



Sistemas de Cogeneración: Aplicaciones y posible obsolescencia frente a otras alternativas

Weber, B., Ayala Mercado, I. D. y Bernhardt, H. (2023). Sistemas de Cogeneración: Aplicaciones y posible obsolescencia frente a otras alternativas *CIENCIA ergo-sum*, 32(1).
Postprint.

Sección: Ciencias Exactas y Aplicadas

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Esta versión del artículo es una “versión final del autor” que fue aceptada por un proceso de **evaluación por pares ciegos**. Este documento diferirá en formato respecto a la “versión del editor”, la cual se someterá a un proceso de corrección de estilo y de diseño editorial. De ninguna forma se modificará el contenido. Todas las ideas que se presentan son responsabilidad del autor.

Sistemas de Cogeneración: Aplicaciones y posible obsolescencia frente a otras alternativas
Combined Heat and Power: Applications and possible obsolescence versus other alternatives

Bernd Weber, Universidad Autónoma del Estado de México, México¹

Correo electrónico: bweber@uaemex.mx

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0125-841X>

Isis Dafne Ayala Mercado, Universidad Autónoma del Estado de México, México

Correo electrónico: dafayala24@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8936-4403>

Heinz Bernhardt, Technical University of Munich, Alemania

Correo electrónico: heinz.bernhardt@tum.de

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1080-2907>

Recepción: 19 de abril de 2023

Aprobación: 21 de agosto de 2023

RESUMEN

El sistema tradicional de energía se ha orientado en suplir las necesidades del consumidor priorizando aspectos económicos; sin embargo, la quema de combustibles fósiles contribuye al cambio climático, por ello se sugiere un análisis de consumo de energía primaria. Así, el objetivo del estudio fue evaluar las tecnologías para cubrir necesidades de calor del sector residencial e industrial. Un análisis basado en la segunda ley de termodinámica e introducción del coeficiente de calefacción, demostró que los sistemas de cogeneración, considerados como energías limpias, pronto quedarán en la obsolescencia. Mientras que, las bombas de calor aún poco utilizadas, podrían potencializarse como una buena alternativa para la obtención de calor y servir como complemento a las energías renovables en la transición energética.

PALABRAS CLAVE: demanda energética, bombas de calor, energía primaria.

ABSTRACT

Traditional energy systems have been developed to meet the needs of the consumer, prioritizing the economic aspects; however, knowledge that the burning of fossil fuels contributes to climate change necessitates thorough analysis of primary energy consumption. The objective of the present study was to evaluate technologies used to meet the heat demands of the residential and industrial sectors. An analysis based on the second law of thermodynamics using the heating coefficient, showed that cogeneration systems, considered to be clean energy, are becoming obsolescent. Heat pumps, though little used currently, could potentially be good alternatives for obtaining heat while serving to complement renewable energies in the energy transition.

KEYWORDS: energy demand, heat pumps, primary energy.

¹ Autor para correspondencia.

INTRODUCCIÓN

Dentro del contexto nacional de energía de México, los sistemas de cogeneración son considerados como energías limpias por tener un mejor aprovechamiento de la energía primaria comparado a las alternativas de una generación centralizada. Estos sistemas logran una tasa de aprovechamiento de la energía secundaria, es decir, la energía obtenida en forma de combustible a las puertas del lugar de consumo, de aproximadamente 85%, conformado por energía eléctrica y térmica. Ambas formas de energía se aprovechan en el lugar de producción, y en caso de un excedente se suministra a la red pública de energía eléctrica o a consumidores cercanos al sitio para el aprovechamiento de la energía térmica. Al cierre del 2022 la energía eléctrica en México se obtuvo a partir de tecnologías basadas en combustibles fósiles (64%), hidroeléctrica (14.48%), eololéctrica (7.94%), fotovoltaica (7.50%), cogeneración (2.64%), nucleoléctrica (1.85%), geotermoeléctrica (1.12%) y bioenergía (0.47%) (SENER, 2023), donde el rendimiento térmico de su generación con relación a la energía primaria utilizada, si bien varía según el sistema que se emplee, está en un rango de 30 a 40% para sistemas que emplean combustibles fósiles (Taylor et al., 2008; Kåberger, 2018). Asimismo, el implementar sistemas de cogeneración representaría un ahorro de energía primaria de entre 20 y 30% (Guerra-Cantú, 2018), un valor sorprendentemente bajo, por lo que surge el interés de desarrollar soluciones más viables que, al tener un mejor rendimiento energético, contribuyan a la reducción del consumo de combustibles fósiles y la emisión de gases de efecto de invernadero. Es importante mencionar que según los pronósticos de la Agencia Internacional de Energía la mayor contribución a la reducción de CO₂ será mejorar la eficiencia energética, incluso mayor que la introducción de energías renovables (IEA, 2019)². La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) pronostica que para el 2030 la contribución de la eficiencia energética a la reducción de CO₂ ocupará el tercer lugar en importancia, quedando detrás del cese del uso de carbón como combustible y de la transición a energías renovables (IRENA, 2023). En este sentido, el presente estudio demuestra desde un punto de vista termodinámico lo obsoleta que puede quedar la cogeneración frente a la implementación de energías renovables, así como de estrategias mejor planeadas cuyos propósitos sean la calefacción y refrigeración.

² La agencia internacional de energía (IEA) tiene su origen en los años 70 durante la crisis de petróleo. Hay crítica que este tipo de organizaciones con su opinión política influyen sobre estrategias energéticas (Downie, 2020).

1. ANÁLISIS

1. 1. Sistemas de cogeneración

Entendiendo como cogeneración a la producción de energía eléctrica y térmica a partir de una sola fuente de energía mediante un mismo proceso (Guelpa et al., 2019) se pueden establecer tecnologías basadas en sistemas fotovoltaicos, solar térmicos o en la combustión, siendo esta última la predominante en el mercado. Industrias como la azucarera (Fernández et al., 2020) y petrolera se caracterizan por una alta demanda de energía, para ellas es conveniente la implementación de un ciclo Rankine (frecuentemente con potencias por encima de 30 MW); por el contrario, en industrias de menor demanda energética se emplean otras tecnologías como motores de combustión interna, celdas de combustible o turbinas de gas.

