

boletín

Academia Mexicana de Energía, A. C.



Vol. 1, No. 1, 2016. Año 0  
boletín



Boletín Informativo de la  
Academia Mexicana de Energía, A. C.

No. 1, Vol. 1, Diciembre 2016

# **Academia Mexicana de Energía, A. C.**

Presidenta

Margarita Mercedes González Brambila

Vicepresidente

Carlos Omar Castillo Araiza

Secretario

José A. Colín Luna

Vocal de Comisiones de Especialidad

Dra. Rocío Sánchez Pérez

Vocal de Comunicaciones

M. en D. I. José Juan Martínez Nates

Vocal de Delegaciones Regionales

Dra. Ma. Del Carmen Monterrubio Badillo

Vocal de Eventos Técnicos

Dr. Isaías Hernández Pérez

Vocal de Relaciones Institucionales

C Dr. Ahmed Zekkour Zekkour

Vocal de Comité de Membresías

Dr. Hugo Joaquín Ávila Paredes

Presidente Comité Editorial del Boletín

Dr. Héctor Fernando Puebla Núñez

Secretario del Comité Editorial del Boletín

Dr. Rubén Vázquez Medina

# **Comité Editorial**

Elie! Carvajal Quiroz (Coordinador)

Rocío Sánchez Pérez

Rubén Vázquez Medina

Julio César García Martínez

Homero Jiménez Rabiela

# **EL SECTOR ENERGÉTICO MEXICANO. UN PLANTEAMIENTO PARA ASEGURAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS METAS AMBIENTALES DEL PAÍS.**

Dr. José Miguel González Santaló<sup>\*1</sup>

MAP Ramón Carlos Torres Flores

Ing. Adrián Escofet Cedeño

Ing. Marco Polo Flores López

Ing. Marco Antonio Borja

Dra. Georgina Izquierdo

Dr. Roberto Best Brown

Dr. Fabio Manzini Poli

Dr. Rubén Dorantes Rodríguez

Dr. Juan Luis Peña Chapa

Dra. Isabelle Rousseau

## **Resumen ejecutivo**

El sector energético mexicano, cuando se le compara con el de los demás países, muestra un desempeño bajo en los aspectos ambientales y aparecen algunas señales que indican que deben reforzarse aspectos de la seguridad energética del país. Entre estas señales de alarma están las crecientes importaciones de gas natural y gasolinas.

La planeación del sector energético mexicano, a cargo de la Secretaría de Energía (SENER), publicada en las diferentes prospectivas de gas y petrolíferos, así como en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2015-2029 (PRODESEN), ha incorporado cambios importantes para dar cumplimiento a los límites de generación a base de combustibles fósiles establecidos en la Ley de Transición Energética. Los cambios en la planeación son notorios en el sector eléctrico, en el que se

---

<sup>1</sup> \* Contacto para asuntos relacionados con el trabajo. Correo electrónico: [santalo.jm@gmail.com](mailto:santalo.jm@gmail.com)

incorporan energías limpias y se elimina el uso de carbón y del combustóleo como energéticos primarios. En los demás sectores relevantes desde el punto de vista energético, particularmente el industrial y el de transporte, los cambios no son evidentes.

El sector transporte incrementa de manera significativa sus emisiones en proporciones aún mayores al incremento de la flota vehicular. En el sector eléctrico, aunque se nota una reducción de emisiones en el periodo, pero hacia el final del mismo, éstas repuntan debido a la gran dependencia del gas natural para la generación. En el sector industrial no se contempla el uso de energías renovables para suministro de calor.

En este trabajo se hace un planteamiento de una planeación energética más ambiciosa, abordando los tres subsectores que más aportan a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): el sector transporte, el sector industrial y el sector eléctrico.

En el tema de seguridad energética, aunque México está bien calificado en las escalas del Consejo Mundial de Energía, aparecen señales de alarma por el gran volumen de importación de gasolinas, diésel y gas natural. Asimismo, mientras que en el año 2000 la producción de hidrocarburos duplicaba el consumo energético del país, con amplios excedentes para exportación, en el 2015 la producción y el consumo son esencialmente los mismos en un nivel de 3.0 millones diarios de barriles de petróleo equivalente y el país se volverá deficitario para el 2030.

Se plantea también que es necesario tener mayor participación de la industria local en el suministro de sistemas y equipos energéticos, pues de otra manera la implantación de sistemas de energías limpias representaría un subsidio a las industrias de los países más desarrollados. Se hacen planteamientos orientados a que el sector energético no solo cumpla con los compromisos ambientales, sino a que también impulse el desarrollo del sector industrial, generando empleos para la población.

## INTRODUCCION

Todos los países iberoamericanos tienen una necesidad apremiante de aumentar su oferta de energía que, per cápita, debería acercarse a los niveles de Europa Occidental. Esto ayudaría a reducir la pobreza y la desigualdad existentes. Tienen, además, todos los países iberoamericanos una gran dependencia tecnológica, que ocasiona que cualquier esfuerzo de mejora del sector, a menos que se adopten políticas de desarrollo industrial muy concretas, genere una transferencia de recursos económicos de los países en desarrollo a los desarrollados.

En Iberoamérica, como en muchos otros sitios en el mundo y en México de manera especial, se presenta un rechazo ciudadano a los grandes proyectos energéticos, en parte porque no son claros los beneficios que aportan los proyectos a las poblaciones que afectan directamente. Es necesario reducir estas tensiones, para lo cual es necesario analizar los impactos sociales de los proyectos y se propone que se establezcan políticas concretas que apoyen el flujo de beneficios de los proyectos a las poblaciones, en términos de empleo y de demanda de servicios.

El uso de energías renovables puede contribuir de manera significativa tanto a mejorar la sustentabilidad ambiental del sector energético de los países, como a mejorar el tema de

accesibilidad de energía, permitiendo el suministro de electricidad a comunidades relativamente aisladas, mientras que el uso de tecnologías de almacenamiento y captura de CO<sub>2</sub> permitiría mejorar la sustentabilidad de los países que utilizan combustibles fósiles.

Finalmente, la integración de una política industrial asociada al desarrollo en el uso y transformación de la energía es la forma de promover que los beneficios de una estrategia energética global orientada a la seguridad, la equidad y la sustentabilidad ambiental, redunden en más y mejor empleo nacional, estimulen la demanda local de bienes y servicios, y promuevan la innovación y la creatividad tecnológica nacional.

En este trabajo se hacen propuestas para abordar estos temas y se plantea un escenario energético alternativo para el país.

## El sector energético en los países iberoamericanos.

Para iniciar el análisis se consideró al conjunto de países iberoamericanos como marco de referencia, dadas las similitudes en aspectos económicos y culturales con México.

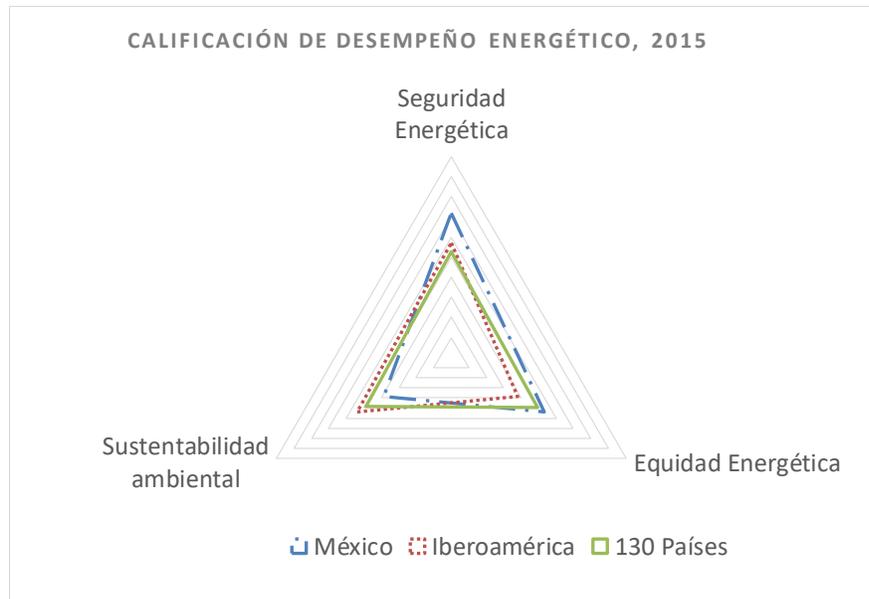
El conjunto de países iberoamericanos está integrado por los países de América Latina y el Caribe, España y México. El sector energético se analiza utilizando los conceptos planteados en el Trilema Energético definido por el Consejo Mundial de Energía [1 y 2], que ve al sector energético en tres dimensiones<sup>2</sup>: Seguridad Energética, Equidad o accesibilidad de la energía, y Sustentabilidad Ambiental [2].

