

# ANÁLISIS PROSPECTIVO DE CENTRALES NUCLEARES DE GENERACIÓN IV BASADAS EN CICLOS DE BRAYTON INDIRECTOS

**Autor: López Álvarez, Rodrigo**

Directores: Herranz Puebla, Luis Enrique

Linares Hurtado, José Ignacio

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

La demanda de energía eléctrica creciente en todo el mundo es un problema que debe afrontarse intentando lograr un panorama energético sostenible y respetuoso con el medio ambiente. El protocolo de Kyoto y las políticas medioambientales penalizan cada vez más las emisiones contaminantes a la atmósfera. Por lo tanto, la energía nuclear es una opción a tener en cuenta, dado que no presenta emisiones. En la actualidad, se están llevando a cabo una serie de estudios sobre nuevos tipos de centrales nucleares, más seguras y eficientes, que se han agrupado bajo el término de Generación IV.

Entre esta nueva generación de centrales, se encuentra la que incorpora un reactor del tipo PBMR (Pebble Bed Modular Reactor) o reactor modular de lecho de bolas. En este proyecto se modela y analiza un tipo de planta compuesta por dos ciclos de Brayton cerrados, utilizando helio como fluido de trabajo en ambos.

El ciclo principal o primario atraviesa el reactor recogiendo el calor desprendido por el combustible nuclear y lo transmite al ciclo de potencia a través de un intercambiador de placas con aletas planas denominado intercambiador principal o IHX. El ciclo se cierra con una bomba que recupera las pérdidas de carga sufridas en el resto de equipos.

El ciclo de potencia consta de dos etapas de compresión interrefrigeradas, un regenerador donde se precalienta antes de llegar al intercambiador principal, donde recoge el calor del ciclo principal, una fase de expansión en tres etapas, la segunda fase del regenerador y un prerrefrigerador que devuelve al gas a las condiciones iniciales. El esquema de planta se da en la figura 1, y se denomina CICTX.

Las hipótesis principales sobre las que se ha trabajado han sido las siguientes:

- El gas entra al ciclo de potencia a 28 °C, y alcanza una presión de 80 bar.
- En el circuito primario el gas entra al reactor a 80 bar y sale a 900 °C.
- El IHX y el regenerador han sido modelados como intercambiadores de placas con aletas planas, y dimensionados para alcanzar una eficiencia del 95%, y unas pérdidas de presión de 0,32 bar. Se ha modelado en este intercambiador la transmisión de calor y las pérdidas de carga.

- El reactor se ha modelado como un lecho de bolas para evaluar la pérdida de carga.
- El interrefrigerador y el prerrefrigerador son intercambiadores de carcasa y tubos, definidos con la misma eficiencia y pérdidas de carga del 2%.
- Las turbinas presentan un rendimiento isentrópico de  $\eta_T = 92\%$ .
- Los compresores presentan un rendimiento isentrópico de  $\eta_C = 90\%$ .
- No se han considerado fugas ni caídas de presión en tuberías.

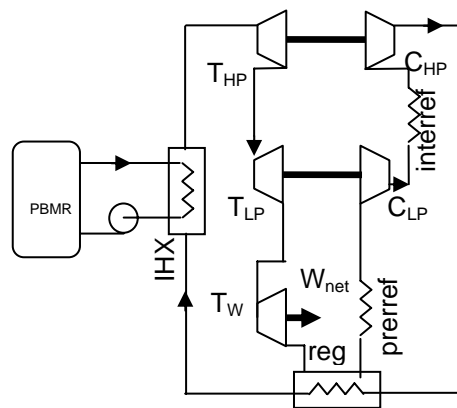


Fig 1: Esquema del ciclo CICHTX

Para analizar los resultados, se han usado las ecuaciones básicas de rendimiento de la central, rendimiento del ciclo de Carnot equivalente, y se han analizado las irreversibilidades, tanto internas como externas.

El ciclo obtenido presenta un rendimiento global del 51,4% y desarrolla una potencia neta de 200 MWe (fig 2) en su punto de relación de presiones óptimo ( $r = 2,396$ ). Se ha comparado este ciclo con uno equivalente de 3 etapas de compresión y 4 de turbina ( $C(IC)^2HTX$ ), y se han obtenido resultados ligeramente mejores, pero semejantes.

Un análisis económico realizado presenta la planta como viable económicamente, con un VAN de 1045 M€ y una TIR de 27,52 %. El período de retorno es de 9 años. Los resultados económicos del ciclo  $C(IC)^2HTX$  son ligeramente mejores, aunque no parecen compensar la pérdida en simplicidad del ciclo.

El parámetro  $\beta$  representa la relación entre flujos másicos de ambos circuitos. Dejando fijo el gasto másico del primario, se puede variar el gasto del ciclo de potencia a través de este parámetro. Este seguimiento de carga (fig 3) ha mostrado que, bajando el gasto en el ciclo de potencia, se puede obtener regulación de la potencia de salida sin pérdidas de rendimiento. Sin embargo para valores de  $\beta$  pequeños (gastos grandes en el ciclo de

potencia) se necesita reducir el gasto para obtener mayores potencias, ya que las irreversibilidades dificultan el funcionamiento del ciclo para flujos grandes.