1. 2. Análisis de la demanda de energía primaria para procesos de calor

Los requerimientos energéticos, tanto eléctricos como térmicos, varían según la industria a la que se haga referencia. La tabla 1 muestra una serie de sistemas de cogeneración implementados especificando las capacidades eléctricas y térmicas instaladas; así mismo, se observa la relación entre la energía eléctrica y térmica (σ) o “relación trabajo-calor”, de la cual se aprecian valores entre 0.98 y 2.55, los cuales se pretenden cubrir con las tecnologías mencionadas anteriormente, es aquí donde reside la importancia de su eficiencia eléctrica.

Tabla 1
Sistemas de cogeneración en industrias

	Energía eléctrica (kWe)	Energía térmica (kWt)	σ
Industria textil	10428	10668	0.98
Industria química	1880	1885	1.00
Sector agropecuario	9304	8100	1.15
Embalaje y envases	3768	1477	2.55

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos en Electríz (Electríz, n.d.)

En resumen, las celdas de combustible tienen una eficiencia de generación de energía eléctrica de hasta un 60% (Guelpa et al., 2019), los motores de combustión interna alrededor del 40%, los ciclos Rankine hasta un 35% (esto dependiendo del nivel de presión), y las

turbinas de gas con una menor eficiencia, alrededor del 20% (Schaumann y Schmitz, 2010; Wang et al., 2019). Según el lineamiento VDI 4608 se puede determinar la eficiencia eléctrica requerida de un sistema de cogeneración de acuerdo con la ecuación 1 en función de σ y ω . Este último parámetro es la tasa de aprovechamiento de la energía primaria para la cogeneración, la cual también es llamada por otros autores como rendimiento energético del sistema (Ramos et al., 2013).

$$\eta_{el} = \omega \cdot \frac{\sigma}{\sigma+1} \quad (1)$$

En un supuesto donde ω alcanza valores de hasta 0.8 y considerando el σ mínimo de la Tabla 1 resulta en una eficiencia eléctrica de 0.4, la cual puede ser alcanzada mediante un proceso de conversión basado en un ciclo Rankine. Caso contrario se tiene en la producción de embalaje y envases donde se presenta un valor de σ máximo (2.55), con lo cual la eficiencia eléctrica requerida para el proceso debe ser 0.57, eficiencia que sólo puede ser alcanzada mediante la utilización de una celda de combustible. Tomando como referencia el balance nacional de energía con un $\sigma_{nacional}$ aproximado de 0.4 (SENER, 2021)³, que representa la relación de la energía eléctrica entre la energía térmica que demanda toda la actividad industrial en México, queda evidenciada la posibilidad de abastecer la demanda energética industrial mediante sistemas de cogeneración. Sin embargo, como se mencionó anteriormente estos sistemas representan un ahorro de energía primaria entre 20 y 30%, lo que puede considerarse marginal. Lo anterior se puede explicar mediante la ecuación 2, la cual resulta de la comparación entre los esquemas de generación (Baehr y Kabelac, 2016).

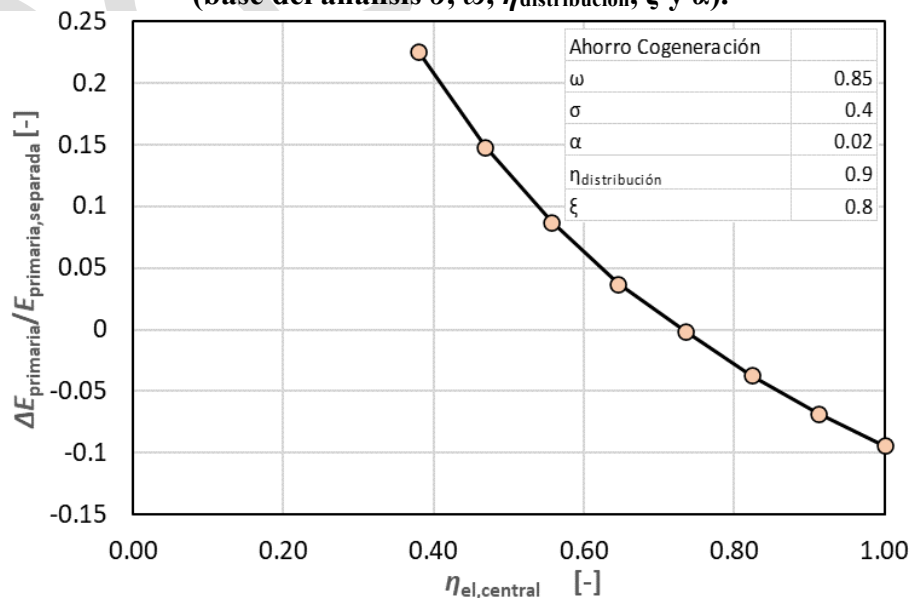
³ Se desconoce el valor preciso debido a que el balance nacional de energía no especifica la energía usada por cogeneración. De acuerdo con el consumo final se deriva un σ de 0.376 para el sector residencial y un 0.387 para el sector industrial. La cogeneración existente resultaría en un valor σ mayor el cual se estima en 0.4 para el análisis presentado.

$$\frac{\Delta E_{\text{primaria}}}{E_{\text{primaria,separada}}} = 1 - \frac{1+\sigma}{\omega} \cdot \frac{\xi^{\sigma}}{\eta_{\text{distribucion}} + \frac{\xi^{\sigma}}{\eta_{\text{el,central}}}} \cdot (\sigma - \alpha) \quad (2)$$

En la ecuación 2 se consideran los parámetros: eficiencia de distribución ($\eta_{\text{distribución}}$), eficiencia de generación de energía eléctrica con relación al consumo de energía primaria ($\eta_{\text{el,central}}$), consumo propio del sistema de cogeneración (α) y coeficiente de calefacción (ξ) (Baehr, 1981). Se considera una eficiencia de distribución ($\eta_{\text{distribución}}$) debido a que el transporte de energía térmica en sistemas de cogeneración conlleva mayores pérdidas que una generación convencional sobre todo cuando se deben abastecer sitios alejados del lugar de generación, situaciones que se presentan por ejemplo en parques industriales. El parámetro α se refiere al consumo propio del sistema de cogeneración por la necesidad de operar sistemas acoplados (por ejemplo, torres de enfriamiento). El ξ se refiere al desempeño del sistema de calefacción/refrigeración; sus particularidades serán abordadas más adelante, por ejemplo, una caldera industrial de vapor tiene un ξ de 0.8. La $\eta_{\text{el,central}}$ toma en cuenta todo el esquema de generación nacional (fósil, nuclear y renovables) que en la actualidad es 0.43 (SENER, 2021), sin embargo, con la introducción de energías renovables esta variable toma un carácter ascendente. El impacto de esta tendencia se ilustra en la figura 1.

