

FUSIÓN

ANÁLISIS DINÁMICO DE UN SISTEMA DE CONVERSIÓN DE POTENCIA DE CO₂ SUPERCRÍTICO PARA DEMO MEDIANTE MODELICA

LLUÍS BATET
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
SIMONE FERRERO
LAURA SAVOLDI
POLITECNICO DI TORINO
JOSÉ IGNACIO LINARES
EVA ARENAS
ALEXIS CANTIZANO
UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

El interés en ciclos de potencia de CO₂ supercrítico ha ido en aumento en los últimos años. Dentro del programa de investigación EUROfusion (Euratom Horizon 2020), se está estudiando la conveniencia de utilizar ese tipo de ciclos en la futura planta prototipo EU-DEMO. Se ha escogido como referencia uno de los diseños realizados por Comillas en dicho programa, en concreto un ciclo con recuperación, optimizado para la envoltura regeneradora HCPB, que utiliza un sistema de almacenamiento con sales fundidas, desacoplando el funcionamiento del reactor nuclear del de la turbina.

En un futuro escenario energético, con elevada generación renovable, es deseable que las plantas de Fusión Nuclear operen de manera flexible, adaptándose a la demanda. Analizar la integración dinámica de las plantas de fusión en las redes eléctricas requerirá herramientas robustas y flexibles. Se presentan en este trabajo las capacidades de Modelica para dicha tarea. Se ha simulado el sistema de conversión de potencia de referencia con Modelica con el objetivo de comprobar la adecuación de la herramienta al objetivo de definir futuras estrategias de control. Se describe el modelo realizado y los resultados obtenidos en un transitorio de variación de carga, demostrando su potencial e interés en futuros desarrollos.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el interés en ciclos de potencia de CO₂ supercrítico ha ido en aumento. El ciclo de Brayton de CO₂ supercrítico presenta varias ventajas frente a los ciclos clásicos de Rankine (Angelino, 1968), (Liu et al., 2019), entre ellas su compacidad y la mayor eficiencia en los rangos de temperatura de funcionamiento de las plantas termosolares y nucleares. Recientemente el interés por los ciclos de CO₂ supercrítico (^sCO₂) se ha extendido a las plantas de fusión. Dentro del programa de investigación EUROfusion (Euratom Horizon 2020), se está estudiando la conveniencia de utilizar ese tipo de ciclos en la futura planta prototipo EU-DEMO (Linares et al., 2018), a partir del interés despertado en estudios anteriores dentro del programa español de fusión TECNO_FUS (Linares et al., 2011).

Para tener un encaje en futuros escenarios energéticos, con una elevada penetración de la generación renovable no despachable en las redes eléctricas, las plantas de fusión

nuclear deberán ser capaces de operar de manera flexible, reaccionando a variaciones de carga y ajustando su producción a la demanda.

En el estudio de la capacidad de operación de las plantas de fusión en dicho contexto integrado, serán necesarias herramientas de análisis dinámico robustas y flexibles. Dichas herramientas también serán útiles para apoyo a la operación y para el diseño de los sistemas de control.

La UPC ha realizado en el pasado modelos para el análisis dinámico de los ciclos de ^sCO₂ utilizando RELAP5-3D, una herramienta comercial desarrollada por el Idaho National Laboratory (Batet, 2014). Recientemente, y tras establecer una colaboración con el Politecnico di Torino, se ha explorado el uso de otras herramientas.

El presente trabajo se centra en la simulación dinámica mediante *Modelica* de uno de los ciclos de ^sCO₂ diseñados por Comillas en el marco del proyecto EUROfusion. El lenguaje *Modelica* es bien conocido en el campo del modelado de

sistemas físicos complejos sujetos a controles dinámicos (Casella y Leva, 2006). Se pretende aquí explorar las capacidades de esta herramienta en lo que se refiere al comportamiento de los ciclos de CO_2 supercrítico, incluyendo compresor, turbina e intercambiadores de calor, pero también a su utilidad en cuanto al diseño y ajuste de sistemas de control para dichos ciclos.

