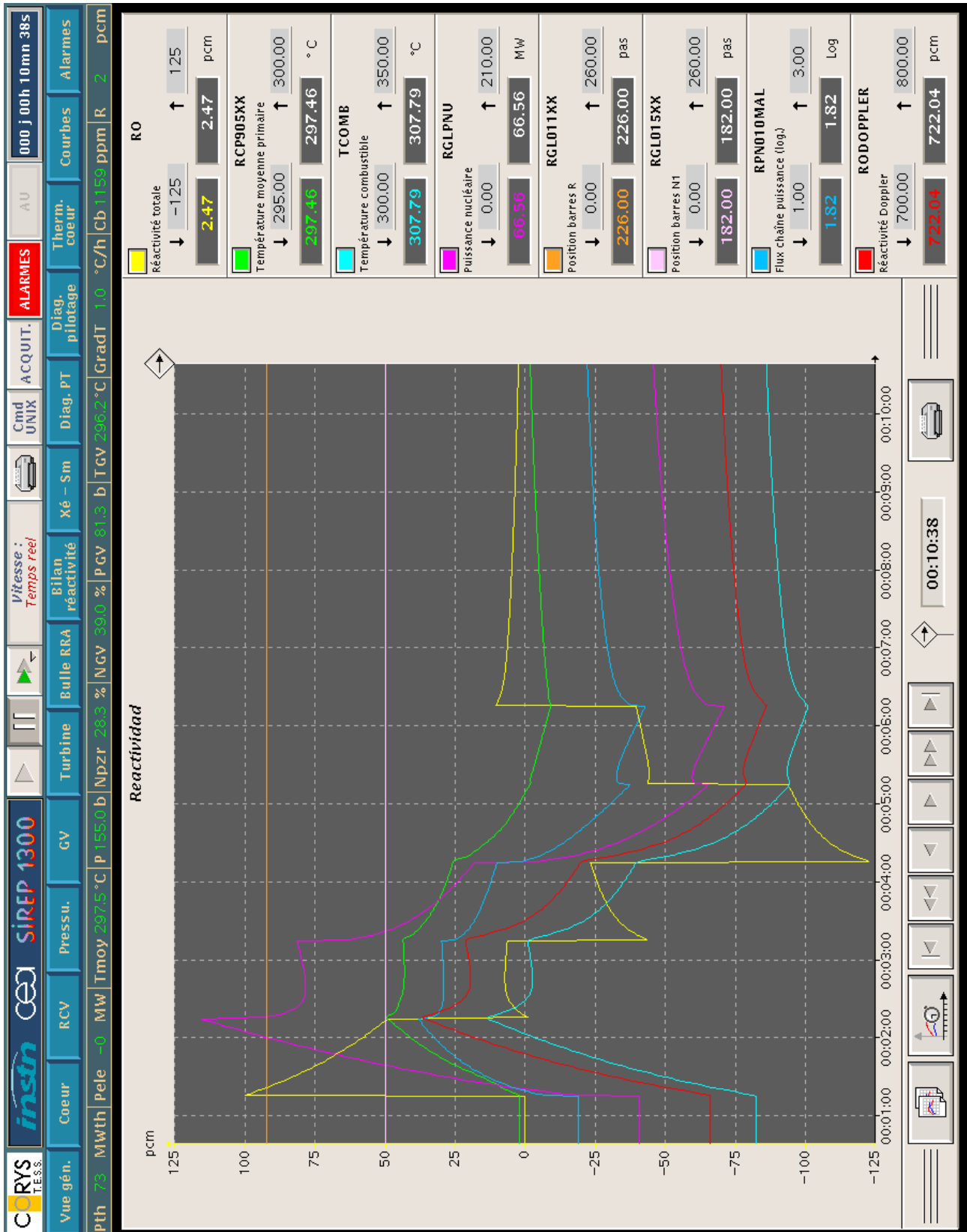




### 1.2.5. Representación de la turbina



1.2.6. Pantalla de trazado de curvas



## **2. Operación de la central de agua a presión. Principio de funcionamiento del reactor nuclear de fisión.**

### **2.1. Conceptos clave**

Central nuclear. Reactor nuclear. Conversión de energía. Potencia nuclear. Control de la reacción nuclear de fisión. Sistemas de control del reactor (barras de control y seguridad). Realimentación.