Figura 1

Ahorro de energía primaria ($\Delta E_{\text{primaria}}$) por el uso de sistemas de cogeneración en función de la eficiencia de generación de energía eléctrica del conjunto de generadores (base del análisis σ , ω , $\eta_{\text{distribución}}$, ξ y α).

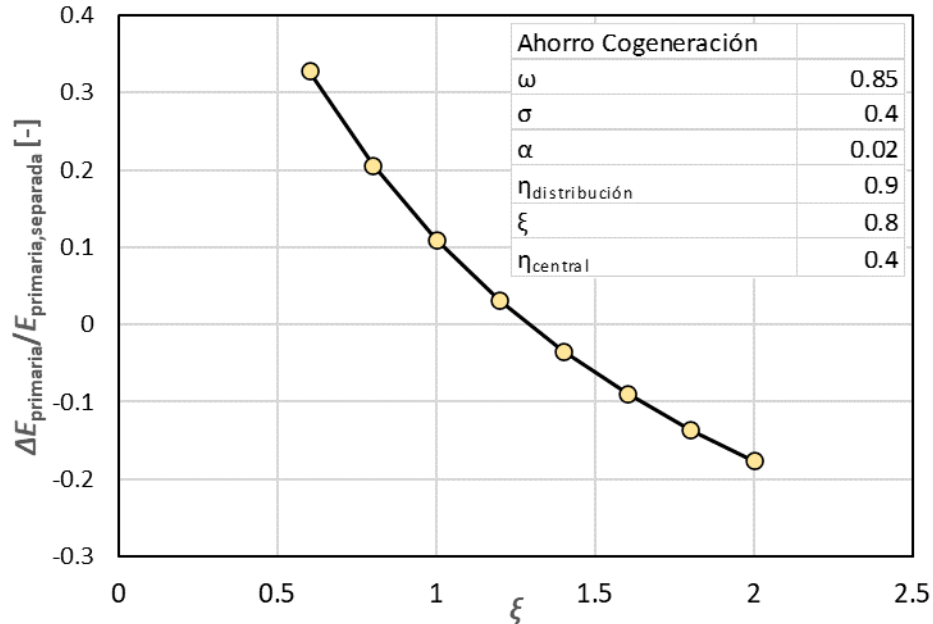


Fuente: Elaboración propia

Al introducir energías renovables, como la eólica y la fotovoltaica, en el esquema de generación el ahorro de energía primaria que ofrece el uso de sistemas de cogeneración se reduce, tal es el caso que, como se aprecia en la Figura 1, cuando se tiene un $\eta_{\text{generación}}$ mayor de 0.6 el $\Delta E_{\text{primaria}}$ desciende a valores negativos. Hay países con un alto índice de aprovechamiento de energías renovables con hidroeléctricas como Brasil o Canadá, los cuales ya superan este límite; no obstante, países ambiciosos en cuanto a la introducción de energías renovables al sector eléctrico como Alemania y España no quedan, con 42% y 47% respectivamente, lejos de este límite (Enerdata, 2022). Actualmente, México tiene una aportación del 22% de energías renovables en el sector eléctrico, con una capacidad añadida de 3.06 GW para el 2021, mostrando una tendencia de crecimiento superior al escenario mundial, pero al ser comparado para el mismo año con países con economías similares (tomando como criterio el Producto Interno Bruto) como España (4.06 GW), Países Bajos (4.48 GW) y Turquía (4.04 GW) es inferior y solo supera a países que aparentemente no prestan interés en energías renovables como Irán (0.03 GW), Arabia Saudita (0.33 GW) e Indonesia (0.52 GW) según de los “Country reports” en el portal de IRENA (2023). De acuerdo con las metas proclamadas para el sector energético de México por el secretario de Relaciones Exteriores Marcelo Ebrard durante la COP27, en noviembre del 2022 en Egipto, se pretende aumentar la participación de energías renovables incorporando 25 GW para 2030, esto, denotando la poca competitividad de estrategias al ser comparado con el ritmo de crecimiento pronosticado para un escenario mundial (IMCO, 2022).

Un comportamiento similar al del ahorro de energía primaria, como se muestra en la Figura 1, se observa con la variación del ζ como se ilustra en la Figura 2. El ζ es la relación entre la energía térmica liberada durante su utilización y la energía primaria requerida para cubrir la necesidad de generación de calor. Cuando ζ supera 1.3, lo cual es posible lograr mediante la utilización de bombas de calor, la situación resulta contraproducente, ya que no existe un ahorro de energía primaria con el uso de sistemas de cogeneración.

Figura 2
Ahorro de energía primaria ($\Delta E_{\text{primaria}}$) en función de ξ (base del análisis σ , ω , $\eta_{\text{distribución}}$, η_{central} y α).



Fuente: Elaboración propia

¿Por qué se siguen promoviendo los sistemas de cogeneración a pesar de que el análisis demuestra claramente sus deficiencias bajo un escenario real?

Es importante considerar que el análisis realizado solo toma en cuenta el ahorro de energía primaria y no aspectos como un beneficio económico, el cual puede influir en la elección de un sistema de cogeneración. Además, al utilizar combustibles renovables, como la biomasa, un sistema de cogeneración contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que al utilizarla sus emisiones por combustión se consideran neutrales en carbono. En resumen, para esquemas productivos como en el ramo agropecuario que cuentan con plantas de biogás para tratar estiércol o los ingenios azucareros con calderas para quemar bagazo de caña la cogeneración sigue siendo una medida viable.

1. 3. Sistemas de calefacción eficientes

De lo antes visto no queda resuelto, ¿cómo diseñar sistemas con un alto coeficiente de calefacción?

Desde un punto de vista termodinámico, los sistemas para proveer calor son una tarea simple. ¿En qué se sustenta esta afirmación? Derivada de la segunda ley de la termodinámica, la cual

sienta las bases de la calidad de la energía⁴; se sabe que la calidad de energía térmica a niveles de temperatura moderados es muy baja. Por ejemplo, un refrigerador tiene la capacidad de extraer energía térmica de un espacio con el uso de la energía eléctrica (energía de alta calidad) que para usos comunes es menor al flujo térmico transportado; las bombas de calor siguen el mismo principio que los sistemas de refrigeración, solo aprovechando el lado caliente del proceso, que seguramente muchos lectores lo identifican como la rejilla atrapa pelusas de los refrigeradores antiguos. Resulta curioso que se sigue usando el mismo término “refrigerante” para el fluido, a pesar de tratarse de un sistema de calefacción. La relación entre el flujo de energía térmica, que es la extracción de calor de un ambiente frío o, en su caso contrario, su descarga hacia un ambiente caliente, y la potencia de energía eléctrica requerida se conoce como coeficiente de operación (*COP*). Dependiendo del aparato de conversión térmica utilizado se emplean los conceptos COP_R y COP_{HP} para propósitos de refrigeración o de calefacción (uso de las siglas inglesas para el refrigerador y la bomba de calor), respectivamente.