OBJETO DEL ESTUDIO

Para ilustrar las capacidades de *Modelica* se ha partido de un diseño del sistema de conversión de potencia para DEMO realizado dentro del programa EUROfusion. Se trata de un ciclo recuperativo de 800 MW de potencia eléctrica, diseñado para la envoltura regeneradora HCPB, pero cuya fuente de calor es un almacenamiento de sales fundidas. El foco frío del ciclo de potencia es un circuito de agua.

Con el circuito de sales la generación eléctrica queda desacoplada de la generación de calor nuclear, que en DEMO está previsto que sea pulsante, con pulsos de 2 horas seguidos de varios minutos de recuperación (Minucci et al., 2020). Además, según se ha puesto de manifiesto en estudios anteriores (Linares et al., 2016), esta realización simplifica enormemente el control de la planta de fusión: un acoplamiento directo entre el refrigerante primario y el circuito potencia haría muy difícil mantener las temperaturas de aquél dentro de la estrecha ventana de operación permitida.

El sistema de conversión de potencia está compuesto por un compresor (C), una turbina (T) y tres intercambiadores de calor (HX): *pre-cooler* (PC), recuperador de alta temperatura (HTR) e intercambiador de calor de sales fundidas (HTS), como se muestra en la Figura 1. Además de los componentes mencionados, el circuito está provisto de otros componentes menores, usados en el control: un vaso de expansión (para mantener el valor de presión deseado en la entrada del compresor) y una válvula de bypass (que conecta la salida caliente con la entrada fría del recuperador, HTR).

Los intercambiadores de calor se asumen de tipo Circuito Impreso (PCHE), suministrados por Heatric® (Southall y Dewson, 2010), compuestos por módulos de 0,6 m x 0,6 m de longitud variable, que contienen 96 000 canales semicirculares cada uno.

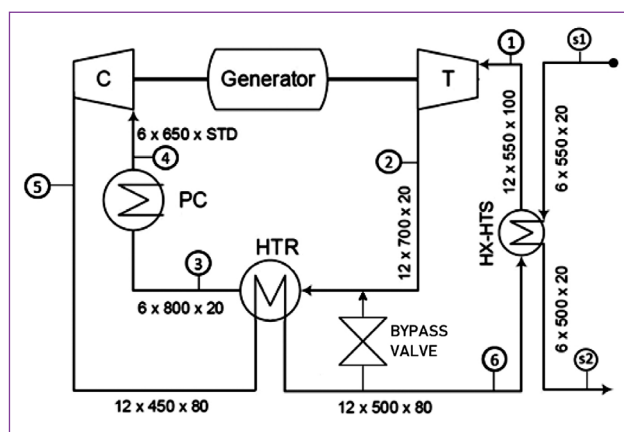


Figura 1. Esquema del ciclo termodinámico objeto de estudio (Ferrero et al. 2020).

El grupo de Comillas utilizó el Engineering Equation Solver (EES, <http://www.f-chart.com/>) para optimizar la eficiencia del ciclo termodinámico con las condiciones de contorno dadas. Los distintos estados del ciclo optimizado se detallan en la Tabla 1 y las principales magnitudes en la Tabla 2.

	Valores de diseño		Valores Modelica estado estacionario sin control		Valores Modelica estado estacionario controlado	
	T [°C]	P [bar]	T [°C]	P [bar]	T [°C]	P [bar]
1	490.0	300.0	489.7	310.3	490.0	299.7
2	343.8	85.8	341.8	87.5	344.9	87.4
3	79.6	85.4	86.4	85.8	80.9	85.7
4	35.0	85.0	35.6	85.0	35.0	85.0
5	76.6	300.8	84.2	314.2	78.6	303.6
6	262.2	300.4	264.6	313.1	264.6	302.5

Tabla 1. Puntos del ciclo termodinámico objeto de estudio: valores de diseño (optimizados con EES) y resultados obtenidos con el modelo en *Modelica*.

