

CICLOS DE BRAYTON CON CO₂ PARA CENTRALES TERMOSOLARES

LINARES HURTADO, José Ignacio ⁽¹⁾; MARTÍN PALACIOS, Víctor ⁽¹⁾

linares@dim.icaei.upcomillas.es

⁽¹⁾Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería - ICAI, Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas

RESUMEN

Las centrales termosolares de concentración son una tecnología renovable de gran potencial, pero para que mejoren su competitividad es preciso que la eficiencia del bloque de potencia mejore, aprovechando al máximo el rango de temperatura disponible en el foco caliente. Una de las tecnologías más prometedoras es la de torre, que permitiría alcanzar temperaturas del fluido caloportador de 700 °C.

Los ciclos de Brayton con CO₂, tanto en condiciones supercríticas como en transcríticas, han sido propuestos para centrales termosolares de concentración. Dichos ciclos han sido ampliamente estudiados para centrales nucleares de IV generación y de fusión. Recientemente, el Departamento de Energía de Estados Unidos ha planteado la iniciativa SunShot donde aborda, entre otros aspectos, el empleo de ciclos de CO₂ supercríticos para centrales de torre.

El presente artículo investiga la aplicación de ciclos Brayton de CO₂ regenerativos en configuración simple (supercrítica y transcrítica) y de recompresión (supercrítica). Se optimizan los parámetros clave para maximizar la eficiencia en función de los rangos de temperatura actuales y de medio plazo en centrales termosolares, para luego comparar las soluciones óptimas con objeto de analizar la viabilidad técnica de su aplicación a las diferentes tecnologías termosolares. La aplicación más clara se da para centrales de torre, donde se podrían alcanzar rendimientos alrededor del 40% con el estado actual de la tecnología, llegando hasta el 50% cuando en el absorbedor se alcancen 700°C.

Palabras clave: Central Termosolar, ciclos Brayton con CO₂, ciclos supercríticos.

1. Introducción

La temperatura del foco caliente de las centrales termosolares actuales viene dada por la tecnología de concentración empleada (colectores cilindro-parabólicos o receptor central) y por el fluido térmico empleado para llevar el calor del absorbedor hasta el bloque de potencia. Así, en las centrales de colectores cilindro-parabólicos el aceite térmico empleado en la actualidad permite alcanzar 390°C, mientras que en el medio plazo el empleo de sales fundidas como fluido caloportador permitiría alcanzar 550°C; en las centrales de torre (receptor central) las sales empleadas en la actualidad permiten alcanzar 560°C, esperándose lograr 700°C en el medio plazo [1]. Estas temperaturas han hecho que hasta el momento el bloque de potencia se haya desarrollado mediante ciclos de Rankine. Recientemente, el Departamento de Energía de los Estados Unidos ha lanzado la iniciativa *SunShot* [2], donde aborda diferentes tecnologías para el bloque de potencia de centrales termosolares, apostando entre ellas por los ciclos de Brayton que emplean CO₂.

Los ciclos Brayton que emplean CO₂, especialmente cuando éste se encuentra en estado supercrítico, han sido ampliamente estudiados como bloques de potencia para reactores nucleares de fisión de IV generación [3] y de fusión [4] alcanzando rendimientos competitivos con temperaturas intermedias del foco caliente. Existen también estudios sobre la aplicación de este tipo de ciclos a centrales termosolares [5]. Si bien los ciclos Brayton con CO₂ propuestos normalmente para estas aplicaciones emplean el fluido en condiciones supercríticas, existen algunos trabajos [6] que consideran también configuraciones transcriticalas.

Entre las ventajas de los ciclos Brayton de CO₂ supercrítico a las centrales termosolares se encuentra su elevada compacidad, que permitiría ubicar el bloque de potencia en el propio receptor central de una instalación de torre [7]. Ambos factores (bloque de potencia compacto y reducida longitud de tuberías) dan a este tipo de ciclos una respuesta dinámica muy adecuada ante las variaciones de la radiación solar [8].