Los datos que el Consejo Mundial de Energía (WEC) reporta para Iberoamérica [3] se muestran en la figura 1, donde se observa para la región, una fortaleza en el tema de sustentabilidad ambiental y debilidades relativas en accesibilidad y seguridad energética. México, comparado con Iberoamérica muestra una ventaja en seguridad energética, pero rezagos en sustentabilidad ambiental. El país, por su desempeño energético ponderando las tres dimensiones del trilema se ubica en el lugar número 11 de 22 países de Iberoamérica<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> El Consejo Mundial de Energía define los conceptos del trilema de la manera siguiente: **Seguridad energética** es la gestión eficaz de las fuentes de energía primaria, tanto domésticas como importadas, la confiabilidad de la infraestructura energética y la capacidad del sistema para satisfacer la demanda actual y futura de energía. **Equidad** es la accesibilidad a precios asequibles de la energía para toda la población. **Sustentabilidad** incluye lograr eficiencia en la producción y uso de energía, y el desarrollo de energías renovables y bajas en carbono

<sup>3</sup> Los datos fueron extraídos de la base de datos del WEC y las gráficas son elaboración propia



*Figura 1. El sistema energético de Iberoamérica*

## El sector energético en México

### **Escenario energético al 2030**

#### ***Análisis de la demanda***

El sector energético mexicano crece aceleradamente para satisfacer las necesidades de una población que todavía crece. Al mismo tiempo que el sector crece es necesario que se modifique sustancialmente para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y poder así cumplir los compromisos internacionales que el país ha adquirido.

Para el escenario al 2030, se tomaron como base los documentos publicados por la SENER en las prospectivas de gas natural, petrolíferos y electricidad para el periodo 2015 – 2029 [3, 4, 5 y 6], extrapolando al 2030, y el PRODESEN, que llega hasta el 2030.

En el sector eléctrico, se observa un cambio cualitativo en las tecnologías utilizadas: se elimina el uso del carbón y del combustóleo como energéticos primarios y se incrementa sustancialmente la participación de las energías limpias, incluyendo las renovables, la nuclear y la cogeneración eficiente, lo cual mejora la sustentabilidad ambiental. Adicionalmente el sector, para mejorar el tema de equidad, tiene que ampliar su cobertura. En 2013, el 98% de la población tenía acceso a la electricidad [3], lo que dejaba a más de dos millones de habitantes sin el servicio. Uno de los programas planteados es reducir este porcentaje a la mitad, para el 2018. Se consideró el sector eléctrico por separado, debido a su importancia desde el punto de vista de emisiones, aunque los usuarios finales son fundamentalmente el sector residencial, el industrial y el de servicios.

En el sector transporte se observan los efectos de la cada vez mayor concentración urbana y el aumento de la flota vehicular, llevando a un incremento importante en el uso de energéticos y de

las emisiones, en porcentajes superiores a los del aumento de la flota vehicular. No se aprecian cambios substanciales en la planeación de este sector. El sector industrial también muestra un incremento, lo cual es de esperarse, dadas las necesidades de crecimiento económico del país. Sin embargo, tampoco se encuentran cambios substanciales en las políticas de uso de energéticos y es de destacar la casi nula participación de la energía solar como fuente de calor.

La evolución del consumo de energéticos primarios y de las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada uno de los sectores se presentan en las figuras 2 y 3. El consumo energético en 2015 fue de 6,900 PJ que son equivalentes a 3.04 millones de barriles diarios de petróleo (Mbpe), lo que contrasta con la producción de 2.2 Mbpe más 0.8 Mbpe de producción de gas natural. Las emisiones de CO<sub>2</sub>, calculadas de acuerdo a lo establecido por SEMARNAT [7], se incrementan en 25%, mientras que el consumo de energéticos primarios lo hace en 29%. Esta diferencia se explica por la sustitución de carbón y combustóleo por gas natural en la generación eléctrica. Al observar estas gráficas es necesario recordar que el sector petrolero utiliza algunos energéticos como materia prima para sus procesos y este consumo no resulta en emisiones.

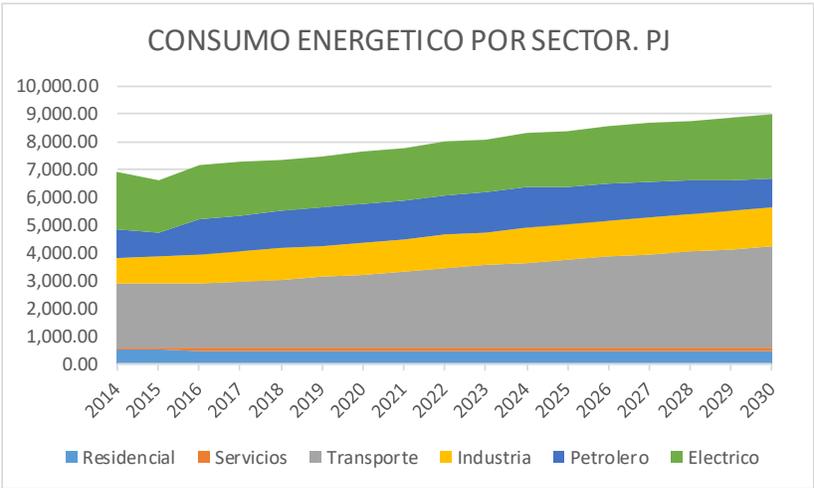


Figura 2. Consumo de energía primaria por sector

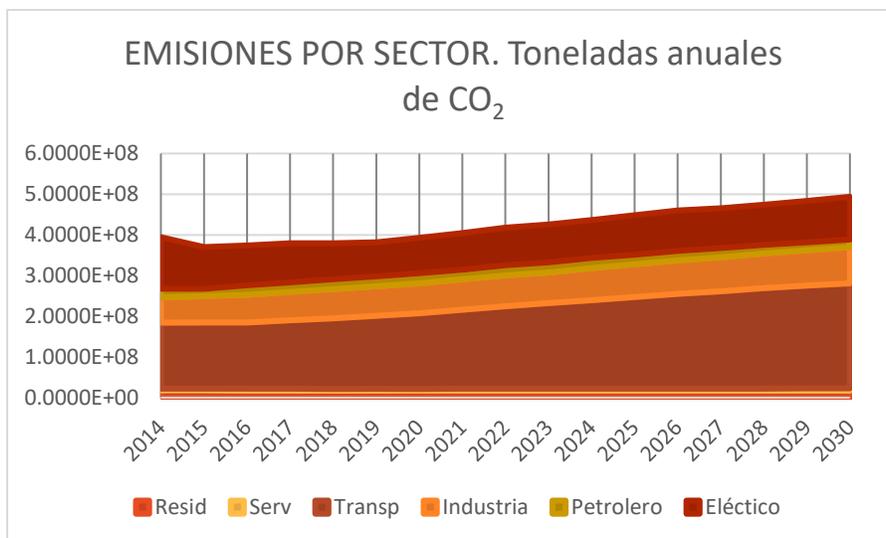


Figura 2. Emisiones de GEI por sector

El sector transporte es el que más crece en emisiones con un 59% de crecimiento, pasando de 162 a 258 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> y representando el 46 % de las emisiones en el 2030, cuando en el 2014 representaba el 39%. Es importante notar que el consumo de energéticos y las emisiones crecen en un porcentaje mayor que el crecimiento de la flota de vehículos. El consumo de energéticos del sector transporte se presenta en la figura 4.