	Valores de diseño	Valores Modelica estado estacionario sin control	Valores Modelica estado estacionario controlado
Caudal CO_2 [kg/s]	6912	7103.8	6902.5
Eficiencia [-]	39.77%	36.78%	37.55%
Potencia del Compresor [GW]	0.24	0.30	0.26
Potencia de la Turbina [GW]	1.05	1.06	1.02
Calor intercambiado en HTR [GW]	2.18	2.14	2.18
Calor intercambiado en HTS [GW]	2.03	2.06	2.01
Calor intercambiado en PC [GW]	1.22	1.28	1.23
Caudal Sales Fundidas [kg/s]	6184.6	6184.6	6087.2
Caudal Agua [kg/s]	29297	29297	32230

Tabla 2. Principales magnitudes del sistema de conversión de potencia: valores de diseño y resultados obtenidos con *Modelica*.

DESARROLLO DEL MODELO

El modelo de *Modelica* se ha desarrollado dentro de la plataforma Dymola y se basa en la disponibilidad de las bibliotecas ThermoPower (Tiller y Casella, 2003), ExternalMedia (Casella y Richter, 2010) y SolarTherm (De la Calle et al., 2018). El esquema del modelo desarrollado se muestra en la Figura 2.

Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se han modelado considerando canales rectos de acero inoxidable 316L y contraflujo paralelo. Se ha utilizado Gnielinski para evaluar la transferencia de calor en los lados de dióxido de carbono (Chai et al., 2019) y sales fundidas, utilizando la temperatura media entre la entrada y la salida. Se propone una ecuación empírica para la transferencia de calor en agua y también para calcular la caída de presión de CO_2 en intercambiadores de calor de circuito impreso (Chu et al., 2017).

Turbomáquinas

Las turbomáquinas se han modelado utilizando tablas de rendimiento y de relación de presión en función de la velocidad relativa de rotación y el caudal normalizado; en particular, los mapas de funcionamiento de los compresores se

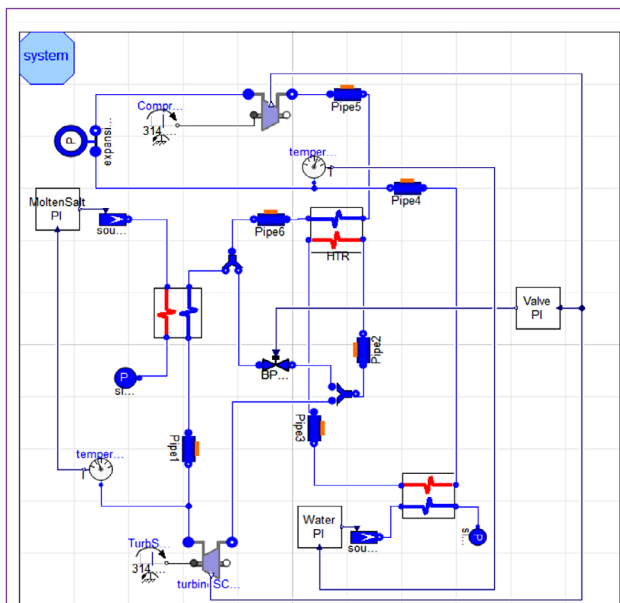


Figura 2. Esquema del modelo del sistema de conversión de potencia de $^{80}\text{CO}_2$ desarrollado en Modelica.

han determinado por el grupo de Comillas, a partir de resultados obtenidos con COMPAL (<https://www.conceptsnrec.com/>). La Figura 3 muestra las curvas de funcionamiento del compresor implementadas en el modelo.

El modelo de la turbina se ha adoptado del trabajo de Moiseyev et al. (2006).

Controladores

El sistema de control está formado por 3 controladores Proporcional-Integral (PI), que actúan respectivamente sobre los caudales de agua, sales fundidas y apertura de la válvula de bypass.

Los dos primeros PI actúan para hacer que el sistema se establezca en las condiciones nominales de funcionamiento; es decir, se han configurado con el propósito específico de regular los caudales máxicos de sal fundida y agua para fijar las temperaturas de entrada de la turbina y el compresor, respectivamente, a 490°C y 35°C .

El último controlador actúa sobre una válvula de bypass, que conecta la salida del lado caliente con la entrada del lado frío del HTR, regulando la apertura de la válvula y, en consecuencia, el caudal de CO_2 derivado por la válvula y,

consiguientemente, la potencia mecánica generada por el circuito. La válvula de bypass se mantiene cerrada mientras no hay operación a carga parcial.