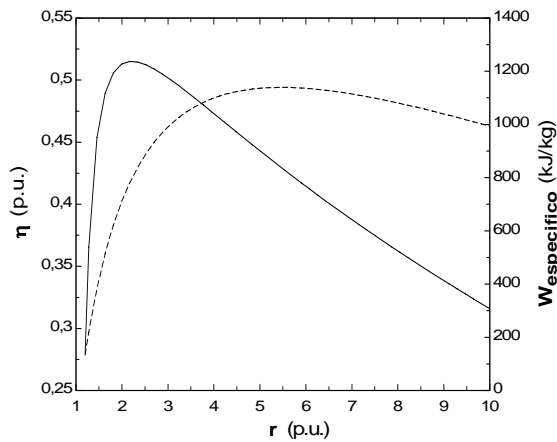


Fig 2: Rendimiento – potencia vs  $r$

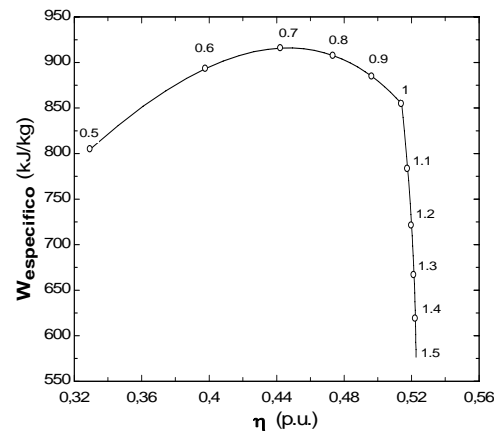


Fig 3: Potencia vs rendimiento según  $\beta$

Para obtener los factores más relevantes en el funcionamiento del ciclo y su rendimiento, se ha realizado un análisis de sensibilidad, que ha mostrado que el factor más influyente es la temperatura de salida del reactor. También son cruciales las pérdidas de carga en los equipos, y los rendimientos de las turbinas y la eficiencia del regenerador.

Un análisis de la posible evolución de las tecnologías demuestra que con futuras mejoras en los equipos y materiales se pueden obtener rendimientos más altos (superiores al 60%) y resultados económicos todavía más rentables.

Finalmente, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El ciclo CICH<sub>2</sub>TX parece el más apropiado frente al C(IC)<sup>2</sup>HTX. Las ligeras mejoras que presenta el segundo ciclo, tanto técnicas como económicas no parecen una ventaja frente a la mayor simplicidad del primer ciclo.
- Los equipos mecánicos son un factor fundamental en el funcionamiento del ciclo. Las eficiencias y los rendimientos, así como las pérdidas de carga son muy relevantes para conseguir rendimientos altos en la planta.
- La configuración analizada permite, tanto técnica como económicamente, operar a carga parcial sin perder rendimiento, con lo que se mantiene la rentabilidad relativa (PR, TIR y coste de producción), aunque la absoluta (VAN) se resienta, pese a ser siempre positiva. Este comportamiento puede ser importante en plantas modulares para aplicaciones descentralizadas, o incluso para aplicaciones de transporte naval.

# PROSPECTIVE ANALYSIS OF THE APPLICATION OF INDIRECT BRAYTON CYCLES TO HIGH TEMPERATURE REACTORS OF “GENERATION IV” NUCLEAR SYSTEMS

**Author: López Álvarez, Rodrigo**

Directors: Herranz Puebla, Luis Enrique  
Linares Hurtado, José Ignacio

## SUMMARY

The increasing demand of electrical energy all around the world is a problem that must be confronted trying to obtain a sustainable and environment-respectful energetic model. The protocol of Kyoto and environmental policies penalize the polluting emissions to the atmosphere. Therefore, the nuclear energy is an option to consider, since it does not present this kind of emissions. At present, a series of studies is being carried out on new types of nuclear power stations, safer and more efficient, and they have been grouped under the term of Generation IV.

Out of this new generation of power stations comes the one that incorporates a reactor of type PBMR or Pebble Bed Modular Reactor. In this project a plant which incorporates two closed Brayton cycles is modelled and analyzed, using Helium as work fluid in both.

The main or primary cycle goes through the reactor gathering the heat released by the nuclear fuel and transmits it to the power cycle through a fin-plate exchanger denominated IHX. The cycle closes with a pump that recovers the suffered pressure drops in the rest of equipment.

The power cycle consists of two intercooled stages of compression, a recuperator where the gas is preheated before arriving at the main exchanger, where it gathers the heat of the main cycle, a phase of expansion in three stages, the second phase of heat recuperation and a precooler that returns the gas to its initial conditions. The plant scheme is shown in figure 1, and is denominated CIGHTX.

The main hypotheses adopted are the following:

- Inlet temperature to compression island has been set to 28°C, and maximum pressure is set to 80 bar.
- Outlet reactor temperature and inlet reactor pressure are set to 900 °C and 80 bar respectively.
- Recuperator and Intermediate Heat Exchanger have been modelled as plate-fin heat exchangers, and scaled to reach an effectiveness of 95%, and pressure drops of 0.32 bar. Heat transmission and pressure drops at these exchangers have been modelled.
- The reactor has been modelled as a pebble-bed in order to evaluate pressure drops.