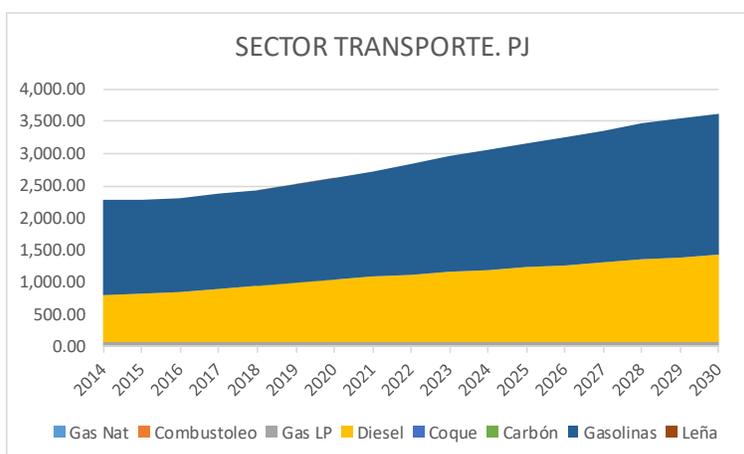


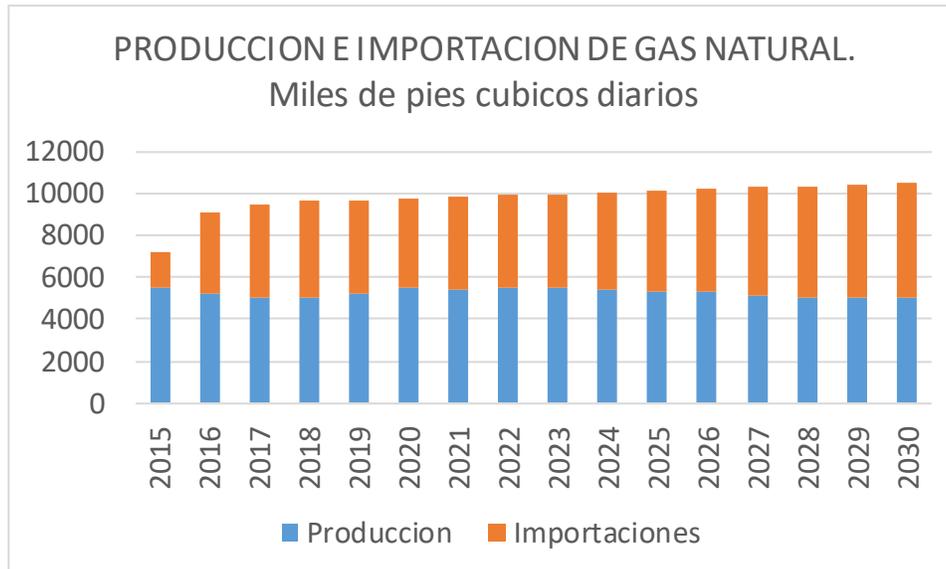
Figura 4. Consumo energético del sector transporte

### Análisis de la oferta.

Analizando la oferta de combustibles, se detecta un crecimiento importante de las importaciones tanto de gasolina como de gas natural, consecuencia de los bajos precios del gas en los EE.UU y del nulo crecimiento de la capacidad de refinación en el país. La figura 5 muestra la producción nacional de gas natural en un escenario mínimo con una producción alrededor de 5,500 millones de pies cúbicos por día (pcd), y una demanda que llega a 10,400 pcd, por lo que la importación requerida

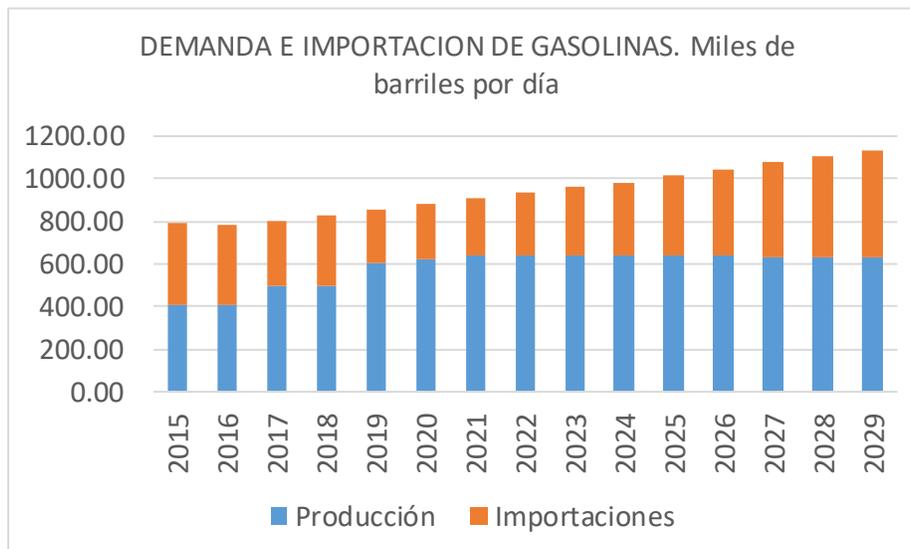
sería de casi 5,000 millones de pcd; es decir, casi un 50%.

Hay también un escenario máximo de producción que no se presenta en este documento, que tampoco cubre la demanda, llegando a una producción nacional de alrededor de 8,500 millones de pcd.



*Figura 5. Producción nacional y consumo de gas natural. Escenario mínimo de producción*

En el caso de las gasolinas, mostrado en la figura 6, la producción se estabiliza en el 2020 cuando las importaciones llegan a un mínimo y después crecen hasta niveles porcentuales similares a los actuales que, como en el caso del gas natural, son cercanos al 50%.



*Figura 6. Demanda e importaciones de gasolinas*

La dependencia energética del país de los hidrocarburos es significativa; en 2013 el 82% de la oferta primaria de energía provino de este recurso, en tanto el promedio mundial fue 53% [16]. El volumen de reservas de hidrocarburos del país en las últimas tres décadas mantiene una tendencia secular al deterioro. Las reservas probadas en la actualidad ascienden a 10,243 millones de barriles, equivalentes a 8 años de extracción, al ritmo registrado en 2015 (1,238 millones de barriles) [17]. La prospectiva a 2030, incluyendo los resultados esperados en la aplicación de la reforma energética, evidencia que el volumen de dichas reservas probadas disminuirá en los próximos años y que apenas recuperará su nivel actual al término de ese período (escenario mínimo de las prospectivas).

La capacidad instalada de refinación en el país, la de producción y procesamiento de gas, y la de petroquímica de primera transformación, son insuficientes para cubrir los requerimientos crecientes del mercado nacional, aunque éstos apunten hacia una lenta expansión. Las estimaciones incluidas en los estudios oficiales de prospectiva a 2030 no ofrecen indicaciones de dinamismo compatible con esos requerimientos. Es por ello previsible que el saldo de la balanza petrolera con el exterior, alcanzado en 2015, sea negativo por primera vez en casi cuatro décadas (10 mil millones de dólares) [18], y se prevé que esta tendencia continuará al horizonte a 2030.

## Recapitulación sobre la planeación vigente

El entorno mundial y las condiciones del país han cambiado significativamente en los últimos 15 años. Por un lado, a nivel mundial surge la preocupación por el cambio climático y la necesidad de que todos los países hagan esfuerzos para reducir las emisiones de GEI. A nivel del país, México era un gran exportador de energéticos en el año 2000, cuando producía esencialmente el doble de lo que consumía, pero en la actualidad la producción y el consumo están equilibrados, con una tendencia deficitaria para los años próximos. Todo esto requiere una planeación energética refinada y distinta de la que se hacía hace 15 años.

México ha logrado en fechas recientes, avances significativos y sistemáticos en el sector eléctrico. El suministro de energía eléctrica y el abasto de combustibles para atender las necesidades del país, se han caracterizado por impulsar el crecimiento y cubrir los requerimientos de la economía nacional. Los avances logrados se han cimentado en la reducción de emisiones de GEI al utilizar de manera creciente gas natural, en sustitución de otros hidrocarburos, y en intensificar la capacidad de generación eólica. A pesar de la importante participación de las energías limpias, se observa que las emisiones siguen creciendo, particularmente en la segunda mitad del periodo y parece claro que, con la dependencia del sector del gas natural como energético primario, no será posible lograr las metas sugeridas por la Agencia Internacional de Energía<sup>4</sup> a menos que se adopten tecnologías como la captura de CO<sub>2</sub>, que no aparecen de manera explícita en la planeación.

El sector transporte crece de manera importante y no se ven cambios cualitativos que limiten sus emisiones, por lo que se vuelve cada vez más importante, y lo mismo se aplica al sector industrial. El sector transporte es, además, el demandante de gasolinas y diésel, que son en gran porcentaje importadas, por lo que los ahorros en este sector tendrían múltiples impactos adicionales a la reducción de emisiones.

---

<sup>4</sup> La meta sugerida por la AIE es de menos de 50 gramos de CO<sub>2</sub> por KW-hr generado

En efecto, respecto a la seguridad energética, rubro en que el país se ha caracterizado por un desempeño sobresaliente, ésta registra signos de vulnerabilidad y alerta derivadas del gran volumen de importaciones de gas natural, gasolinas y diésel.