RESULTADOS

Estado estacionario

El modelo se ejecutó en primer lugar en condiciones estáticas con temperaturas y caudales de sal fundida y agua fijos. Los resultados se han comparado con los de diseño (Tablas 1 y 2) para validar el modelo de Modelica frente al diseño optimizado por Comillas. Hay una buena concordancia de resultados, evidenciando la corrección de la construcción del circuito, caracterizado por un caudal de CO_2 de aproximadamente 7000 kg/s y una eficiencia del $36,83\%$.

Sin embargo, hay discrepancias menores debido a algunas diferencias entre los dos ciclos. De hecho, las caídas de presión del modelo son mayores que las consideradas en el diseño, que no tuvo en cuenta las pérdidas singulares ni las tuberías entre intercambiadores de calor. El modelo de Modelica sí que las considera. Además, las turbomáquinas simuladas operan a eficiencias menores que las consideradas en el diseño optimizado. En la Tabla 1 se pueden observar diferencias en la salida del compresor, donde se puede identificar una temperatura y presión de salida más altas con el modelo, causadas tanto por las pérdidas de presión del circuito (que obliga a trabajar a una presión más alta para mantener el caudal) como por el funcionamiento más realista de la turbomáquina.

Análisis dinámico

Las diferencias entre diseño y modelo se pueden reducir regulando los caudales máxicos de las sales fundidas (HTS) y de agua (PC), agregando dos controladores PI. Los controladores tienen como objetivo que las temperaturas de entrada a las turbomáquinas sean las de diseño. La consecución de este objetivo, a su vez, mejora la eficiencia de todo el ciclo. Las Tablas 1 y 2 también recogen los resultados en estado estacionario con ambos controles activos. Se percibe una clara mejora de la eficiencia del ciclo, que sube a $37,55\%$, respecto del caso no controlado.

Una vez que estos sistemas de control de temperatura están activos, el sistema puede soportar otros transitorios conservando las condiciones de entrada a las turbomáquinas.

Para comprobar la robustez de Modelica, se ha realizado el cálculo de un transitorio consistente en que el circuito siga un perfil de carga variable de 1 hora, que se representa en la

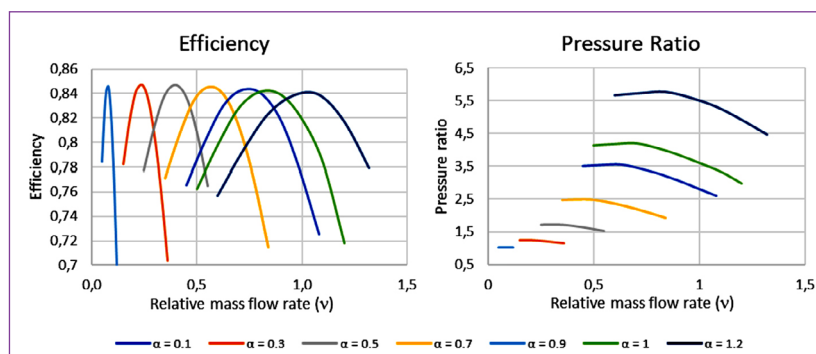


Figura 3. Curvas de funcionamiento del compresor tal como se han implementado en el modelo.

Figura 4. Se caracteriza por una primera reducción del 30% de potencia en 15 minutos, seguida de un periodo a potencia constante durante 30 minutos, finalizando con un ligero aumento de 15 minutos de duración, hasta el 85% del valor nominal.