En esta comunicación se analizan las prestaciones (rendimiento y trabajo específico) de diversas configuraciones de ciclos Brayton con CO₂ para centrales termosolares. Se consideran tres temperaturas de entrada en turbina, representativas de la tecnología actual y de su evolución en el medio plazo (tanto en centrales de colectores cilindro-parabólicos como de torre). En cuanto a las configuraciones de los ciclos, se considera un Brayton regenerativo clásico (en configuración transcriticala y supercrítica) y uno de recompresión. Se analiza la respuesta en condiciones nominales, completándose el estudio con un análisis de sensibilidad a los parámetros más significativos.

2. Metodología

Se han considerado dos configuraciones para el ciclo Brayton: CBTX y C²BTX². La primera es un ciclo Brayton regenerativo clásico (Figura 1), habiéndose considerado la versión transcriticala (presión de aspiración del compresor por debajo de la crítica) y la supercrítica (presión de aspiración del compresor por encima de la crítica). Debido a las variaciones del calor específico del CO₂ con la presión cerca del punto crítico resulta más efectivo dividir el regenerador en dos intercambiadores (uno de alta temperatura, RAT y otro de baja, RBT). La Figura 2 ilustra esta disposición, denominada de recompresión, donde se ve que la corriente caliente a la salida del regenerador de baja temperatura se divide en dos corrientes de modo que la principal (1- α) se dirige al prerrefrigerador y la secundaria (α) se dirige al compresor auxiliar, sin haberse enfriado. De este modo la corriente principal recorre la rama fría del RBT, mientras que por la caliente circula todo el flujo másico. Con eso se puede conseguir el equilibrado del RBT al compensar el mayor calor específico de la corriente fría (a presión elevada) con un menor flujo. En el regenerador de alta temperatura, al estar más lejos del punto crítico, los dos calores específicos se asemejan más, con lo que no se requiere esta división de flujo. La Figura 3 muestra la evolución del calor específico del CO₂ en el intervalo de temperaturas de interés en el prerrefrigerador y los dos regeneradores. Se observa que en el prerrefrigerador el calor específico es muy elevado, fruto de la proximidad al punto crítico.

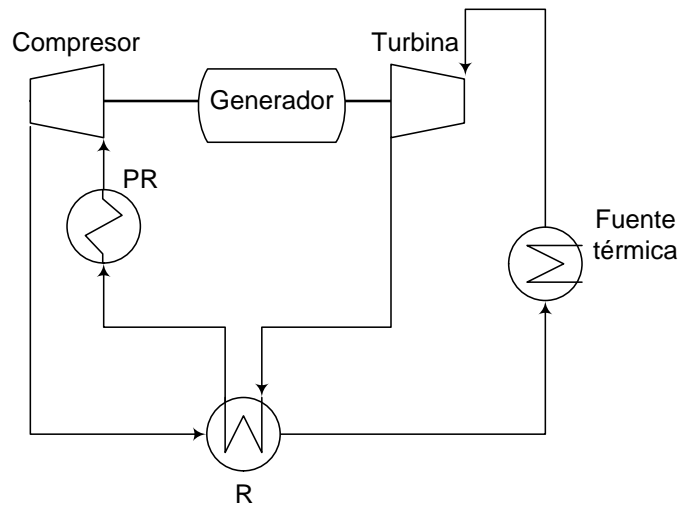
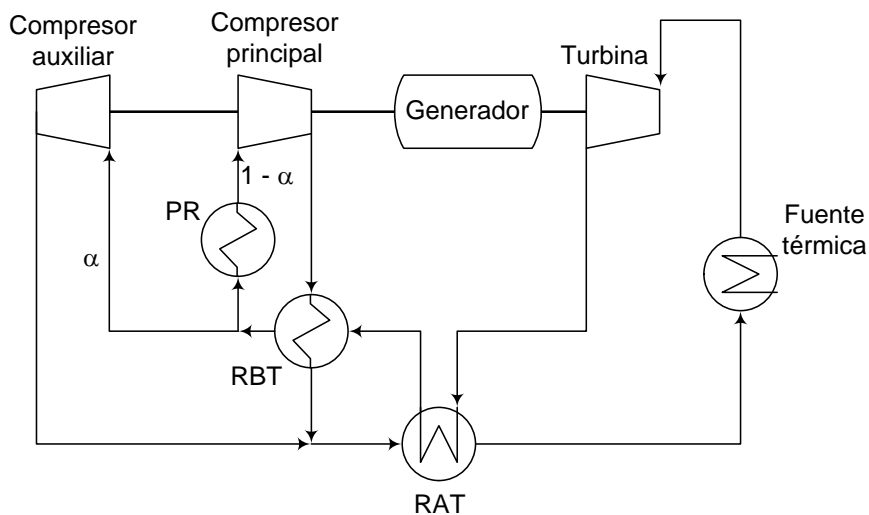


