

SELECCIÓN Y VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE CENTRALES NUCLEARES DE MUY ALTA TEMPERATURA. PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO Y SEGUIMIENTO DE CARGA.

Autor: Galbally Herrero, Carlos

Directores: Herranz Puebla, Luis Enrique; Linares Hurtado, José Ignacio

Entidad Colaboradora: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

La demanda energética en el futuro requerirá de fuentes de generación sostenibles. La optimización de ciclos de potencia se ha convertido en un elemento clave para explotar los recursos naturales de una manera más racional, minimizar la generación de residuos y, como consecuencia, reducir el coste de combustible. Por ello, la Tecnología Nuclear está desarrollando sistemas innovadores de producción de energía nuclear que, conjuntamente, se denominan “sistemas de Generación IV”. Todos ellos, particularmente el llamado Reactor de Muy Alta Temperatura (VHTR, *Very High Temperature Reactor*), están concebidos para alcanzar rendimientos termodinámicos mucho más elevados que la presente generación de centrales nucleares (rendimientos habituales del 33-36%).

Este proyecto investiga la idoneidad técnica y económica de diversas configuraciones de ciclos de Brayton enmarcados en los parámetros de funcionamientos esperados en un VHTR, particularmente en el denominado PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) cuyo primer prototipo entrará en funcionamiento en Sudáfrica en 2012. Caben destacar dos aspectos concretos profusamente explorados en el proyecto: la inclusión de un recalentamiento basado en la extracción directa del reactor, siendo este un análisis nuevo y original para este tipo de reactores, y el posible acoplamiento de un ciclo de producción de hidrógeno por electrólisis de alta temperatura.

El proyecto se divide en tres partes: selección de configuraciones, análisis comparativo detallado y acoplamiento de generación de H₂. La primera analiza diez configuraciones distintas de ciclos de potencia, donde las principales variaciones son el número de ejes para la turbomaquinaria y la presencia o ausencia de interrefrigerador y recalentador. La segunda parte se centra en la comparación de las dos mejores configuraciones encontradas, haciendo especial hincapié en las posibilidades de operación que ofrece el recalentamiento. Por último, sobre el modelo más flexible de

todos los estudiados se analiza el efecto que tiene añadir un ciclo de generación de hidrógeno, alimentado por la propia energía eléctrica generada en la planta.

Las hipótesis de partida han sido: el Helio (He) se ha tratado como un gas ideal con calor específico constante ($c_p=5.193$ kJ/kg-K; $\gamma =1.67$); la temperatura de entrada a la isla de compresión se ha fijado en 30°C; la temperatura y la presión de salida del reactor se han fijado en 1173 K y 90 bar respectivamente; la refrigeración se realiza con agua de una torre de refrigeración que opera con aire a 25°C (temperatura seca), humedad relativa del 50% y 101.3 kPa. El acercamiento de temperatura húmeda es de 5°C. Las eficiencias y pérdidas de carga en los equipos principales se han tomado de los valores habituales de la literatura y la caída de presión en la vasija del reactor se ha modelado por medio de la ecuación de Ergun, asignándosele al mismo una potencia térmica de 500MW.

Las hipótesis económicas han sido: vida de operación de 60 años. La inversión de equipos se ha llevado a cabo empleando la metodología de El-Sayed y se han empleado costes normalizados para evaluar los principales indicadores económicos. La inversión del reactor ha sido obtenida aplicando la metodología de El-Sayed a partir de la inversión total declarada para el reactor PBMR de ESKOM. El coste resultante es de 733 \$/kWe (586 €/kWe); la inflación y el precio de la electricidad se han fijado al valor en España para 2006, 3% y 87.55 €/MWh respectivamente.

El análisis se ha basado en variantes de las tres opciones existentes para VHTR: GT-HTR (ciclo de un solo eje), GT-MHR (ciclo de un solo eje interrefrigerado) y PBMR (ciclo de tres ejes interrefrigerado) que han sido comparadas desde una perspectiva termodinámica y económica. Se ha llevado a cabo un estudio previo de cada configuración para determinar el gasto másico (\dot{m}) y relación de presión (r) que arroja el máximo rendimiento (η_{max}) para un reactor de 500MWt.