## Escenario alternativo propuesto

Aunque se considera que la planeación energética actual es una mejora substancial sobre los planes anteriores, no parece ser suficiente para lograr las metas de mitigación de cambio climático que México ha adoptado.

Se plantea entonces un escenario alternativo que aborda los tres subsectores más importantes del sector energético: el transporte, la industria y la generación eléctrica. Este escenario se complementa con un conjunto de recomendaciones de política pública, para lograr que el desarrollo del sector energético, además de cumplir con los compromisos ambientales, sirva también de apoyo para el desarrollo económico del país.

## Cambios propuestos en el sector transporte

El sector transporte emitió casi el 40% de las emisiones de GEI, provenientes de la transformación y el uso de la energía en el país, con los consecuentes efectos de concentración de carbono en la atmósfera y repercusiones en el cambio climático global. A título ilustrativo, la Ciudad de México [15] generó en 2012, por si sola, el 5% de las emisiones nacionales de CO<sub>2</sub>.

En consecuencia, la atención al sector transporte es prioritaria para lograr una sustentabilidad ambiental y es también urgente atenderlo por su impacto en las importaciones de gasolinas y diésel.

A continuación se propone la aplicación de 10 medidas generales para la reducción en el consumo de energéticos y la mitigación de emisiones de efecto invernadero, y se indica su contribución a la reducción de emisiones.

1. Normatividad de eficiencia, emisiones y calidad de combustibles. Aumento de los límites de rendimiento de los motores de combustión interna en vehículos ligeros y de carga, límites a la emisión de fuentes fijas y móviles, y especificaciones técnicas de los combustibles con criterio de protección al ambiente. Aportación a reducción: **11.36%**
2. Vehículos híbridos y eléctricos. Introducción de vehículos ligeros “híbridos” (consumo de gasolina y energía eléctrica) y de vehículos eléctricos enchufables. Los híbridos minimizan su consumo de hidrocarburos y los eléctricos usan solo energía eléctrica con eficiencia mayor al 90%. Aportación a reducción: **7.78%**
3. Biocombustibles. Producción de etanol y biodiésel para usos en motores de combustión interna. La producción debe ser regulada para que no compita en recursos con los destinados a la producción de alimentos. Aportación a reducción: **20.04%**

4. No importación de vehículos ineficientes. Minimizar e incluso cancelar la importación de vehículos usados de menor eficiencia. Aportación a reducción: **10.1%**
5. Optimización del transporte de carga. Integración de empresas de transporte y aplicación de sistemas de a fin de optimizar los trayectos y minimizar los recorridos sin carga. Aportación a reducción: **16.18%**
6. Optimización del transporte público. Optimizar las rutas de transporte público, integración modal y cambios a tecnologías más eficientes (Autobuses de transporte rápido o BRT), mejorar la seguridad y confort para desincentivar el uso de vehículos particulares. Aportación a reducción: **4.51%**
7. Programa de transporte limpio. Aplicación de medidas de eficiencia y cambios tecnológicos en los vehículos de servicios públicos como norma para todo el país. Aportación a reducción: **8.80%**
8. Verificación de emisiones contaminantes. Programa de verificación de emisiones en todo tipo de vehículos de combustión interna que restrinja la circulación en zonas urbanas. Aportación a reducción: **3.80%**
9. Planeación urbana de nuevos desarrollos. Aplicación de políticas de desarrollo urbano en nuevos desarrollos y el crecimiento de las existentes, que mejoren los indicadores de densidad de población, usos de suelo mixtos, empleos por vivienda, y balance de empleos y trabajadores. Aportación a reducción: **8.20%**
10. Desarrollo de programa de ferrocarril. Programa de desarrollo de una red de trenes a lo largo del país. Aportación a la reducción: **9.1%**

El resultado de la aplicación simultánea de estas medidas en la reducción de consumo de combustibles y de emisiones contaminantes del sector transporte en relación al escenario al 2030 se muestra en las figuras 7 y 8.

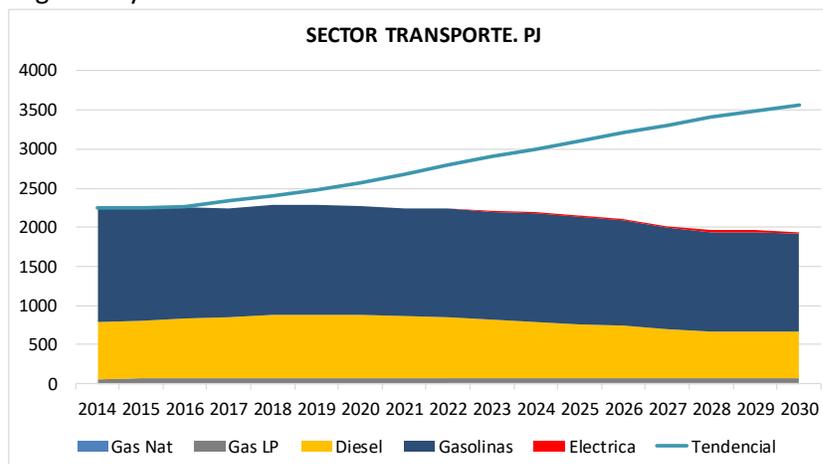
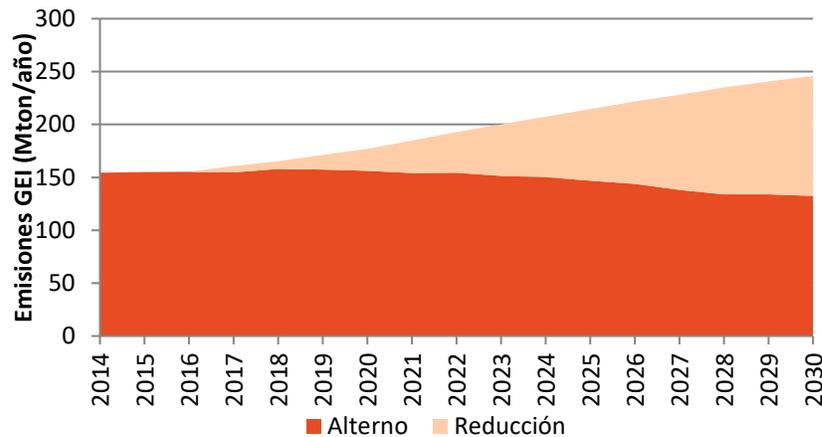


Figura 7. Consumo de combustibles en el sector transporte en el escenario alterno, comparado con el escenario 2030



*Figura 8. Emisiones del sector transporte en los escenarios 2030 y alternativo*

Para la estimación de los efectos en las emisiones se utilizaron los valores de la referencia: Islas, Manzini et al. [10].

Conviene resaltar que con medidas normativas que incluyen las normas para vehículos nuevos, la limitación a importaciones de vehículos usados y la verificación de emisiones, se logra un 25.26% de la reducción de emisiones. Con la optimización del transporte de carga, incluyendo el ferrocarril se obtiene otro 25% de reducción. Las otras medidas, optimización del transporte público, planeación urbana y vehículos eléctricos e híbridos representarían un 30% adicional de reducción, pero se considera que serían a más largo plazo y, finalmente, el uso de biocombustibles podría lograr un 20% de reducción, aunque su potencial de producción tendría que ser verificado, particularmente por los requerimientos de tierras de cultivo.

Con respecto al efecto basado en la demanda de energéticos presentado en la figura 6, se alcanza una reducción de 46.2%, en relación al escenario tendencial, con lo que se reducen de manera importante las importaciones.

Como puede observarse el descenso en el 2030 es importante, aún por debajo de la demanda del 2014 en 13.4%. Al final del periodo el descenso se ve compensado por el aumento de población y con ello de la demanda resultando en la estabilidad que se observa.

En el escenario de demanda de energía alternativo se observa un incremento marginal de la demanda de energía eléctrica debido a la introducción de los vehículos híbridos enchufables y eléctricos.

### Cambios propuestos en el sector industrial

El sector industrial tiene un alto consumo de gas natural y gas LP como energéticos primarios. Para mejorar el desempeño energético en el sector industrial se requiere la optimización de sus procesos para minimizar las necesidades energéticas. Esto es necesario ya que la mayoría de los procesos se

diseñaron en épocas en las que el consumo energético no era un factor primordial en los costos de producción.