Figura 1: Configuración CBTX.

Figura 2: Configuración C²BTX².

La fracción de flujo (α) que puentea el compresor principal es una variable que puede emplearse para optimizar el rendimiento de la planta. En la Figura 4 se comprueba que el rendimiento se maximiza para la fracción tal que permite que el RBT trabaje de modo equilibrado, es decir, con el mismo acercamiento en ambos extremos. Se ha tomado un acercamiento mínimo de temperaturas en los extremos de los regeneradores de 5 °C en el ciclo CBTX y de 10 °C en el C²BTX². En este ciclo es frecuente que el punto de estrangulación del RBT ocurra dentro del mismo, en vez de en los extremos, debido a la proximidad del punto crítico. Se ha comprobado que dicho punto nunca fuese inferior a 5 °C.

Se ha considerado la disipación de calor mediante aerocondensador, por lo que la temperatura del CO₂ a la salida del prerrefrigerador se ha tomado de 50 °C. La presión a la salida del prerrefrigerador se ha tomado de 85 bar en los ciclos supercríticos y de 50 bar en el transcrito. La presión a la entrada de la turbina de 225 bar (en ciertos análisis se ha fijado la presión de salida del prerrefrigerador y se ha variado la presión de salida del compresor principal). Las pérdidas de presión en los intercambiadores se han tomado de 40 kPa. Para la temperatura a la entrada de la turbina se han considerado

tresescenarios: 390 °C (representativo de tecnología cilindro-parabólica actual), 560 °C (tecnología cilindro-parabólica en el medio plazo o tecnología de torre actual) y 700 °C (tecnología de torre en el medio plazo).