### **2.2. Descenso de potencia del reactor como consecuencia de un descenso en la demanda de producción de energía**

#### **2.2.1. Introducción**

La regulación general de la planta requiere la adquisición de datos (sensores), su comparación con valores de consigna y la actuación de sistemas electrónicos, eléctricos, hidráulicos, neumáticos, para llevar al sistema al estado deseado. El principio de la regulación de la central indica que el reactor debe seguir la demanda de carga (potencia) de la turbina y, a su vez, la turbina la demanda de energía de la red eléctrica. Únicamente si se superan los valores de consigna establecidos para proteger el reactor, el reactor debe parar y, por consiguiente, en este caso la turbina y el alternador deben actuar en función de esta situación.

En esta primera experiencia se procederá a reducir el nivel de carga de la turbina de forma que el reactor se vea obligado a descender su nivel de generación de potencia mediante la actuación del sistema de control del reactor (inserción parcial automática de algunos grupos de barras de control).

### 2.2.2. Estado inicial del reactor

En primer lugar será necesario cargar el estado correspondiente al *Standard 9* del simulador. Para ello, en la pantalla del instructor presionar sobre  y escoger *Standard*. A continuación seleccionar en la lista el estado *Standard 9* y cargarlo pulsando sobre  ubicado en la barra superior. Este estado corresponde al reactor en operación al 100% de potencia nominal, estable (crítico) a final de ciclo.


Se debe observar la fenomenología de generación y transformación de la energía nuclear, desde el interior del combustible hasta la salida de la central en los transformadores eléctricos.

Analizar el estado inicial de la planta. Anotar los datos en las tablas 2.2 a 2.5. Las variables que describen el estado de la planta pueden encontrarse en las siguientes pantallas:


- Vista general de la planta (*Vue gén.*): caudal impulsión de las bombas primarias.
- Reactor nuclear (*Coeur*): potencia nuclear, potencia térmica, posición de barras, reactividad total, temperatura de entrada y salida del refrigerante.
- Presionador (*Pressu.*): presión del circuito primario, nivel y potencia calorífica de los calentadores.
- Generador de vapor (*GV*): caudal del lado primario, temperatura de entrada y salida del agua, caudal de alimentación, caudal y presión de vapor.
- Turbina (*Turbine*): abertura de la válvula de admisión, caudal de vapor turbinado, abertura de la válvula de desvío al condensador, caudal de vapor desviado, presión y nivel del condensador, temperatura de salida del condensador, potencia eléctrica generada.
- Balance de reactividad (*Bilan Réactivité*): reactividad de barras.

Para seguir la evolución de la planta se propone visualizar las siguientes variables:

- *Puissance thermique primaire*
- *Puissance électrique*
- *Température combustible*
- *Température moyenne primaire*
- *Position barres G1*
- *Position barres G2*
- *Position barres R*
- *Réactivité totale*

Estas variables han sido preparadas en la plantilla *descenso pot.* Para poder visualizar la evolución de las variables en la pantalla de representación de variables se debe clicar sobre  situado en la pantalla *courbes* y escoger la plantilla *descenso pot.*


Para visualizar con mayor claridad las variables puede resultar interesante modificar los valores del eje de ordenadas clicando directamente sobre ellos e introduciendo el nuevo valor.

Para cambiar la escala de tiempo clicar sobre  situado en la parte inferior de la pantalla. Introducir los nuevos valores de rango de tiempo y paso de la rejilla. Antes de cerrar la ventana es necesario apretar *Enter* para validar los cambios.