Recapitulando, el coeficiente de operación tiene una cierta correlación con el coeficiente de calefacción, pero con la diferencia que el primero se refiere a energía final y el último a energía primaria. Este principio hace factible incrementar la obtención de energía térmica mediante la inversión de energía eléctrica aprovechando la energía de baja calidad que se tiene con abundancia en el ambiente.

En la actualidad, muchos procesos térmicos se basan en la combustión para la liberación de energía térmica, ejemplo de estos son procesos de secado, pasteurización/esterilización y cocido o destilación; en los cuales el uso de bombas de calor representa una alternativa más sustentable. Los procesos convencionales desaprovechan cierto potencial de energía. Lo anterior puede sustentarse con la Figura 3, donde se muestra el potencial teórico de sistemas térmicos que operaran entre dos niveles de temperatura. El potencial teórico se deriva del ciclo Carnot⁵, que para sistemas de refrigeración/calefacción tiene el valor inverso. El *COP*

⁴ La calidad de energía califica la generación de entropía (*S*) durante el cambio de un estado a otro y la disponibilidad de energía de ser convertida en cualquier otra forma de energía. El máximo trabajo útil obtenible al transferir de un cuerpo al equilibrio termodinámico del ambiente es la exergía (*X*); el análisis de los procesos con base en la exergía permite cuantificar las irreversibilidades generadas.

⁵ Nicolas Léonard Sadi Carnot se considera como uno de los fundadores de la termodinámica por su trabajo publicado en el libro “Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas aptas para desarrollar

de una máquina reversible (máximo teórico) es mayor que el de una máquina real, y su valor se obtiene a partir de las ecuaciones 3 y 4. Se observa que el $COP_{teórico}$ se determina mediante una relación entre la temperatura del espacio frío (T_F) y el espacio caliente (T_C).

$$COP_{R,Carnot} = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (3)$$

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad (4)$$

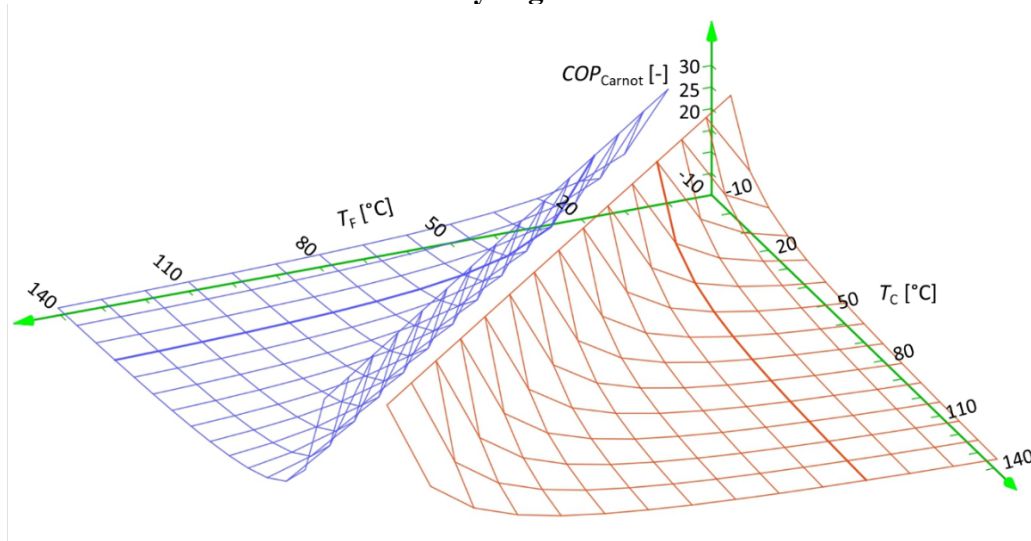
La temperatura del ambiente es un elemento aprovechable tanto como sumidero así como fuente de calor, por lo que se considera de gran importancia; en la Figura 3 se trabaja con una temperatura ambiente de 20 °C, la cual está resaltada. Por ejemplo, para una temperatura de refrigeración de 2 °C y una temperatura ambiente de 35 °C se obtiene un $COP_{R,Carnot}$ de 8.34⁶. Una aplicación común para calefacción es el agua caliente para una ducha, a 45 °C, donde si se tiene una temperatura ambiente de 0 °C resulta en un $COP_{HP,Carnot}$ de 7.07. Ventajosamente, al utilizar una fuente con una temperatura cercana a la del proceso el COP se incrementa. Por ejemplo, para un proceso de secado que requiere una temperatura de 110 °C aprovechando la temperatura ambiente de 25 °C la figura 3 muestra un $COP_{HP,Carnot} = 4.51$, el cual se incrementa a 7.66 al momento de poder aprovechar un nivel de temperatura de 60 °C, por ejemplo, la energía que por alguna razón se disipa en el proceso productivo.

esta potencia” (1824) en el cual describe un ciclo reversible para una máquina térmica que trabaja entre dos niveles de temperatura, que hoy en día se llama Ciclo Carnot.

⁶ En las ecuaciones 3 y 4 se debe calcular con la temperatura termodinámica, que de acuerdo con el Sistema Internacional (SI) de unidades es la escala Kelvin.

Figura 3

COP máximo teórico (COP_{Carnot}) para aplicaciones de refrigeración (R) en color azul y aplicaciones de calefacción (HP) en color rojo en los intervalos de temperatura de -10 a 140 °C. Por llegar al infinito para un $\Delta T=0$ las áreas tienen un recorte a $\Delta T=10$ °C. La temperatura del ambiente para ambas aplicaciones se resalta con una línea de mayor grosor.