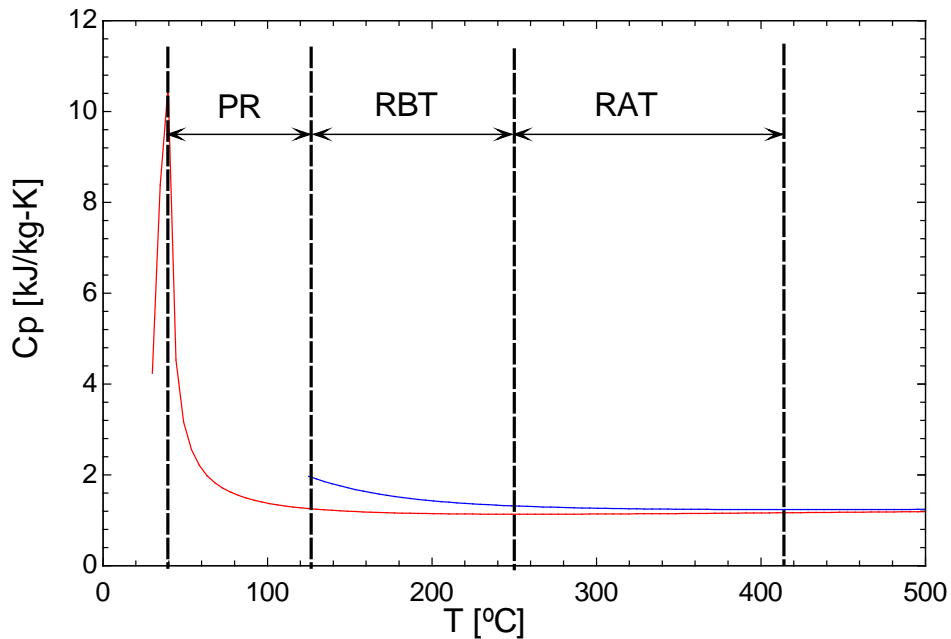


Figura 3: Evolución de los calores específicos en el ciclo C^2BTX^2 . En color azul se representa el calor específico de la corriente fría en los regeneradores y en color rojo el de la corriente caliente.

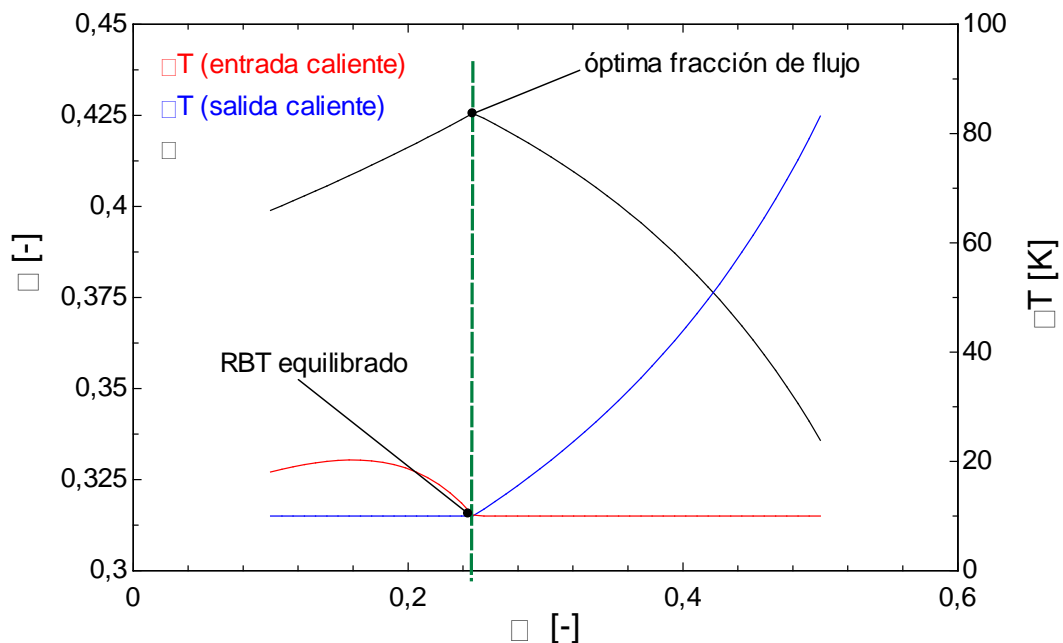


Figura 4: Optimización del rendimiento del ciclo C^2BTX^2 en función de la fracción de flujo que puenta el compresor principal. Se aprecia que el rendimiento alcanza un máximo cuando la aproximación de temperaturas (ΔT) es igual en ambos extremos del regenerador RBT.

Tras analizar la respuesta con los parámetros especificados se ha procedido a realizar un análisis de sensibilidad tanto en el ciclo CBT como en el C²BTX². La Tabla 1 recoge los rangos de variación de las variables analizadas.

Tabla 1. Rango de variación de las variables en el estudio de sensibilidad.