Las ecuaciones termodinámicas y económicas se han implementado en un código EES. Los principales resultados pueden glosarse como sigue:

- La inter-refrigeración eleva sustancialmente el rendimiento, alcanzándose en las configuraciones de 1 y 3 ejes valores próximos al 51%, y reduce el gasto másico necesario para producir la misma potencia eléctrica en, aproximadamente, 10-12%. Los parámetros económicos muestran que la configuración uniaxial con inter-refrigeración tiene ventajas claras sobre las otras dos.
- El recalentamiento, basado en la utilización de una fracción (β) del gasto saliente del reactor para elevar la entalpía de la corriente gaseosa a expandir en turbina ($1- \beta$),

proporciona un método eficiente para conseguir que la central opere en seguimiento de carga sin reducción significativa del rendimiento. En las configuraciones seleccionadas (i.e., uno y tres ejes con inter-refrigeración) se ha encontrado que variaciones de β entre 0 y 0,5, producirían rendimientos superiores al 48% (a pesar de haberse encontrado el punto óptimo de β en 0,3). Por supuesto, la utilización de recalentamiento supone una disminución de la potencia producida.

- El ciclo de generación de hidrógeno, basado en la configuración uniaxial de doble extracción del reactor CICHTRTX, es muy sensible a la relación entre la electricidad suministrada al electrolizador y la total generada en el reactor (α). Aunque la cogeneración no es el modo de operación más aconsejable, el acoplamiento de ciclo de potencia y ciclo de hidrógeno otorga una gran flexibilidad a la central que podría actuar en “modo potencia” (sin producción de hidrógeno y regulando carga variando la fracción del recalentador) con elevados rendimientos y capacidad de seguimiento de carga, o en “modo hidrógeno” (sin evacuar electricidad a la red y sin funcionamiento del recalentador). La producción conjunta de H_2 y electricidad para la red podría ser recomendable en picos de demanda, donde se obtuviese una ventaja económica por un tema coyuntural de tarifas.

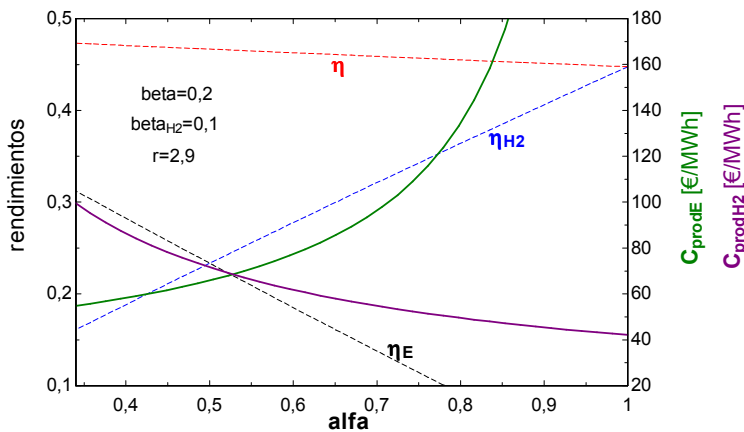


Fig. 1 η_E , η_{H_2} , η , C_{prodE} y C_{prodH_2} frente a α en la configuración de un eje CICHTRTX

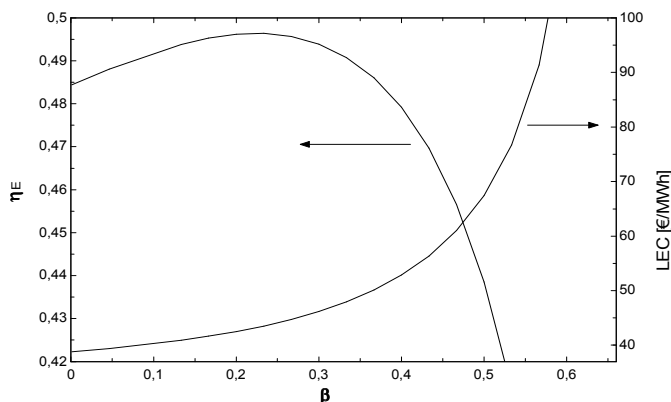


Fig. 2 η_E y LEC frente a β en CICHTRTX con planta habilitada para H_2 y solo prod. eléctrica.