Fuente: Elaboración propia

Bajo las circunstancias actuales en México el uso de una resistencia para calentar agua no solo resulta costoso, sino que también es una forma de desaprovechar la energía primaria, ya que se ubica en el punto inferior de la escala con un ζ de 0.41 (según el balance nacional de energía, tiene una relación de energía eléctrica final con energía primaria del 41%). Cabe mencionar que al generar energía eléctrica mediante un sistema fotovoltaico (PV) *in situ*, el valor de ζ se eleva a 1, esto significa que, únicamente con la simple combinación entre un sistema PV y una resistencia se logra un ζ superior al que se obtiene al utilizar una caldera.

1. 4. Sistemas de refrigeración

La generación del frío fue un mayor reto para la humanidad que la generación de calor, lo cual fue logrado al momento de dominar el fuego. Se sabe que en el antiguo Egipto los faraones disfrutaban de un sorbete elaborado con hielo que era transportado desde el Líbano (Reinink et al, 1995). Con el invento de máquinas cíclicas para la generación del frío, se han dejado de lado costumbres antiguas y se ha ganado experiencia en el desarrollo de una amplia variedad de sistemas de refrigeración. Hoy en día, incluso se tiene la capacidad de producir hidrógeno líquido a una temperatura de -253 °C.

Para la evaluación comparativa (“Benchmarking”) de los sistemas de refrigeración se toma en cuenta el *COP* o en *SCOP* donde el último es el “Seasonal Coefficient of Operation” el cual se considera, por ejemplo, al tener variación de la temperatura del ambiente durante un periodo prolongado como una estación del año. Por esta razón se contempló en el cálculo de ejemplo una temperatura de 35 °C, una situación no tan favorable como de 20 °C porque lo que define el esfuerzo necesario es una función de la diferencia de temperatura entre los niveles alto y bajo. Como consecuencia es muy recomendable limitar la diferencia de temperatura en los intercambiadores de calor desde el diseño y durante su operación. Un refrigerador con las superficies de disipación tapadas o llenas de pelusa (en el caso de los antiguos con rejillas) resulta en la reducción del *COP* y *SCOP*.

1. 5. Bombas de calor

Por la facilidad que representa el encender un fuego controlado en un boiler y utilizar la energía de combustión para cubrir las necesidades de calor a nivel residencial, comercial e industrial se cuentan con aplicaciones tan numerosas como incontables, la comodidad de manejo de esta tecnología ha dejado de lado alternativas más sustentables caracterizadas por un ξ mayor a 1 por más que un siglo. Pero en las últimas décadas, debido al incremento del costo de los energéticos y estrategias energéticas convocadas, en algunos países pavimentan el camino hacia esquemas más cuidadosos en el uso de energéticos. Aplicaciones comunes para bombas de calor hoy en día ya son la atemperación de residencias y mantener el confort térmico del agua en albercas. Weber et al. (2014) demostraron que una bomba de calor operada con un motor de combustión tiene una menor demanda de energía primaria para la operación de albercas que la implementación de sistemas de cogeneración.

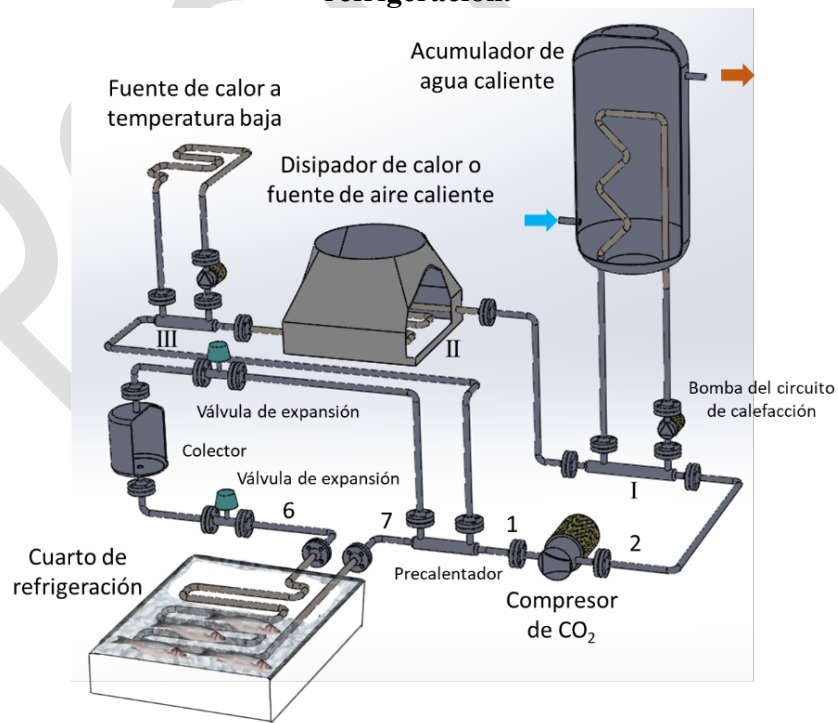
Recientemente, se han visto aplicaciones de bombas de calor en la industria, como los procesos de secado, la concentración por medio de evaporación y la atemperación de baños en los procesos de galvanizado (Wilk et al., 2017) abarcando aplicaciones de mayor temperatura y de mayor potencia. Además, a pequeña escala, es posible de adquirir secadores de ropa y lavadoras cuya tecnología se basa en bombas de calor.

1. 5. Sistemas combinados de refrigeración y calefacción

El mejor desempeño se observa en procesos donde se cuenta con una demanda tanto de calor como de refrigeración, como se observa en la industria alimenticia. Un ejemplo claro es en la elaboración de quesos, donde se presenta una demanda de calor en la etapa de elaboración y una demanda de frío en el almacenamiento. Otro ejemplo son los procesos de galvanizado en los cuales se usan tinas para desengrasar que operan a una temperatura mayor de 60 °C y las tinas de galvanizado a 30 °C que requieren refrigeración por las reacciones químicas presentes. Bajo estas circunstancias es posible combinar el proceso de refrigeración con el de calentamiento usando como única entrada de energía el compresor del fluido.

En la Figura 4 se presenta un esquema de una combinación de un proceso de refrigeración con un proceso de calentamiento en la industria alimenticia donde se requiere la refrigeración para mantener el pescado a baja temperatura y el calor para agua caliente u otros usos, como la atemperación del sitio.

Figura 4
Esquema de recuperación de calor para la obtención de agua/aire caliente (I y II) y calefacción en forma de un piso radiante (III) combinado con el propósito de refrigeración.