	Punto nominal	Intervalo de variación
Presión de entrada al compresor principal (CBTX transcrito)	50 bar	[45 bar, 55 bar]
Presión de entrada al compresor principal (CBTX supercrítico y C ² BTX ²)	85 bar	[80 bar, 90 bar]
Temperatura de entrada al compresor principal	50°C	[30°C, 50°C]
Temperatura de entrada a la turbina (tecnología actual en cilindro-parabólico actual)	390°C	[380°C, 400°C]
Temperatura de entrada a la turbina (tecnología actual en torre y futura en cilindro-parabólico)	560°C	[540°C, 580°C]
Temperatura de entrada a la turbina (tecnología futura de torre)	700°C	[680°C, 720°C]
Punto de estrangulación en CBTX	5°C	[3°C, 7°C]
Punto de estrangulación en C ² BTX ²	10°C	[9°C, 11°C]

3. Resultados

La Figura 5 muestra una comparativa de prestaciones del ciclo CBTX en configuración transcrito frente a supercrítica. Se observa que a nivel de rendimiento ambos ciclos son similares, siendo el rendimiento algo más alto en el ciclo transcrito a altas temperaturas. En cuanto al trabajo específico, éste aumenta con la relación de presiones. Es en el trabajo específico donde se aprecian diferencias, resultando mayor en el ciclo supercrítico. Se aprecia que para la actual tecnología de torre el rendimiento alcanzado es similar al de los ciclos Rankine empleados habitualmente [1].

En la Figura 6 se comparan las prestaciones de ambas configuraciones supercríticas, resultando siempre mayor el rendimiento en el ciclo de recompresión. Con este ciclo se supera el 42 % de rendimiento en la tecnología de torre actual [1], comparable con los ciclos de Rankine habitualmente empleados, y que permitiría sacar partido de las ventajas en respuesta dinámica y reducido tamaño del empleo de CO₂. En el caso de futuras centrales de torre los rendimientos se acercan al 50% con el ciclo de recompresión.

La Figura 7 muestra una comparativa de los tres ciclos analizados en el diagrama T-s. Se ha representado con un triángulo el punto de entrada a la fuente térmica y se ha desplazado 10 °C el ciclo C²BTX² para facilitar la visualización. Se aprecia claramente la mayor temperatura de admisión de calor conforme sube la presión y el nivel de complicación del ciclo, lo que justifica la mejora del rendimiento observada en las Figuras 5 y 6. En cuanto al trabajo específico, si la presión de entrada en turbina es la misma el trabajo específico (aproximadamente el área del diagrama T-s debido a las bajas irreversibilidades internas) es mayor en el ciclo CBTX transcrito, siendo similar en los dos ciclos supercríticos. Nótese que esta comparación no puede hacerse de forma directa en las Figura 5 y 6, pues sería preciso buscar la relación de presiones adecuada ($225/85 < 3$ en los ciclos supercríticos y mayor que en el transcrito, de valor $225/50$).

La Tabla 2 muestra los resultados del análisis de sensibilidad del rendimiento en el ciclo CBTX ante diferentes parámetros. El más importante a mucha distancia de los demás es la temperatura de entrada en el compresor, seguido por la temperatura de entrada en turbina. La presión de entrada en el compresor resulta significativa en el ciclo transcrito, especialmente a baja temperatura de entrada en turbina.