El combustible que se utiliza en la industria es en su mayoría para proporcionar calor de baja (40-100°C) y media temperatura (120-250°C). Esta energía se puede suministrar adecuadamente con colectores solares, planos para baja temperatura y a concentración para temperatura media. La tabla 1 muestra los consumos de combustibles en la actualidad y los esperados al 2029 con las mismas tecnologías actuales y el escenario que se podría lograr optimizando el consumo de energía. La tabla 2 muestra los consumos que se tendrían para distintos grados de penetración de la energía solar, considerando en un caso solo calor de baja temperatura y, en un segundo caso, incluyendo el calor de media temperatura.

*Tabla 1. Consumos de energía al 2029 en el sector industrial*

Industria	2014 (120 millones habitantes)			2029 (136 millones) <sup>1</sup> Escenario mediano			2029 (136 millones) <sup>2</sup> Escenario optimizado		
	energía (PJ)	gas seco (PJ)	biomasa u otros (PJ)	energía (PJ)	gas seco (PJ)	biomasa u otros (PJ)	energía (PJ)	gas seco (PJ)	biomasa u otros (PJ)
Papel, pulpa y cartón	52.00	30.96	13.40	58.75	41.00	17.74	19.60	13.68	5.92
Cerveza	19.87	13.7	6.10	26.74 <sup>5</sup>	18.42	8.30	18.70 <sup>4</sup>	12.90	5.80
Química	85.91	78.5	7.40	115.62 <sup>5</sup>	105.60	10.02	80.90 <sup>4</sup>	73.90	7.00
Pemex Petroquím.	98.84	98.31	0.52	129.67 <sup>5</sup>	128.97	0.68	90.70	90.20	0.47
Fab. vidrio	54.84	53.01	1.83	73.80 <sup>5</sup>	71.34	2.46	51.70	50.00	1.72
Fab. hule	8.29	5.74	2.54	11.15 <sup>5</sup>	7.72	3.41	7.81	5.41	2.39
Fertilizantes	0.65	0.5	0.15	0.87 <sup>5</sup>	0.69	0.20	0.61	0.48	0.14
Tabaco	0.23	0.22	0.01	0.31 <sup>5</sup>	0.30	0.01	0.22	0.21	0.007
Refrescos	6.57	1.08	5.49	8.84 <sup>5</sup>	1.45	7.39	6.19	1.01	5.17

<sup>1</sup> La prospectiva de nominada "Escenario medio" se basa en el uso de indicadores de consumo de bienes (por ejemplo, como kg de papel por habitante y el consumo de energía por tonelada de papel), siguiendo las mismas tendencias que en 2014.

<sup>2</sup> La prospectiva de nominada Escenario bajo optimista" se basa también en el uso de indicadores de consumo de bienes pero considerando reducciones al 2029 por Eficiencia energética y por disminución de sus intensidades de consumo (por ejemplo kg de papel/hab.

<sup>3</sup> Se consideró una aportación solar total del 40% del consumo total de calor de proceso.

<sup>4</sup> Se consideró una reducción en su consumo por eficiencia energética del 30% para 2029.

<sup>5</sup> Se calculó con un crecimiento anual del 2%. También puede hacerse considerando un consumo/cápita de 6.1 a 7.9 litros/mes para papel, extrapolado al 2029.

*Tabla 2. Consumos energéticos en el sector industrial, incorporando energía solar*

Industria	2029 (136 millones) <sup>2</sup> Escenario bajo optimizado			2029 (136 millones) <sup>3</sup> Escenario bajo optimizado con solar al 40%			2029 (136 millones) <sup>4</sup> Escenario bajo optimizado con solar al 60%		
	energía (PJ) (sin eléctrica)	gas seco (PJ)	biomasa otros (PJ)	energía (PJ) gas seco (PJ)	solar baja temperatura (PJ)	solar media temperatura (PJ)	energía (PJ) gas seco (PJ)	solar baja temperatura (PJ)	solar media temperatura (PJ)
Papel, pulpa y cartón	19.60	13.68	5.92	19.6 11.8	5.50	2.30	19.6 7.9	8.20	3.50
Cerveza	18.70 <sup>5</sup>	12.90	5.80	18.7 11.2	4.50 <sup>6</sup>	3.00 <sup>6</sup>	18.7 7.5	6.70	4.50
Química	80.90	73.90	7.00	80.9 64.7	11.30 <sup>7</sup>	4.90 <sup>7</sup>	80.9 56.6	17.00 <sup>8</sup>	7.30 <sup>8</sup>
Pemex Petroquím.	90.70	90.20	0.47	90.7 72.5	12.70	5.50	90.7 63.5	19.00	8.20
Fab. vidrio	51.70	50.00	1.72	51.7 41.3	7.20 <sup>6</sup>	3.10 <sup>6</sup>	51.7 20.7	18.60	12.40
Fab. hule	7.81	5.41	2.39	7.81 4.7	0.00	3.10	7.81 3.12	0.00	4.70
Fertilizantes	0.61	0.48	0.14	0.61 0.37	0.12	0.12	0.61 0.25	0.18	0.18
Prod. tabaco	0.22	0.21	0.007	0.22 0.14	0.05	0.03	0.22 0.13	0.08	0.05
Elaboración refrescos	6.19	1.01	5.17	6.19 3.71	2.48	0.00	6.19 2.48	3.71	0.00

6. Se consideró que de las necesidades de calor de proceso 60% son de baja temperatura (<100C) y 40% de media temperatura (100-150°C).

7. Se consideró que solo el 20% de las necesidades de calor de proceso pueden ser satisfechas con SHIP, por demandar grandes áreas de colección.

8. Se consideró que solo el 30% de las necesidades de calor de proceso pueden ser satisfechas con SHIP, por demandar grandes áreas de colección. De este 30%, se consideró que el 70% es calor solar de baja temperatura y 30% de calor solar de media temperatura.

De las dos tablas presentadas anteriormente se obtienen varias conclusiones importantes:

- Optimizando los procesos internos de producción se logra una reducción importante de energéticos, pasando de 425.0 PJ en un escenario inercial a 276.4 PJ en un escenario optimizado; es decir, un ahorro del 35 %.
- Utilizando energía solar para suministrar calor de proceso, se obtiene un ahorro adicional del 42 % sobre el escenario optimizado, cuando se tiene una penetración del 60% y del 25% si la penetración fuera solo del 40%. En términos de gas natural, los ahorros representan una reducción del 34.5% y de 15.1% respectivamente.

Tomando en cuenta que hay limitaciones de disponibilidad de capital de inversión, para el escenario alterno se considerará una penetración del 40% al 2030, iniciando gradualmente en el 2020.

Con estas consideraciones los consumos de combustible, de gas natural y LP, y las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector industrial para el escenario alterno, comparado con el escenario base, se presentan en las figuras 9 y 10.

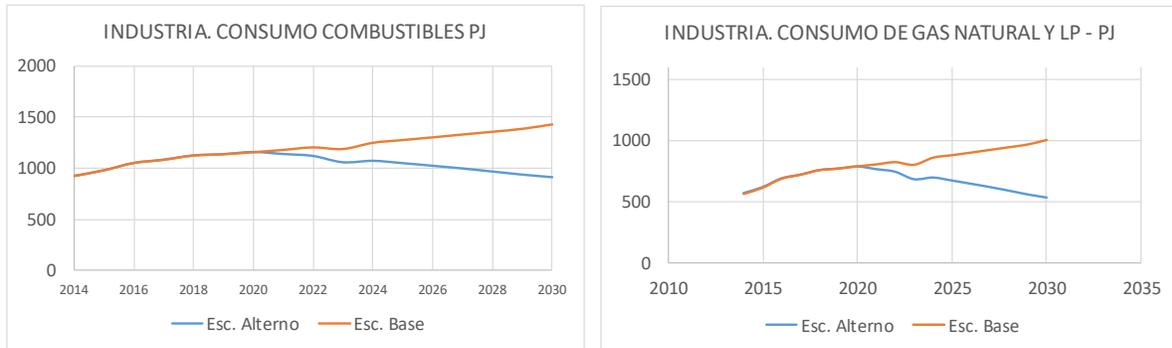


Figura 9. Consumos totales de combustible y de gas natural y LP en el sector industria

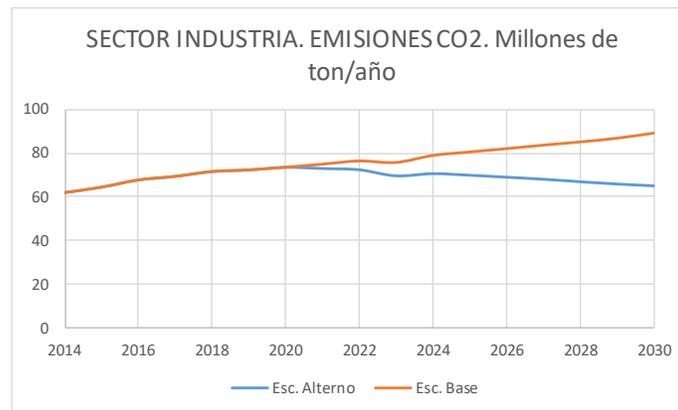


Figura 10. Emisiones de CO<sub>2</sub> por uso de combustibles en el sector industria

### Cambios propuestos en el sector eléctrico

En el sector eléctrico es evidente que ya se han incluido en los planes existentes, medidas de reducción de emisión de GEI, particularmente la eliminación de combustibles fósiles distintos al gas natural y el impulso a las energías renovables, la nuclear y la cogeneración eficiente. Se observan sin embargo algunas tendencias de incremento en emisión de GEI que se considera que es necesario revertir y, adicionalmente, los resultados de las recientes subastas para generación de electricidad, han mostrado costos de las energías renovables menores a lo que se consideraba en la planeación.