La tarea de ajustar la potencia eléctrica producida a la solicitada la realiza el tercer controlador, que ajusta la apertura de la válvula de bypass y, en consecuencia, la potencia. En efecto, la válvula de bypass, que se ha mantenido cerrada hasta este momento, se utiliza para regular la operación a carga parcial de la planta. La vál-

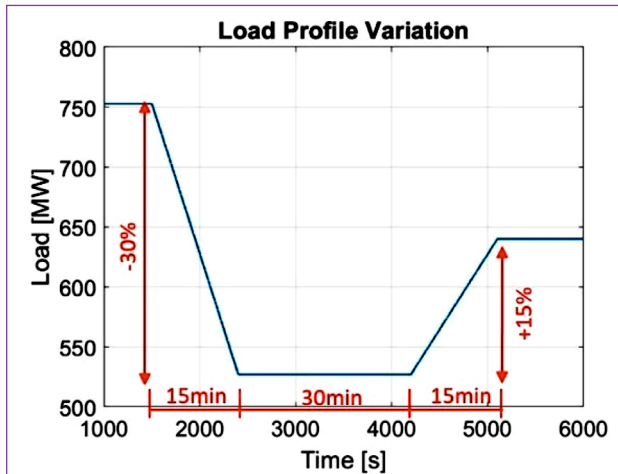


Figura 4. Perfil de carga utilizado para probar el modelo (Ferrero et al. 2020).

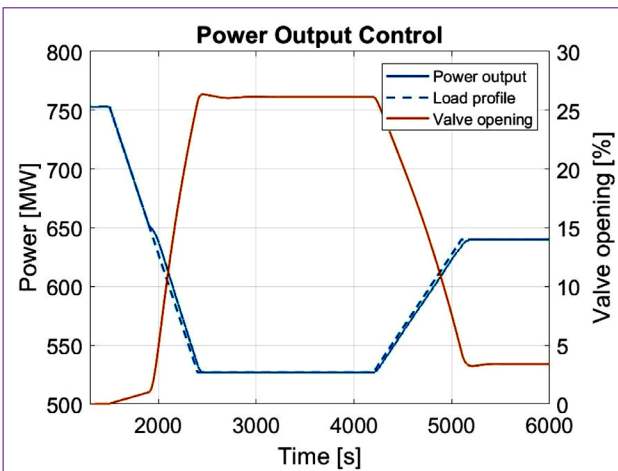


Figura 5. Potencia generada y apertura de la válvula de bypass del modelo en el transitorio de seguimiento de carga (Ferrero et al. 2020).

vula permite que el flujo evite tanto la turbina como el HTS. Carstens (2004) prefiere esta opción al bypass únicamente de la turbina.

La Figura 5 muestra la potencia generada en comparación con la requerida, observándose una buena concordancia de los valores. El sistema de control muestra una buena reactividad, sin oscilaciones apreciables y logrando seguir el perfil con precisión aceptable, teniendo en cuenta la simplicidad del sistema de control, con unos 100 segundos de retraso cuando terminan las dos rampas. La figura muestra también la apertura de la válvula de bypass durante el transitorio.

Debe recordarse que el controlador del HTS está adaptando el caudal de las sales fundidas para mantener fija la temperatura a la entrada de la turbina.

CONCLUSIONES

Con el objetivo de disponer de una herramienta versátil y robusta que permita simular el sistema de conversión de potencia de una futura planta de fusión nuclear, se ha desarrollado un modelo preliminar usando *Modelica* de un circuito de CO_2 supercrítico a partir de un diseño optimizado para DEMO realizado por Comillas. Dicha herramienta será útil para la definición futura de estrategias de control, pero también para apoyo a operación y formación de operadores.

Hasta ahora, se han desarrollado estrategias de control efectivas y precisas que permiten estabilizar la planta en estado estacionario lo más cerca posible de los puntos de diseño (teniendo en cuenta el comportamiento real de componentes como turbomáquinas, etc.) y que permiten gestionar la potencia generada en caso de demanda variable.

En perspectiva, los resultados obtenidos permiten el optimismo respecto de nuevos desarrollos y actualizaciones a circuitos y controles más complejos. Además, *Modelica* ha demostrado ser una herramienta eficaz y versátil, siendo muy adecuada para modelado de sistemas de potencia ya que permite simulaciones rápidas, precisas y estables.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo en el marco del Consorcio EUROfusion y ha recibido fondos de los programas de investigación y formación de 2014-2018 y 2019-20 de Euratom bajo el acuerdo No 633053.