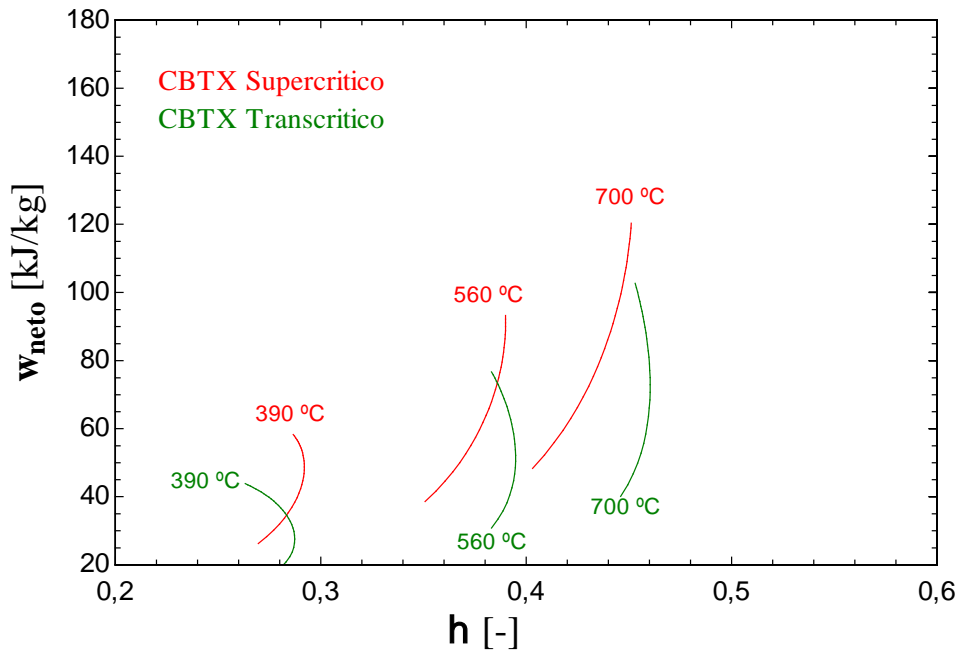


Figura 5: Trabajo neto específico y rendimiento del ciclo CBTX para relaciones de presión del compresor entre 1,5 y 3,0 (presión a la entrada de 50 bar para el transcrito y de 85 bar para el supercrítico).

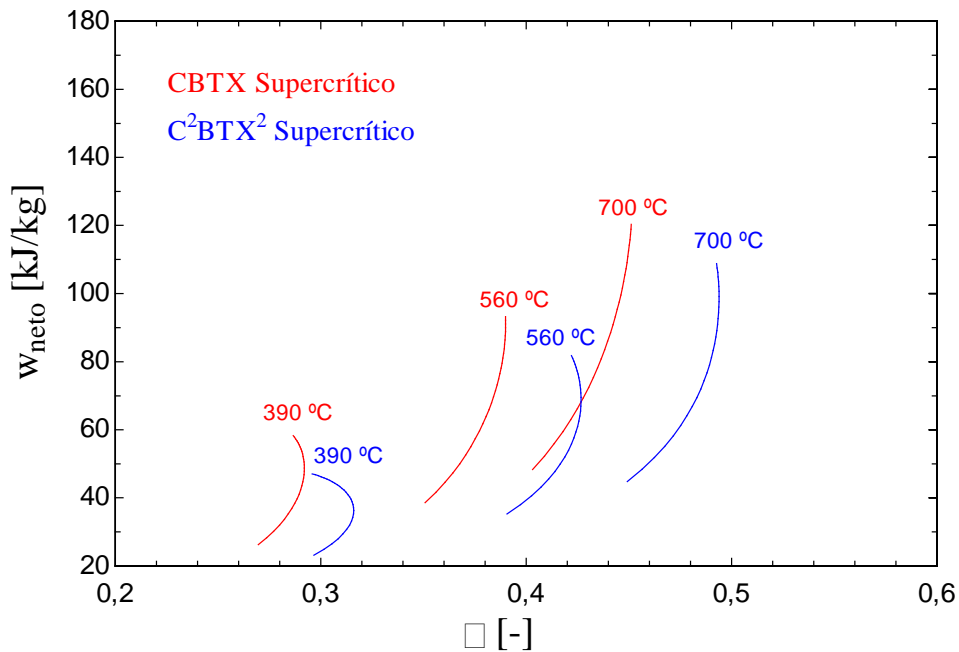


Figura 6: Trabajo neto específico y rendimiento de las dos configuraciones supercríticas para relaciones de presión del compresor principal entre 1,5 y 3,0 (presión a la entrada de 85 bar).

La Tabla 3 muestra los resultados del análisis de sensibilidad del rendimiento en el ciclo C^2BTX^2 . Nuevamente el parámetro más significativo es la temperatura de entrada al compresor principal, seguido por la de entrada en turbina y la presión de entrada al compresor. Los puntos de estrangulación de los regeneradores tienen poco peso (se habían fijado nominalmente en 10 K), especialmente el de alta temperatura.