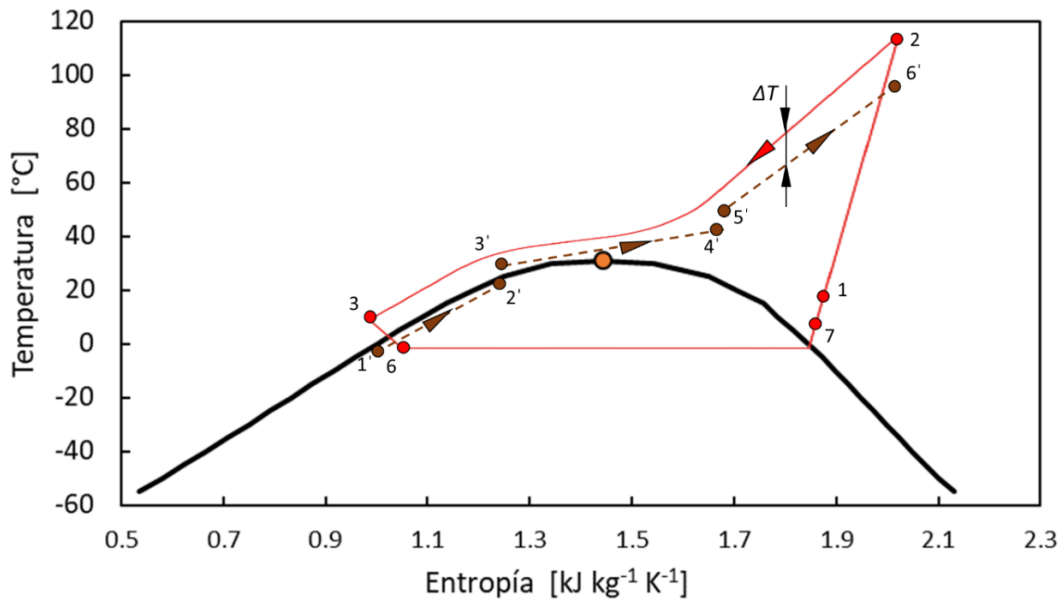
Fuente: Elaboración propia adaptado desde Fröschle, 2010

Se aprecia el retorno de los refrigerantes CO_2 y NH_3 , por ser menos dañinos a la capa de ozono y al cambio climático que los FCKW (Abas et al., 2018). En el caso del CO_2 se manejan presiones superiores a los 100 bares lo que desafortunadamente requiere construcciones resistentes a la alta presión. Sin embargo, una ventaja del CO_2 es que se opera en condiciones transcíticas lo que permite diseñar sistemas adecuados para combinaciones de refrigeración/calefacción. En el esquema de la Figura 4 se encuentran 3 elementos para el enfriamiento del gas⁷. El primer elemento de calefacción es un tanque para el almacenamiento de agua caliente del proceso (lado derecho superior). El segundo elemento de calefacción es un disipador/calentador de aire y como tercer elemento se observa un piso radiante para aprovechar el calor a un nivel más bajo.

El intercambio de calor entre los tres elementos se ilustra en la Figura 5 en forma de un diagrama $T-s$ (Temperatura en función de la Entropía). Resalta que el refrigerante en los 3 intercambiadores de calor (I, II y III) tiene gradientes de temperatura, a diferencia de los condensadores que usan de refrigerantes comunes. Esta característica permite diseñar intercambiadores con una menor diferencia de temperatura entre los fluidos, un requisito antes mencionado para ser más cuidadoso con la calidad de energía.

⁷ Por operar en estado transcítico no se requiere de un condensador como en sistemas que usan FCKW como refrigerante.

Figura 5
Diagrama T-s para un proceso de refrigeración el refrigerante CO₂ con las etapas de acuerdo con la figura 4



Fuente: Elaboración propia

La generación de entropía en los intercambiadores de calor I, II y III entre el refrigerante y otros fluidos a través de una pared de separación se determina conforme a la ecuación 5.

$$\Delta\dot{S} = \dot{Q} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (5)$$

Un proceso reversible para cualquier intercambio de calor requiere un gradiente de temperatura igual a cero, resultando en un área infinita de intercambio que en la práctica no es posible, aunado a las fricciones en los fluidos. La ecuación 5 indica que la generación de entropía es proporcional al calor transferido, siendo mayor a temperaturas más bajas y proporcional a la diferencia de temperatura ($\Delta T = T_1 - T_2$) siempre y cuando ΔT sea de menor magnitud que T_1 . No solo una superficie grande resultará en un ΔT pequeño, sino que también el ajuste adecuado de las capacidades caloríficas de los fluidos mantendrá ΔT similar en cualquier punto del intercambiador. Así, al contar con las herramientas de análisis se puede saber en dónde se pierde calidad de energía para diseñar sistemas más eficientes en las tareas para los que son creados.

PROSPECTIVA

De acuerdo con lo antes planteado existen con las bombas de calor alternativas más eficientes para cubrir la demanda de calor de baja entalpia. Estas alternativas incluso pueden ser más eficientes que los sistemas de cogeneración divulgados como energías limpias, por lo que se necesitan redefinir las estrategias nacionales de energía. La importancia de la planeación energética se ve reflejada en que 11 de los 19 países del grupo G-20⁸ tienen en su estructura gubernamental una secretaria de energía y 5 de ellos cuentan con una secretaría independiente, al igual que en México. Las estrategias energéticas implementadas son a largo plazo, ejemplo de esto es la central nuclear Laguna Verde en Veracruz, que tardó 14 años en construirse y ahora lleva más de 30 años en operación; lamentablemente la planeación energética carecía de una perspectiva clara hacia un sistema sostenible como se ve, por ejemplo, en la refinería de Dos Bocas la cual actualmente lleva 4 años en construcción y aún no ha producido gasolina. Esto ocurre justo en un momento en el cual la industria automotriz planea su migración hacia otras tecnologías, no obstante, la desaparición de vehículos operados mediante la combustión en México es un pensamiento acelerado por la etapa tan temprana en la que se encuentra la migración del mercado hacia la electromovilidad (Carrillo et al., 2020). Las centrales termoeléctricas tienen una vida útil de 35 años, y la historia reciente ha sugerido estrategias erróneas como los famosos ciclos combinados que en España no resultaron rentables y requieren subsidio gubernamental para su operación (Renovetec, 2022), en este sentido, se espera que la reciente adquisición de plantas de ciclo combinado por parte de la Comisión Federal de Electricidad resulte en un recorte de inversión en energías renovables o en la red de distribución de energía eléctrica, la cual es indispensable para la incorporación de más energías renovables. A pesar de las amenazas de un retraso programado, se puede suponer que la introducción de energías renovables seguirá su curso tal como ha sucedido anteriormente, donde los pronósticos elaborados por instituciones gubernamentales son subestimados por una magnitud superior a 2 (SENER, 2015); estos estimados indican la planeación energética deficiente con la que se lidia en el país, por lo anterior, es imprescindible realizar cambios orientados a la integración de expertos nacionales e internacionales para llevar a cabo dichas tareas; asimismo, se

⁸ La Unión Europea cuenta como miembro del G-20.

requiere el análisis y actualización de los Mapas de Ruta Tecnológica de Energías Renovables, ya que tienen 5 años de antigüedad (SENER 2018).