Se considera que sigue siendo necesario reforzar la seguridad energética, diversificando las fuentes primarias de energía, particularmente cuando éstas son importadas y es necesario tener flexibilidad para satisfacer la demanda en caso de que algunas opciones no tengan éxito como podría ser la energía nuclear.

Se tienen que intensificar las medidas que incrementen la sustentabilidad ambiental para mantenerse alineados con las metas planteadas por un escenario de no más de 2°C de incremento de temperatura global.

Con estas consideraciones se plantean cambios esencialmente en tres áreas:

- Incremento de la participación de la energía solar y de la geotermia

En el escenario base, la generación de electricidad en el 2030 será de 470 TW-h, de los cuales 6% será con geotermia y energía solar, correspondiendo a 28.22 TWh.

Considerando que de Geotermia se tendrán 900 MW, con un factor de planta del 85%, lo que arroja una generación de 6.58 TWh. El resto, 21.64 TWh será solar.

Para la geotermia se consideró que se podía triplicar la capacidad para 2030, obteniendo una generación de 19.74 TWh. Para la solar, debido a los bajos costos [21], se consideró que se podría duplicar la generación, llegando a 43.28 TWh.

Este incremento de generación renovable de 34.8 TWh serviría para reducir la generación con gas natural que pasaría de 272.83 a 238 TWh; es decir, en el 2030 la generación con gas natural sería del 50.6% en el escenario alterno en lugar del 58% del escenario base. Esta reducción de generación con gas natural se daría empezando en el año 2023 de forma gradual hasta el 2030.

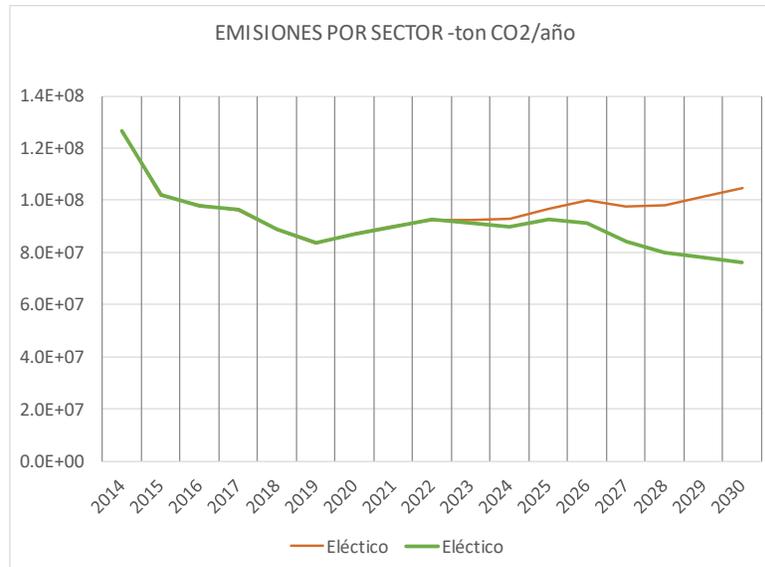
- Implantación de la tecnología de captura y almacenamiento de bióxido de carbono

El uso intensivo del gas natural ha resultado positivo desde el punto de vista ambiental y económico, dados los bajos precios de este combustible y sus emisiones unitarias bajas. Sin embargo, el escenario al 2030 nos lleva a una participación del gas natural en la generación de electricidad superior al 50% y, aún más, si se toma en cuenta que la cogeneración eficiente es también con gas natural. Esto impediría que se logaran los niveles de emisiones requeridos de menos de 50 gramos de CO<sub>2</sub> por kW-hr generado, a menos que se implante la tecnología de captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> (CCS – carbon capture and storage).

Se consideró que la tecnología de CCS se podría empezar a implantar a partir del 2025, llegando al 2030 con un 20% de la capacidad a gas natural con captura de CO<sub>2</sub>. Este 20% de generación emitiría solo el 10% de lo que emitirían sin CCS.

Se sugiere, siguiendo lo planteado por González [12] que todas las nuevas centrales de ciclos combinados y de cogeneración eficiente se diseñen bajo el esquema de “CCS ready” de manera que se tenga flexibilidad en la instalación de esta medida al paso que se requiere.

Con estas adiciones las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera se modificarían como se muestra en la figura 11.



*Figura 11. Emisiones de CO<sub>2</sub> del sector eléctrico. Escenarios base y alternativo*

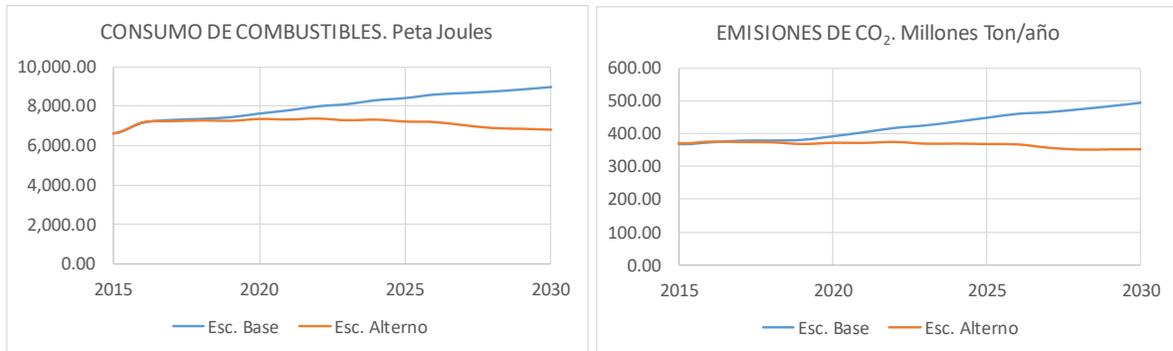
## Resultados del escenario alternativo

Con las medidas planteadas para cada subsector, se obtienen los resultados en consumo de energéticos y de emisiones que ahora se presentan. Es necesario enfatizar que se trata de un escenario, que muestra lo que sucedería si se toman las medidas propuestas, por lo que es indicativo de las acciones que deben tomarse, aunque no necesariamente se cumplirán en su totalidad.

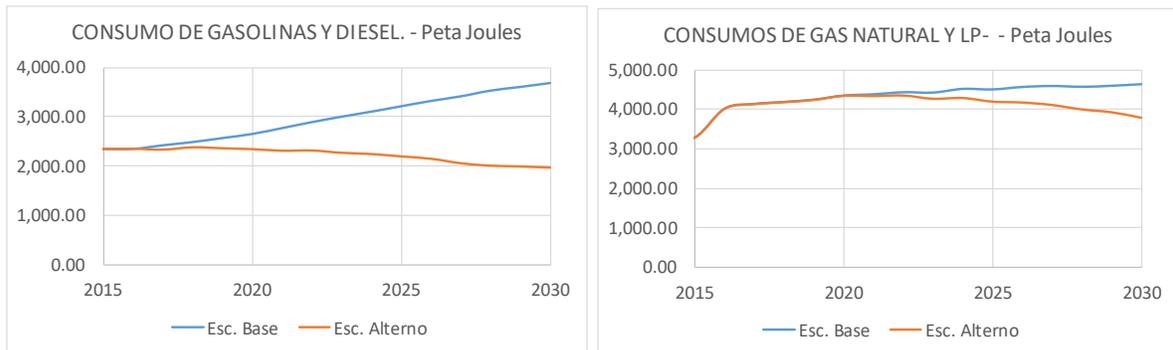
En el sector transporte se plantearon varias acciones que, en conjunto, logran una reducción de más del 30% de las emisiones del escenario base.