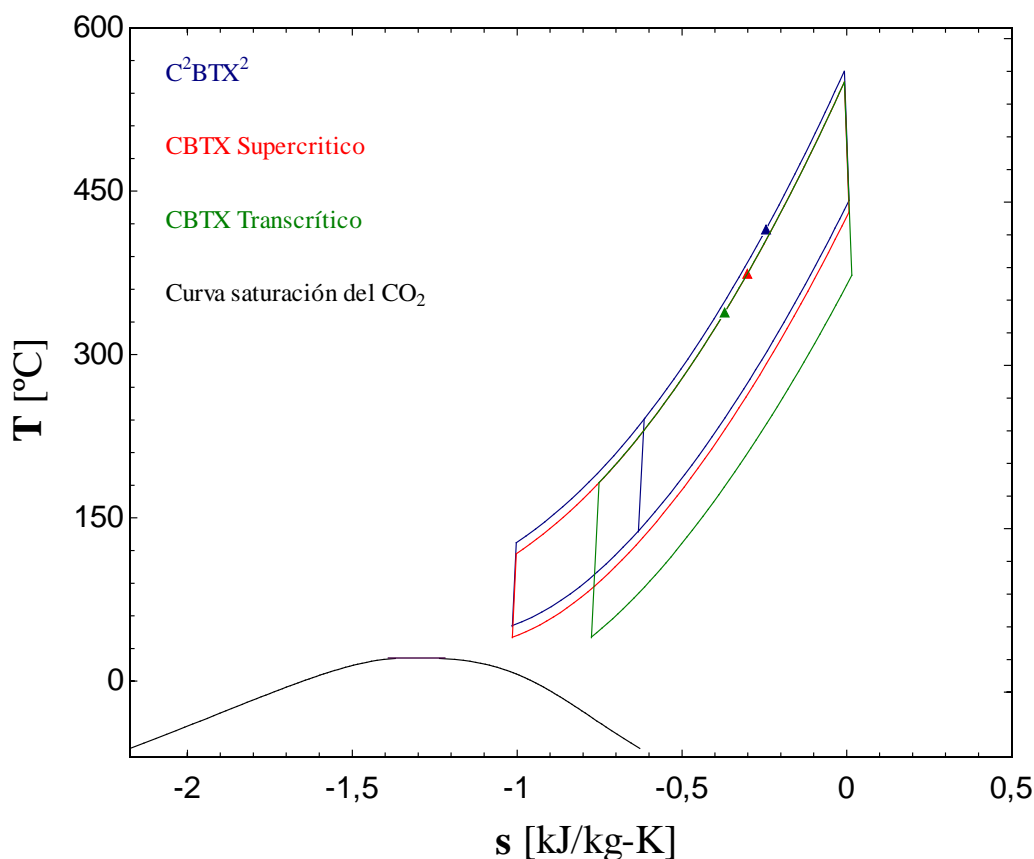


Figura 7: Comparativa de los diagramas T-s de las diferentes configuraciones (presión a la salida del compresor principal de 225 bar; presión a la salida del prerrefrigerador de 50 bar en el ciclo transcrítico y de 85 bar en los supercríticos; temperatura de entrada en turbina 560 °C).

Tabla 2. Análisis de sensibilidad del rendimiento en el ciclo CBTX. La presión de impulsión del compresor es de 225 bar.

	Transcrítico			Supercrítico		
	390°C	560°C	700°C	390°C	560°C	700°C
T. entrada turbina	390°C	560°C	700°C	390°C	560°C	700°C
P. entrada compresor	±8%	±3%	±1.7%	±1.8%	±0.3%	±0.6%
T. entrada compresor	±22%	±10%	±7%	±12%	±3%	±1.4%
T. entrada turbina	±5%	±4%	±3%	±3%	±3%	±1.7%
Punto estrangulación	±1.1%	±0.9%	±0.8%	±1.4%	±1.2%	±1.1%

Tabla 3. Análisis de sensibilidad del rendimiento en el ciclo C²BTX². La relación de presiones en el compresor principal es de 3.