THERMAL AND ECONOMICAL SELECTION AND FEASIBILITY OF VERY HIGH TEMPERATURE REACTORS. HYDROGEN PRODUCTION AND LOAD-FOLLOW OPERATION MODE.

Author: Galbally Herrero, Carlos

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

In collaboration with: ICAI - Universidad Pontificia Comillas

SUMMARY

Future world energy demand will require a sustainable energy generation system. Optimization of power cycles has become a key element to better exploit natural resources, to minimize waste production and, as a consequence, to reduce fuel cycle cost. Being aware of it, Nuclear Technology is developing what has been termed Generation IV systems. One of those concepts, the Very High Temperature Reactor (VHTR) is a promising technology that will be capable of reaching much higher thermal efficiencies than present nuclear power plants (usually 33-36% thermal efficiency).

This work investigates the thermal and economical feasibility of different direct Brayton cycles from the expected parameters in a VHTR reactor, in particular the PBMR (*Pebble Bed Modular Reactor*) the first prototype of which is expected to begin operation in South Africa in 2012. Two key aspects of this project must be pointed out: the inclusion of a regenerative reheating from a direct extraction from the reactor, being this a new and original approach for this kind of reactors, and the possibility of coupling a hydrogen production cycle based on high temperature electrolysis.

This project is divided in three different parts: selection of layouts, comparative analysis and hydrogen generation. The first part analyzes ten different layouts of power cycles, where differences are the number of turbo-machinery axes and the presence/absence of regenerative reheating and inter-cooling stages. The second part focuses on the comparison between the two best configurations found, emphasizing the different operation modes allowed by the regenerative reheating. Finally, the effect of adding a hydrogen generation unit fed by the electricity generated by the plant will be analyzed.

Technological assumptions have been: Helium (He) has been assumed to behave as an ideal gas with constant specific heat ($c_p=5.193$ kJ/kg-K; $\gamma =1.67$); Inlet temperature

to compression island has been set to 30°C; Outlet reactor temperature and pressure have been set to 1173 K and 90 bar, respectively; Cooling medium is water from a cooling tower which operates with air at 25°C (dry bulb temperature), 50% relative humidity and 101.3 kPa. Wet bulb temperature approach is 5°C; Isentropic efficiencies and pressure loss in the main equipment have been set to the values usually found in the literature and the pressure drop through the reactor vessel has been modelled by the Ergun equation; The reactor has been set to 500 MWt.

Economical hypothesis have been: Economic life assumed to be 60 years. The cost of the main equipment has been evaluated using the methodology proposed by El-Sayed and levelized costs have been used for evaluating the main economic indicators. Reactor capital investment has been indirectly derived by applying the El-Sayed methodology for the total fixed capital investment reported for the ESKOM PBMR reactor. The resulting reactor FCI is 733 \$/kWe (586 €/kWe); Inflation rate and electricity price set to Spanish value in 2006, 3% and 87.55 €/MWh, respectively.

The analysis is based in the configurations of the three existing VHTR options: GT-HTR (a single axis cycle), GT-MHR (a single axis intercooled cycle) and PBMR (a three-axis intercooled cycle). The three layouts have been compared in terms of thermodynamic and economic variables. In each layout a preliminary study has been carried out to identify the gas mass flow rate (\dot{m}) and pressure ratio (r) which result in the highest thermal efficiency (η_{\max}) for a 500 MWt reactor.