En el sector eléctrico se plantearon medidas de incremento de uso de renovables y de aplicación de la tecnología CCS, logrando una reducción en emisiones del 25% y revirtiendo la tendencia creciente de estas emisiones.

En el sector industrial se plantearon opciones de uso de energía solar para suministrar calor de proceso, logrando una reducción de emisiones de 27%. Con estas observaciones, la figura 12 muestra el consumo de combustibles y las emisiones del escenario base y del escenario alternativo; y la figura 13 muestra el cambio en el consumo de gasolinas, diésel, gas natural y gas LP. En esta última figura es importante recalcar la disminución de la importación de gasolinas.



*Figura 12. Consumo de combustibles y emisiones de GEI en escenarios 2030 y alternativo*



*Figura 13. Consumo de gasolinas y diésel en escenarios 2030 y alternativo*

Es claro que la implantación del escenario alternativo tiene costos asociados, pero tiene múltiples beneficios para el país. Las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen, alineándonos con las metas establecidas; el consumo de gasolinas se reduce substancialmente (en 40%) y el de gas natural en 25% pudiendo eliminar una buena parte de las importaciones. La implantación de energías renovables, solar y geotérmica, abre posibilidades para la participación de la industria nacional, siempre y cuando se acompañe con políticas públicas adecuadas.

En resumen, el escenario alternativo planteado mejora la seguridad energética del país, impulsa el desarrollo económico y mejora la sustentabilidad del sector.

## Estrategias puntuales y políticas públicas propuestas

Se planteó un escenario energético alternativo que esencialmente parte de la planeación vigente e incorpora medidas adicionales para reducir emisiones y consumos energéticos. Este escenario alternativo representa mejoras en el tema de sustentabilidad ambiental al reducir las emisiones y en el tema de seguridad energética, al reducir la necesidad de importaciones de energéticos. Sin embargo, para lograr que la implantación de este escenario alternativo no sea una carga para el desarrollo económico del país, sino que lo impulse y que sea aceptado y apoyado por la sociedad, es necesario implantar políticas públicas, algunas de las cuales se sugieren a continuación.

- Uso de las estrategias energéticas para impulsar el desarrollo económico

- Distensión de conflictos sociales

## Uso de las estrategias energéticas para impulsar el desarrollo económico

El escenario alternativo propuesto implica el uso de varias tecnologías que no son de uso generalizado en el país: energía solar tanto fotovoltaica con térmica; captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>; geotermia; y biocombustibles. Todas estas tecnologías están disponibles en el mercado mundial, donde también se pueden adquirir los equipos y sistemas. Ninguna de estas tecnologías presenta barreras insalvables que impidan la participación de la industria nacional en la cadena de suministro, aunque si requieren de la implantación de políticas públicas de apoyo a la planta productiva nacional.

Las empresas energéticas son generalmente conservadoras y reacias a experimentar con tecnologías nuevas o con proveedores que no estén ya bien establecidos en el mercado mundial, por lo que, para desarrollar empresas mexicanas proveedoras de tecnologías y equipos, será necesario establecer programas de apoyo que compensen la falta de experiencia de las empresas locales.

De manera general los apoyos requeridos serían:

- Acceso a capital con tasas de interés similares a las del mercado mundial
- Aval gubernamental para el otorgamiento de garantías de funcionamiento
- Incentivos fiscales y/o subsidios para compensar los sobrecostos de los primeros proyectos
- Incentivos del tipo de los certificados de energías limpias para el uso de energía solar en calor de proceso
- Programas de distensión de los conflictos sociales

Para lograr que la industria local se desarrolle es necesario, además, potenciar la ciencia y la tecnología en el país considerando que la respuesta de este sector, para ser de utilidad a la industria tiene que ser:

- Oportuna. Esto implica implantar un mecanismo de evaluación de proyectos más ágil, que permita pasar de la propuesta al suministro de recursos en plazos de semanas y no de meses.
- Pertinente. Para esto se requiere involucrar a representantes del sector productivo en los mecanismos de evaluación de proyectos y no dejar solamente al mismo sector de investigación con esta tarea.

## Distensión de conflictos sociales

En aras de asegurar un adecuado crecimiento del sector energético es importante integrar en el análisis del mismo la dimensión social, es decir, las externalidades tanto positivas como negativas que puede tener en las comunidades o grupos sociales en los cuales se desarrolla e implanta la tecnología referida. Este documento considera únicamente el segmento de las energías renovables.

Es importante recalcar dos hechos:

1. Los aspectos sociales de la implantación de proyectos de infraestructura energética deben ser objeto de una atención específica y no ser tratados junto con los temas de carácter ambiental, aun cuando la implementación de una tecnología pueda tener efectos tanto en aspectos sociales como en los ambientales a la vez.

2. Los aspectos sociales tienen características muy particulares que deben ser comprendidas y analizadas de manera rigurosa para poder aportar soluciones adecuadas y oportunas a los problemas que se puedan prever.

Muchas veces se menosprecia la dimensión social por la importancia que juegan las “percepciones” de la población que, en muchos casos, son vistas como opuestas a “la realidad” y tiende a calificárselas como erróneas, siendo que, desde su particular visión, son ciertas. Las percepciones de la población deben tomarse muy en serio, pues son factores que inciden de manera importante en los proyectos, tengan o no fundamentos técnicos o económicos.

A continuación, se presentan los grandes problemas asociados a cada una de las tecnologías de energía renovable y algunas consideraciones para aportar soluciones viables.

### **Principales impactos**

La geotermia tiene varias implicaciones: (i) de espacio, por la extensión de las áreas superficiales en las que se ubican los pozos para extraer y reinyectar el fluido geotérmico, lo que podría afectar a la población cercana al sitio, (ii) en ciertos casos, la presencia de ácido sulfhídrico en el fluido geotérmico puede generar una contaminación desagradable al olfato en el entorno cercano, (iii) percepciones de riesgos relacionadas con actividad sísmica propiciada por la explotación geotérmica y (iv) señalamientos en la prensa de los múltiples efectos en aspectos de salud de la población en relación con este tipo de centrales, aunque se carece de datos basados en estudios específicos que lo demuestren.

La energía eólica viene acompañada frecuentemente de quejas asociadas con contaminación visual, ruido y mortandad de aves migratorias y quirópteros. En México una percepción común, aunque en la mayoría de los casos equivocada, es que los inversionistas se enriquecen a costa de las poblaciones locales. Sin embargo, esto ha fomentado la aparición de grupos de oposición organizados, con agendas políticas que poco tiene que ver con las inversiones en renovables, que se aprovechan de la falta de una adecuada asesoría a la población. Una de las ventajas de los proyectos eólicos, a diferencia de las demás tecnologías renovables es que no inhabilitan la tierra en la que se instalan, para continuar con sus usos acostumbrados.

En cuanto a la biomasa, la actitud cambia según se trate de biocombustibles de primera generación o de segunda generación. Los primeros generan oposición debido a que las aplicaciones como energético compiten con la producción de alimentos, encareciendo estos últimos. En algunas regiones prevalece la idea de que esto privilegia a las grandes corporaciones más que a las comunidades locales (los grandes productores de los insumos agrícolas que generan los biocombustibles versus los pequeños agricultores que carecen de asesoría tecnológica y de gestión).

En cuanto a la energía solar, existe una gran gama de dispositivos para transformar la energía solar a energía eléctrica o térmica. El calentador solar de agua es bien aceptado, aunque su mayor problema es el costo de inversión inicial asociado. Los demás sistemas solares, particularmente los fotovoltaicos, requieren de grandes extensiones de terreno. Sin embargo, éstas usualmente no son tierras productivas (se localizan en zonas desérticas o áridas) por lo que no suelen generar una percepción negativa en los habitantes.

Las mini y micro hidroeléctricas usualmente presentan problemáticas comunitarias entre

poblaciones río arriba y río abajo por la reubicación de personas. En ocasiones, por falta de información, se crean falsas expectativas que posteriormente generan descontento como el creer que la instalación de una central hidroeléctrica resolverá múltiples problemas locales.

### **Algunas soluciones**

En este tema, las demandas son genéricas y aplican prácticamente a todos los proyectos de energías renovables o limpias (según la definición que se ha establecido en la legislación mexicana) que se tratan en este documento, por lo que proponemos algunas soluciones también generales.