	390°C	560°C	700°C
T. entrada turbina	390°C	560°C	700°C
P. entrada compresor	± 3%	± 1.3%	± 0.8%
T. entrada compresor	± 30%	± 14%	± 9%
T. entrada turbina	± 4%	± 3%	± 1.9%
Punto de estrangulación RBT	± 0.7%	± 0.5%	± 0.4%
Punto de estrangulación RAT	± 0.2%	± 0.2%	± 0.2%

4. Conclusiones

Los ciclos Brayton que emplean CO₂ como fluido de trabajo muestran un elevado potencial de aplicación a centrales termosolares, habiéndose evaluado en esta comunicación la configuración más adecuada en función de la temperatura del absorbedor, acorde con la tecnología de concentración y el estado de la tecnología.

Con tecnología cilindro-parabólica sólo sería interesante este tipo de ciclos cuando se puedan alcanzar en el absorbedor temperaturas de 560 °C, obteniéndose rendimientos similares a los actuales pero sacando partida de la mejor respuesta dinámica del CO₂. Con tecnología de torre, por el contrario, este tipo de ciclos ya sería aplicable alcanzando rendimientos similares a los actuales, llegando en el futuro al 50% de rendimiento. En cuanto al tipo de ciclo, en una primera fase (temperatura de absorbedor de 560°C) puede plantearse la integración del ciclo regenerativo transcrito, que evitaría las incertidumbres en el diseño del compresor principal con aspiración cercana al punto crítico y alcanzaría unos rendimientos cercanos al 40%.

En cuanto a la influencia de los diferentes parámetros, el más relevante es la temperatura de entrada en el compresor, muy por encima de las demás.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Cátedra Rafael Mariño de Nuevas Tecnologías Energéticas su apoyo financiero para la realización de este proyecto.

6. Referencias

- [1] RUIZ, V., SILVA, M.A., LILLO, I., *La electricidad solar térmica, tan lejos, tan cerca*. Barcelona: Fundación Gas Natural, 2009. 192 p.
- [2] U.S. Department of Energy, *SunShot Initiative: Concentrating Solar Power: Technologies, Cost, and Performance*. February 2012.
- [3] PÉREZ-PICHEL, G.D., LINARES, J.I., HERRANZ, L.E., MORATILLA, B.Y., *Thermal analysis of supercritical CO₂ power cycles: Assessment of their suitability to the forthcoming sodium fast reactors*. Nuclear Engineering and Design, 2012, 250, pp. 23-34
- [4] LINARES, J.I., HERRANZ, L.E., FERNÁNDEZ, I., CANTIZANO, A., MORATILLA, Y., *Supercritical CO₂ Brayton power cycle for DEMO fusion reactor based on Helium Cooled Lithium Lead blanket*. Applied Thermal Engineering, 2015, 76, pp.123-133
- [5] NEYSES, T., TURCHI, C., *A Comparison of Supercritical Carbon Dioxide Power Cycle Configurations with an Emphasis on CSP Applications*, Proceedings of the Solar-PACES 2013 International Conference.
- [6] CHACARTEGUI, R., MUÑOZ DE ESCALONA, J.M., SÁNCHEZ, D., MONJE, B., SÁNCHEZ, T., *Alternative cycles based on carbon dioxide for central receiver solar power plants*. Applied Thermal Engineering, 2011, 31, pp. 872-879
- [7] TURCHI, C., HELD, t., PASCH, J., GAWLIK, K., *10-MW Supercritical-CO₂ Turbine test*, SunShot Concentrating Solar Power Program Review 2013, April 23-25, 2013, Phoenix, Arizona
- [8] Singh, R., Miller, S.A., Rowlands, A.S., Jacobs, P.A., *Dynamic characteristics of a direct-heated supercritical carbon-dioxide Brayton cycle in solar thermal power plant*. Energy, 2013, 50, pp. 194-204