En este estudio el análisis de tendencia demuestra que sistemas de cogeneración basados en la combustión de fósiles muy pronto ya no tendrán futuro al tomar en consideración su consumo de energía primaria y emisión de gases de efecto invernadero, por tanto, quienes toman las decisiones deben estar informados sobre este análisis. Lamentablemente no se ha prestado suficiente atención al coeficiente de calefacción, que al tener como base a la segunda ley de la termodinámica tiene la capacidad de estimar la verdadera eficiencia de sistemas de calefacción y refrigeración. Sería beneficioso que los planes educativos donde se imparte este tipo de análisis como la materia de “Trigeneración y ciclos avanzados” impartida en la Licenciatura de Ingeniería en Sistemas Energéticos Sustentables en la facultad de ingeniería de la UAEMex pronto dé frutos hacia estrategias energéticas más sustentables, las cuales sean evaluados con las herramientas presentadas; ahora bien, se debe tener en mente que es imperativo que la formación respecto a la importancia de energías renovables se de en todos los ámbitos profesionales, pasando por técnicos, ingenieros y los organismos responsables de la planeación energética; lo anterior puede ser cubierto por las universidades, pero también a través de asociaciones como la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES), es por ello que se requiere una mayor divulgación para fomentar el interés de la población mexicana en general.

Desafortunadamente se ha observado que lograr una mejor eficiencia energética a menudo conduce a un mayor consumo, un fenómeno como el efecto rebote (Paradoja de Jevons). Aquí es donde reside la importancia de la implementación de energías renovables puesto que a pesar de seguir el mismo principio de consumo antes discutido el efecto adverso al medio ambiente será nulo ya que con ellas se puede llegar a una huella de carbono cero; mientras se logra esta transición se requieren mecanismos basados en estímulos y control a través de un monitoreo para atenuar dicho efecto rebote (Trincado et al., 2021), entonces, la necesidad de desarrollar mecanismos más eficientes para el monitoreo energético se añade como otra tarea para la planeación energética; por la falta de estos mecanismos se recurre a estimar una mejora en la eficiencia energética mediante la observación del parámetro de intensidad

energética⁹, para la cual México ha tenido valores de -1.0% al año, lo cual es inferior a la tendencia global del -1.5% para el periodo de 2000 al 2020, pero con -1.9% superior en el periodo de 2016 al 2021.

Por último, se quiere informar sobre una estrategia energética tomada en Alemania que pone fuertes candados para la implementación de nuevos sistemas de combustión para calefacción residencial e industrial a partir del primero de enero de 2024 (BMWK, 2022), simplemente la aportación de energías renovables debe de ser al menos un 65%. Es un gran reto tomando en cuenta que 85% del mercado de calor se basa en fósiles; en este contexto, el uso de bombas de calor es una alternativa para tener en cuenta.

CONCLUSIONES

La bomba de calor tiene un efecto palanca ya que puede satisfacer las necesidades de calor utilizando las fuentes de energía renovable cuyo multiplicador no supera el límite teórico de acuerdo con la Figura 3; esto es útil pues la magnitud del sector de calor es 2.5 veces mayor que el mercado eléctrico ($1/\sigma_{\text{nacional}}$) para el cual aún no se tienen perspectivas tan claras como para el sector eléctrico en el cual las energías renovables sin emisión de gases de efecto invernadero predominantes son la energía solar y eólica; así, no sólo los sistemas clásicos de combustión sino también sistemas más avanzados como la cogeneración con motores de combustión interna pronto quedarán inservibles por la escasez de combustibles renovables en estado líquido o gaseoso. Por lo tanto, el uso de bombas de calor es una de las opciones más viables y prometedoras ya que al ser alimentadas con energías renovables se tiene una mejora significativa en el rendimiento térmico y además se disminuyen las emisiones contaminantes, lo cual es crucial para abordar los desafíos ambientales actuales. El ejemplo de Alemania sirve para ilustrar que a pesar de ser uno de los mayores productores de biogás la generación lograda apenas representa un 7% del mercado total de gas natural (Thrän et al., 2022).

⁹ La intensidad energética relaciona la energía requerida para producir un bien; en caso particular, el producto interno bruto para comparar diferentes países. Debido a que este parámetro no sólo depende de la eficiencia energética sino también de la migración de una economía hacia otras actividades e incluso de la inflación (para la correcta utilización del parámetro se requiere emplear ajustes) es controversial su utilidad para describir la eficiencia energética ya que no toma en consideración los parámetros antes planteados. De acuerdo con Ang (1999) es más recomendable basarse en el índice de carbono al momento de hacer comparaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al CONACYT, por el apoyo económico recibido a través del programa “Apoyos complementarios para estancias sabáticas vinculadas a la consolidación de grupos de investigación” Convocatoria 2022. También agradecemos la retroalimentación y comentarios por parte de los revisores de esta revista, quienes con sus aportaciones contribuyeron al enriquecimiento este artículo.

REFERENCIAS

- Abas, N., Kalair, A. R., Khan, N., Haider, A., Saleem, Z., & Saleem, M. S. (2018). Natural and synthetic refrigerants, global warming: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 557-569. doi:10.1016/j.rser.2018.03.099
- Ang, B. W. (1999). Is the energy intensity a less useful indicator than the carbon factor in the study of climate change? *Energy Policy*, 27(15), 943-946. doi:10.1016/S0301-4215(99)00084-1
- Baehr, H. D. (1981). The COP of absorption and resorption heat pumps with ammonia-water as working fluid. *International Journal of Refrigeration*, 4(2), 83-86. doi.org/10.1016/0140-7007(81)90064-5
- Baehr, H. D., & Kabelac, S. (2016). *Thermodynamik (12)*. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-49568-1
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland, BMWK. (2022). 65 Prozent erneuerbare Energien beim Einbau von neuen Heizungen ab 2024 Konzeption zur Umsetzung. Disponible en: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/65-prozent-erneuerbare-energien-beim-einbau-von-neuen-heizungen-ab-2024.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- Carrillo, J., de los Santos Gómez, J.S., Briones, J. (2020). Hacia una electromovilidad pública en México (LC/TS.2020/115). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Disponible en: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46060/1/S2000368_es.pdf

Downie, C. (2020). Strategies for Survival: The International Energy Agency's response to a new world. *Energy Policy*, 141, 111452. doi:10.1016/j.enpol.2020.111452

Enerdata. (2022). Cuota de energías renovables en la producción de electricidad.