REFERENCIAS

- Angelino, G., Carbon Dioxide Condensation Cycles For Power Production, *Journal of Engineering for Power*, 90 (1968) 287–295. <https://doi.org/10.1115/1.3609190>.
- Batet, L., J.M. Alvarez-Fernandez, E. Mas de les Valls, V. Martinez-Quiroga, M. Perez, F. Reventos, L.A. Sedano, Modelling of a supercritical CO_2 power cycle for nuclear fusion reactors using RELAP5–3D, *Fusion Engineering and Design*, 89 (2014). <https://doi.org/10.1016/j.fuseng-des.2014.03.018>.
- Carstens, N.A., Control Strategies for Supercritical Carbon Dioxide Power Conversion Systems, MIT, 2004. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/41295>.
- Casella, F., A. Leva, “Modelling of Thermo-Hydraulic Power Generation Processes Using Modelica”. *Mathematical and Computer Modeling of Dynamical Systems*, 12 (2006). <https://doi.org/10.1080/13873950500071082>.
- Casella, F., C. Richter, ExternalMedia: A Library for Easy Re-Use of External Fluid Property Code in Modelica Proceedings 6th International Modelica Conference. (2010).
- Chai, L., S.A. Tassou, Numerical study of the thermohydraulic performance of printed circuit heat exchangers for supercritical CO_2 Brayton cycle applications, *Energy Procedia*. 161 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.066>.
- Chu, W., X. Li, T. Ma, Y. Chen, Q. Wang, Experimental investigation on $^{\circ}\text{CO}_2$ -water heat transfer characteristics in a printed circuit heat exchanger with straight channels, *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. 113 (2017) <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2017.05.059>.
- De la Calle, A. J. Hinkley, P. Scott, J. Pye, SolarTherm: A New Modelica Library and Simulation Platform for Concentrating Solar Thermal Power Systems, *Simulation Notes Europe*, 28 (2018). <https://doi.org/10.11128/sne.28.sn.10427>.
- Ferrero, S., L. Batet, J.I. Linares, E. Arenas, A. Cantizano, L. Savoldi, A Modelica dynamic model of a supercritical CO_2 energy conversion system for EU-DEMO, 31st SOFT (2020), (enviado a *Fusion Engineering and Design*).
- Linares, J.I., L.E. Herranz, B.Y. Moratilla, I.P. Serrano, Power conversion systems based on Brayton cycles for fusion reactors, *Fusion Engineering and Design*, 86 (2011) <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.02.010>.

- Linares J.I., A. Cantizano, B.Y. Moratilla, V. Martín-Palacios, L. Batet, Supercritical CO₂ Brayton power cycles for DEMO (demonstration power plant) fusion reactor based on dual coolant lithium lead blanket, Energy. 98 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.020>.
- Linares, J.I., E. Arenas, A. Cantizano, J. Porras, B.Y. Moratilla, M. Carmona, L. Batet, Sizing of a recuperative supercritical CO₂ Brayton cycle as power conversion system for DEMO fusion reactor based on Dual Coolant Lithium Lead blanket, Fusion Engineering and Design, 134 (2018) <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.06.026>.
- Liu, Y., Y. Wang, D. Huang, Supercritical CO₂ Brayton cycle: A state-of-the-art review, Energy. 189 (2019) 115900. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115900>.
- Minucci, S., S. Panella, S. Ciattaglia, M.C. Falvo, A. Lampasi, Electrical Loads and Power Systems for the DEMO Nuclear Fusion Project. Energies 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/en13092269>.
- Moiseyev, A., K.P. Kulesza, J.J. Sienicki, Control system options and strategies for supercritical CO₂ cycles. ANL-GenIV-081 (2006). <https://doi.org/10.2172/958037>.
- Southall, D., S.J. Dewson, Innovative Compact Heat Exchangers, Proceedings of ICAPP '10, San Diego, (2010) <https://www.heatric.com/app/uploads/2018/04/Innovative-compact-heat-exchangers.pdf>
- Tiller, M., F. Company, U. Dearborn, H. Tummescheit, U. Hartford, F. Casella, A. Leva, Modelica open library for power plant simulation: Design and experimental validation, Proceedings. 3rd Modelica Conference. (2003).■