The thermodynamic equations and the economic ones have been implemented in an EES code. The main conclusions drawn from the results obtained may be summarised as follows:

- Inter-cooling enhances thermal efficiency substantially. Both the single-axis and the three-axis configurations reach values near 51%. In addition, in-compressor power saving allows for a 10-12% reduction of mass flow rate to produce the same power output. An examination of the economic parameters shows that the one-axis inter-cooled configuration results in advantages over the other options.
- Gas reheating based on using just a fraction of the gas exiting the reactor (β) to heat up the remaining $(1-\beta)$ fraction before entering the power turbine, provides an effective way to improve plant performance under load-follow operation mode. In the chosen configurations (i.e., single and three-axis inter-cooled layouts) variations

of β between 0 and 0.5 result in a thermal efficiency higher than 48% (the optimum β being 0.3). As expected, the use of a regenerative reheater results in a net power reduction.

- Hydrogen generation by high-temperature electrolysis based on a single axis configuration (CICHTRTX) is very dependent on the ratio between the electrolyzer electricity consumption and the total power output (α). Coupling of the power and the hydrogen production cycles adds flexibility to the plant. Operation in “power mode” (no hydrogen generation) results to be very efficient and capable of following load demand. Likewise, “hydrogen generation mode” (no power output to the net) shows the best performance when gas is entirely spent in it. Hence, cogeneration of hydrogen and electricity seems to be only advisable when demand peaks and there is an economic advantage due to the higher price of electricity.

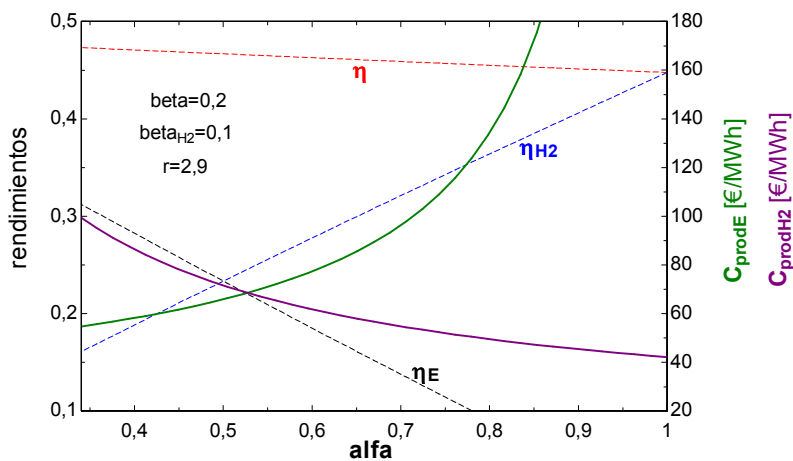


Fig. 1 η_E , η_{H_2} , η , C_{prodE} and C_{prodH_2} versus α in a single-axis CICHTRTX configuration.

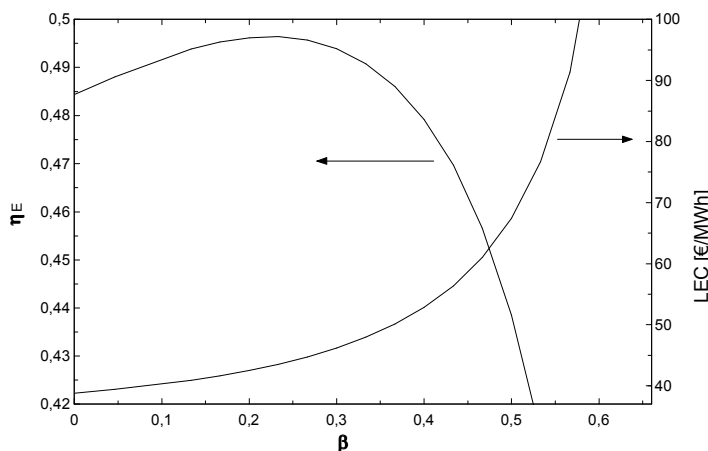


Fig. 2 η_E and LEC versus β in a single-axis CICHTRTX configuration with H_2 production capability and electricity production only.