Disponible en:

<https://datos.enerdata.net/energias-renovables/produccion-electricidad-renovable.html>

Electriz. (n.d.). Conoce nuestros casos de éxito. Disponible en: <https://electriz.com.mx/>

Renovetec. (2022, octubre 26). Webinar: presente y futuro de los ciclos combinados en un escenario renovable [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=B4MSTnbTfz8>

Guelpa, E., Bischi, A., Verda, V., Chertkov, M., & Lund, H. (2019). Towards future infrastructures for sustainable multi-energy systems: A review. *Energy*, 184, 2-21.

doi:10.1016/j.energy.2019.05.057

Guerra-Catú, J. C. (2018). Taller regional CONUEE-2018. Las oportunidades de cogeneración en México [Taller]. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.

Disponible en:

<https://docplayer.es/97241827-Taller-regional-conuee-2018.html>

Fernández, J., Sabadi, R., & Beltrán, L. (2020). La energía en el proceso azucarero.

Resultados de los institutos cubanos de investigación, desarrollo e innovación en las tecnologías sobre azúcar y derivados (pp. 269-302). ICIDCA. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/340487435_Capitulo_11_LA_ENERGIA_EN_EL_PROCESO_AZUCARERO

Fröschle, M. (2010). Aktuelle Möglichkeiten und Potenzial von Kälteanlagen-schaltungen mit dem Kältemittel R744 (CO₂). *KI Kälte Luft Klimatechnik* (3), 24-29.

IEA. (2019). World Energy Outlook 2019. International Energy Agency. Disponible en:

<https://iea.blob.core.windows.net/assets/98909c1b-aabc-4797-9926-35307b418cdb/WEO2019-free.pdf>

IMCO. (2022) México anuncia el incremento de sus compromisos climáticos en la COP 27. 18 de noviembre. Disponible en: <https://imco.org.mx/mexico-anuncia-el-incremento-de-sus-compromisos-climaticos-en-la-cop-27/>

IRENA. (2022). Renewable Energy Statistics 2022. International Renewable Energy Agency. Disponible en: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Energy-Statistics-2022>

IRENA. (2023). World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway. International Renewable Energy Agency. Disponible en: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Outlook>

Kåberger, T. (2018). Progress of renewable electricity replacing fossil fuels. *Global Energy Interconnection*, 1(1), 48-52. doi:10.14171/j.2096-5117.gei.2018.01.006

Ramos, J., Lozano, M. A., & García, J. (2013). Metodología para el análisis y diseño de plantas de cogeneración. XX CONIMERA, Lima, Perú. Disponible en: http://publicationslist.org/data/miguel.a.lozano/ref-170/cc97_Metodologia%20para%20el%20 analisis%20y%20dise%C3%B1o%20de%20 plantas%20de%20cogeneracion.pdf

Reinink, W., Vermeulen, J. G., & Wehdorn, M. (1995). *Eiskeller: Kulturgeschichte alter Kühltechniken* (Vol. 15). Beohlau.

Schaumann, G., & Schmitz, K. W. (Eds.). (2010). *Kraft-Wärme-Kopplung* (4° ed.). Springer Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-01425-3

Secretaría de Energía (SENER). (2015). *Prospectiva de Energías Renovables 2015 – 2019*. Disponible en:

<https://www.gob.mx/sener/documentos/prospectivas-del-sector-energetico>

Secretaría de Energía (SENER). (2018). *Mapas de Ruta Tecnológica de Energías Renovables*. Disponible en:

<https://www.gob.mx/sener/documentos/mapas-de-ruta-tecnologica-de-energias-renovables>

Secretaría de Energía (SENER) (2021) Balance Nacional de Energía 2020. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf

Secretaría de Energía (SENER). (2023). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2023-2037. Disponible en: <https://www.gob.mx/sener/articulos/programa-de-desarrollo-del-sistema-electrico-nacional-2023-2037#:~:text=El%20Programa%20de%20Desarrollo%20del,2024%20y%20plasma%20los%20grandes>

Taylor, P., Francoeur, M., d'Ortigue, O. L., Tam, C., & Trudeau, N. (2008). Worldwide trends in energy use and efficiency. Proc. Paris, Int. Energy Agency (IEA), 1-36.

Thrän, D., Schindler, H., Kornatz, P., Dotzauer, M., & Nelles, M. (2022) Die Rolle von Biogas für eine sichere Gasversorgung in Deutschland. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, Leipzig. Disponible en: https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Statements/Positionspapier_Biogas_Ukraine.pdf

Trincado, E., Sánchez-Bayón, A., & Vindel, J. M. (2021). The European Union green deal: clean energy wellbeing opportunities and the risk of the Jevons paradox. *Energies*, 14(14), 4148. doi:10.3390/en14144148

VDI 4608 Energy systems, Combined heat and power. Terms, definitions, examples. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 2005

Wang, J., You, S., Zong, Y., Træholt, C., Dong, Z. Y., & Zhou, Y. (2019). Flexibility of combined heat and power plants: A review of technologies and operation strategies. *Applied Energy*, 252, 113445. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113445

Weber, B., Cerro, E., Martínez, I. G., Rincón, E., & Duran, M. D. (2014). Efficient heat generation for resorts. *Energy Procedia*, 57, 2666-2675. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.278>

Wilk, V., Windholz, B., Hartl, M., Fleckl, T., Fluch, J., Grubbauer, A., Brunner, C., Lange, D., Wertz, D., & Ponweiser, K. (2017). Effizientere Prozesse durch Wärmepumpen und Solarthermie. Disponible en:

<https://www.kka->

[online.info/artikel/kka_Effizientere_Prozesse_durch_Waermepumpen_und_Solarthermie-2875786.html](https://www.kka-online.info/artikel/kka_Effizientere_Prozesse_durch_Waermepumpen_und_Solarthermie-2875786.html)

CC BY-NC-ND

Postprint