- Intercooler and precooler are tube-and-shell exchangers, scaled with the same efficiency (95%) and pressure drops of 2%.
- Isentropic efficiencies of compressors have been set to 90%.
- Isentropic efficiencies of turbines have been set to 92%.
- Pressure drop along lines has been considered negligible.

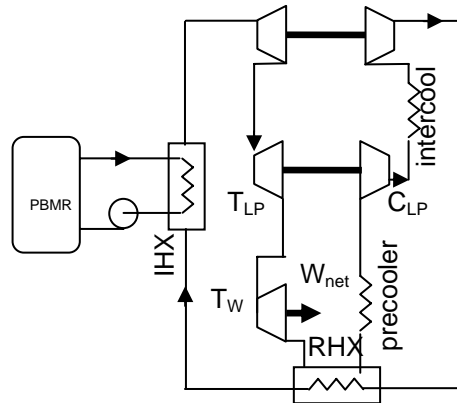


Fig 1: C(IC)²HTX layout

In order to analyze the results, basic equations of efficiency have been applied, net efficiency, first an second law efficiencys, and irreversibilidades, internal as much as external have been analyzed.

The resulting cycle presents a global efficiency of 51.4% and a net power of 200 MWe (fig 2) in its optimal point of pressure ratio ( $r = 2.396$ ). The cycle has been compared to an equivalent one but which incorporates 3 stages of compression and 4 turbines (C(IC)<sup>2</sup>HTX), and slightly better but similar results have been obtained.

The economic analysis presents a economically sustainable plant, with VAN of 1045 M€ and TIR of 27.52%. The return period of inversion is 9 years. The economic results of the C(IC)<sup>2</sup>HTX cycle are slightly better, although they do not seem to compensate the loss in simplicity on the layout.

The  $\beta$  parameter represents the mass flows relation between both circuits. Fixing the mass flow on the primary cycle, the power cycle flow can be altered by changing the value of this parameter. These follow-load studies (fig 3) have shown that, lowering the mass flow through the power cycle, a regulation on the output power is obtained without efficiency drop. Nevertheless for small values of  $\beta$  (great mass flows through

the power cycle) it is needed to reduce the cost in order to obtain a higher net power, since irreversibilities make cycle performance difficult for such flow.

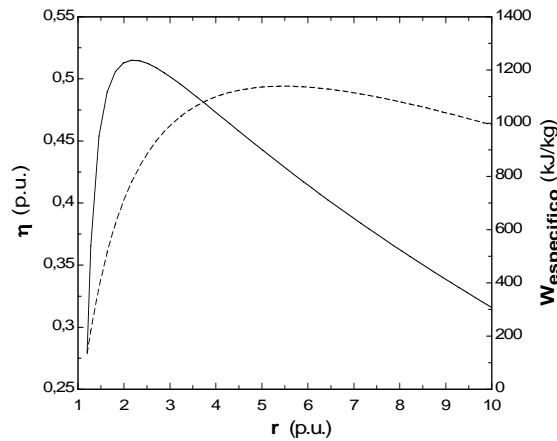


Fig 2: Efficiency and Net power vs  $r$

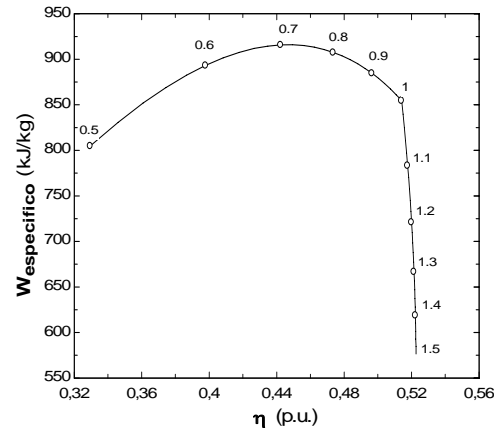


Fig 3: Net power vs  $\eta$  at different mass flow rate ratios

A sensitivity analysis has shown that the most influential factor on efficiencies is the outlet reactor temperature. Pressure drops on devices and turbine and recuperator efficiencies are also of great importance.

An analysis of the possible evolution of technologies demonstrates that with future improvements on equipments and materials higher efficiencies can be obtained (over 60%), and economic profitable results as well.

Finally, the following conclusions are obtained:

- Cycle CIGHTX seems the most appropriate. The light improvements that the second cycle presents, technical as much as economic do not seem an advantage as the greater simplicity of the first cycle.
- Mechanical equipments are a fundamental factor in the cycle performance.
- Efficiencies as well as pressure drops are also a key factor to obtain high efficiencies in the plant.
- The analyzed configuration allows, as much technical as economically, to operate in charge without losing efficiency, but although the relative economics stay (PR, TIR and production cost), the absolute one (VAN) is lowed, although it remains positive. This behavior can be important in modular plants for decentralized applications, or even for applications of naval transport.