### 2.2.3. Operaciones

Implementación de la reducción de la demanda de energía eléctrica. Se procederá a demandar un descenso de *1350 MWe* de potencia eléctrica a *1100 MWe* con una velocidad de *-70 MWe/min.*



Para llevarlo a cabo, seguir los siguientes pasos:

1. Activar la simulación clicando sobre  ubicado en la parte superior de cualquier pantalla.
2. Localizar el cuadro *Consigne Puissance* situado en la pantalla *Turbine*.
3. Establecer mediante el selector *Pente de charge* la tasa de descenso indicada ( $70 \text{ MWe/min}$ ). Es necesario validar la acción.
4. Indicar la potencia eléctrica final deseada ( $1100 \text{ MWe}$ ). Es necesario validar. A partir de este momento puede observarse como empieza a disminuir la potencia eléctrica al ritmo fijado.

Se puede comprobar el descenso de potencia térmica en el reactor a través del sistema automático de control de barras. Las barras de control, que contienen material absorbente de neutrones, se introducen lentamente en el núcleo del reactor. Obsérvese el solapamiento que existe entre los diversos grupos.

*Nota:* Durante el proceso se activará un aviso en la pantalla de alarmas inducido por la salida del grupo de barras R del intervalo de maniobra.

Una vez alcanzado el nivel de potencia eléctrica final dejar estabilizar el sistema.

Clicando sobre  y  se puede parar y continuar la simulación respectivamente.

#### 2.2.4. Cuestiones

Analizar el estado final alcanzado. Comentar el estado de la central con relación a la producción de energía eléctrica. Anotar los datos en las tablas 2.2 a 2.5.

Comentar la evolución de la potencia del reactor y la reactividad que ha actuado sobre el mismo durante el transitorio. Comprobar la reactividad que ha introducido el sistema de barras y el efecto de realimentación de reactividad intrínseco del sistema.

### 2.2.5. Tablas de toma de datos

Tabla 2.2.- Variables referentes al reactor nuclear

<b>Variables</b>	<b>Estado inicial</b> t = 0	<b>Estado final</b> t = minutos
<b>Potencia reactor</b> Potencia nuclear (MW) Potencia térmica (MWth)		
<b>Central</b> Potencia eléctrica (MWe)		
<b>Barras</b> Reactividad barras (pcm) Posición R (pasos) Posición G1 (pasos) Posición G2 (pasos) Posición N1 (pasos) Posición N2 (pasos) Posición S (pasos)		

Tabla 2.3.- Variables referentes al sistema primario

<b>Sistema primario</b>	<b>Estado inicial</b> t = 0	<b>Estado final</b> t = minutos
<b>Reactor</b> T entrada (°C) T salida (°C) Presión (bar)		
<b>Presionador</b> Nivel (%)		



Calentadores (kW)		
<b>Bombas en operación</b> Caudal total (t/h)		

Tabla 2.4.- Variables referentes a los generadores de vapor

Generador de vapor	Estado inicial t = 0	Estado final t = minutos
<b>Lado primario</b> Caudal agua (t/h) T entrada (°C) T salida (°C)		
<b>Lado secundario</b> Caudal alimentación (t/h) Caudal vapor (t/h) Presión vapor (bar)		

Tabla 2.5.- Variables referentes al sistema secundario

Sistema secundario	Estado inicial t = 0	Estado final t = minutos
<b>Turbina</b> Válvula admisión (%) Presión (bar) Caudal vapor (t/h)		
<b>Desvío condensador</b> Válvulas (%) Presión (bar) Caudal de vapor (t/h)		
<b>Condensador</b> Presión (mb) Nivel (%) Potencia residual (MW)		

## 2.3. Parada de urgencia del reactor

### 2.3.1. Introducción

Como se ha comentado anteriormente, la planta debe responder en aquellas situaciones en que exista alguna desviación de los parámetros del reactor respecto a los de consigna. En esta experiencia, consistente en provocar la parada de emergencia manual del reactor, los sistemas de la planta deben actuar en función de la nueva situación.


### 2.3.2. Estado inicial del reactor

En primer lugar, con la simulación parada, será necesario volver a cargar y activar el estado correspondiente al *Standard 9* del simulador de la forma en que se describe en el apartado 2.2.2. El estado corresponde al reactor en operación al 100 % de potencia nominal, estable (crítico) a final de ciclo.

En este caso, para seguir la evolución de la planta se propone visualizar las variables siguientes:



- *Puissance thermique primaire*
- *Puissance nucleaire*
- *Puissance électrique*
- *Flux chaîne puissance (log)*

Estas variables han sido preparadas en la plantilla *parada emerg*. Para poder visualizar la evolución de las variables en la pantalla de representación de variables se debe clicar

sobre  situado en la pantalla *courbes* y escoger la plantilla *parada emerg*.

### 2.3.3. Operaciones

Producir una parada manual de emergencia del reactor. Realizar los siguientes pasos:

1. Activar la simulación clicando sobre  ubicado en la parte superior de cualquier pantalla.
2. Para producir la parada únicamente se debe pulsar sobre  (*arret urgence*) situado en la pantalla de representación del reactor (*coeur*).

Inmediatamente después a esta operación se debe observar la caída por gravedad de todos los grupos de barras (control y seguridad). La inserción rápida de las barras produce una rápida reducción de la potencia nuclear, pero puede observarse que la potencia térmica que se continúa generando sigue siendo importante incluso minutos después de la parada. Dejar evolucionar el sistema unos 5 minutos aproximadamente.

### 2.3.4. Cuestiones

Analizar el estado final alcanzado. Comentar el estado de la central con relación a la producción de energía eléctrica. Anotar los datos de las variables en las tablas 2.6 a 2.9. Comentar la evolución de la potencia nuclear y potencia térmica del reactor.

### 2.3.5. Tablas de toma de datos

Tabla 2.6.- Variables referentes al reactor nuclear

<b>Variables</b>	<b>Estado inicial</b> t = 0	<b>Estado final</b> t = minutos
<b>Potencia reactor</b> Potencia nuclear (MW) Potencia térmica (MWth)		
<b>Central</b> Potencia eléctrica (MWe)		
<b>Barras</b> Reactividad barras (pcm) Posición R (pasos) Posición G1 (pasos) Posición G2 (pasos) Posición N1 (pasos) Posición N2 (pasos) Posición S (pasos)		

Tabla 2.7.- Variables referentes al sistema primario

<b>Sistema primario</b>	<b>Estado inicial</b> t = 0	<b>Estado final</b> t = minutos
<b>Reactor</b> T entrada (°C) T salida (°C) Presión (bar)		
<b>Presionador</b> Nivel (%) Calentadores (kW)		
<b>Bombas en operación</b> Caudal total (t/h)		

Tabla 2.8.- Variables referentes a los generadores de vapor

Generador de vapor	Estado inicial $t = 0$	Estado final $t =$ minutos
<b>Lado primario</b> Caudal agua ( $t/h$ ) T entrada ( $^{\circ}C$ ) T salida ( $^{\circ}C$ )		
<b>Lado secundario</b> Caudal alimentación ( $t/h$ ) Caudal vapor ( $t/h$ ) Presión vapor ( $bar$ )		

Tabla 2.9.- Variables referentes al sistema secundario

Sistema secundario	Estado inicial $t = 0$	Estado final $t =$ minutos
<b>Turbina</b> Válvula admisión (%) Presión ( $bar$ ) Caudal vapor ( $t/h$ )		
<b>Desvío condensador</b> Válvulas (%) Presión ( $bar$ ) Caudal de vapor ( $t/h$ )		
<b>Condensador</b> Presión ( $mb$ ) Nivel (%) Potencia residual ( $MW$ )		



## 2.4. Cuestiones y problemas relacionados con la práctica

- 1) Describir los tres sistemas esenciales de la central nuclear de producción y conversión de energía. Indicar los rendimientos de los procesos.
- 2) ¿Cómo se genera la potencia térmica en el reactor nuclear?