Se deben llevar a cabo estudios basados en sondeos con las comunidades, autoridades e inversionistas, o desarrolladores verdaderamente interesados y afectados (positiva o negativamente), para tener un mapeo acerca de la opinión pública sobre las diferentes tecnologías discutidas en este documento. Estos sondeos deben realizarse a nivel nacional con especial énfasis en las regiones donde ya se han implantado proyectos energéticos.

Estos sondeos permitirán diseñar campañas de información y concientización en todos los niveles, que permitan un verdadero entendimiento de los beneficios y de las soluciones aplicables a las afectaciones potenciales, con el objeto de adecuar las regulaciones en la materia para evitar el rechazo de inversiones necesarias para el desarrollo del país y, a su vez, otorgar las garantías jurídicas y económicas a las inversiones, sin caer en una sobre regulación. Se deben establecer mecanismos claros que canalicen una parte de los beneficios de los proyectos a las poblaciones locales afectadas por los mismos. La población local debería ser socia e impulsora de los proyectos.

## **CONCLUSIONES**

El sector energético mexicano requiere mejorar su desempeño ambiental para estar a la par de los demás países del mundo y, con las tendencias actuales, se pone en riesgo la seguridad energética del país dado el elevado nivel de importaciones de gasolinas, diésel y gas natural.

Se plantea un escenario energético alternativo enfatizando el uso de energías renovables tanto en la industria como en la generación eléctrica y optimizando los sistemas de transporte, mostrando que se pueden lograr reducciones de 30% en las emisiones comparadas con la planeación actual y reducir las importaciones de gasolinas a menos del 10% y las de gas natural al 35% en lugar del 50%. Este escenario alternativo mantiene el consumo total de combustibles en los niveles actuales, con lo que el país sería esencialmente autosuficiente, aunque exportaría petróleo crudo e importaría diésel y gas natural.

El escenario alternativo fundamentalmente incluye un mayor impulso a las renovables y energías limpias en la generación eléctrica; el uso de energía solar en todo lo posible como fuente de calor para proceso en la industria, y un conjunto de medidas en el sector transporte que abarcan medidas técnicas y regulatorias, que permiten reducir el consumo de diésel y gasolinas, evitando la necesidad de importaciones.

Se plantea que el sector energético, si no se acompaña con políticas de desarrollo industrial puede

convertirse en una carga para el país, pero que con las políticas adecuadas puede ser un elemento de apoyo al desarrollo económico. Se enfatiza la necesidad de apoyos gubernamentales para compensar la falta de experiencia de las empresas mexicanas y el acceso a capital con costos competitivos.

Se analizan los aspectos sociales de los proyectos energéticos, particularmente los de energías renovables y se concluye que es necesario adoptar medidas para distender los conflictos. Se analizan los conflictos más comunes y se hacen sugerencias de atención.

## Referencias

1. WEC. Wyman, O. 2015 Energy Trilemma Index Benchmarking the sustainability of national energy systems. World Energy Council
2. WEC. Wyman O. 2015 "World Energy Trilemma. Priority actions on climate change and how to balance the trilemma". World Energy Council
3. "Prospectiva del Gas Natural y Gas LP 2015-2029". SENER
4. "Prospectiva del Petróleo y Petrolíferos 2015-2029". SENER
5. "Prospectiva de Electricidad 2015-2029". SENER
6. "Programa de Desarrollo del Sector Eléctrico (PRODESEN) 2016-2030". SENER
7. SEMARNAT. "Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero". Diario Oficial de la Federación. Septiembre 2015
8. Ley de Transición Energética
9. INDC- Intended Nationally Determined Contribution. Gobierno de México. Diciembre 2015
10. Islas, J.; Mancini, F.; et. al. "Hacia un Sistema Energético Mexicana Bajo en Carbono". Reflexio ediciones. Diciembre 2015
11. "Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029". SENER
12. González-Santaló, J.M. "CCS, A Needed Technology for the Mexican Electrical Sector: Sustainability and Local Industry Participation". Int. J. Chem. React. Eng. 2016
13. Hiriart Le Bert, G. "Las Energías Renovables y su penetración en el Portafolio Energético Nacional". Congreso del CICM. Marzo 2016
14. Ley General de Cambio Climático
15. Carabias Julia (2016), El medio ambiente en la constitución de la Ciudad de México, Configuraciones No. 41, México, Revista de la Fundación Pereyra y del Instituto de Estudios para la Transición Democrática.
16. PUED (2016), "Informe del Desarrollo en México 2015", Programa Universitario de Estudios del Desarrollo, UNAM, México, 2016.
17. CNH (2016), "Reservas 1p al 1° de enero de 2016", Grupo de trabajo de la Comisión Nacional de Hidrocarburos, México, marzo de 2016.
18. INEGI (2015), "Memorias de Labores y Grupo de Trabajo de Comercio Exterior", Banco de México, INEGI, SAT y SE, México, 2016.
19. SH&C. Solar Heat Worldwide, Markets and Contribution to the Energy Supply 2014. 2016 Edition).
20. Energía Primera edición, 2013. D. R. © Academia Mexicana de Ciencias, A. C. ISBN: 978-607-96209-5-0)
21. Price Water Coopers. "1ª. SUBASTA DE LARGO PLAZO. Reflexión sobre el proceso y resultados de cara a la próxima subasta". Abril 2016

## ANEXO. PROPUESTAS ESPECÍFICAS PARA CADA TIPO DE ENERGÍA

### Geotermia

México es el cuarto país del mundo en utilización de la geotermia y ha desarrollado equipos y personal capacitados en el tema. Considerando además que los recursos geotérmicos abundan en el país, esta es un área natural de desarrollo nacional.

### Capacidad tecnológica

Existe el Centro Mexicano de Investigación en energía en el área de Geotermia donde participan instituciones con amplia experiencia en el tema como son el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), el Centro de Investigación Científica y enseñanza de Ensenada (CICESE) y, en el ámbito de fabricación de equipos, están el CIATEQ y el CIDESI. Hay además empresas privadas y públicas como ENAL y la CFE que tienen experiencia en la exploración, evaluación y explotación de yacimientos geotérmicos.

### Apoyos requeridos

Lo esencial es establecer condiciones para que las empresas mexicanas puedan competir internacionalmente. Un factor importante es el acceso a financiamiento a tasas de interés bajas, comparables con las de los otros países.

Dado que las empresas mexicanas que podrían participar serían de menor tamaño que los competidores de otros países sería necesario un respaldo del Gobierno Federal como aval de las garantías exigidas por los clientes potenciales.

Si se quiere también incursionar en la fabricación de equipos como turbinas pequeñas de vapor, se requeriría que durante algunos años el Gobierno Federal otorgara incentivos a los usuarios de los equipos mexicanos para compensar diferencias de desempeño de los mismos, aunque estos incentivos deberían desaparecer una vez que las empresas hayan podido desarrollar sus productos y establecerse en el mercado.

### Energía solar fotovoltaica

La mayoría de los países Iberoamericanos se encuentran en el llamado “Cinturón Solar” de la Tierra, entre los paralelos 40° Norte y 35° Sur, entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio donde están los 60 países que reciben la mayor radiación solar del planeta, México ocupando el tercer lugar después de China y Singapur. Por lo tanto, la energía solar es un recurso abundante, limpio, renovable y casi infinito que en nuestro país lo recibimos con niveles de irradiación muy superiores a los que existen en países desarrollados, donde ya se está implantando dicha tecnología. En procesos de la energía solar fotovoltaica para generación de electricidad, los costos se han reducido de manera importante y como cuentan además con los beneficios de

los Certificados de Energía Limpia (CEL) compiten favorablemente en el mercado mundial.

### **Capacidad tecnológica.**

Existe el Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CEMIESOL) en el que participan instituciones que tienen experiencia en la innovación y desarrollo tecnológico para la utilización de la energía solar, incluyendo el Instituto de Energías Renovables de la UNAM (IER), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV), el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y otras.

En el CINVESTAV-Mérida, se han desarrollado prototipos de módulos solares fotovoltaicos de formato pequeño, que son competitivos en desempeño con los dispositivos disponibles en el mercado nacional. Además, considerando el alto nivel de radiación solar en el país (tercero del mundo) compensaría una eficiencia de la celda solar fotovoltaica menor que la necesaria en los países desarrollados. Por lo tanto, es posible desarrollar con tecnologías intermedias disponibles en la industria nacional, con uso intensivo de mano de obra con alto número de generación de empleos en la fabricación de paneles solares fotovoltaicos con eficiencias competitivas de bajo costo para aplicación en México y países Iberoamericanos, con desarrollos económicos y tecnológicos similares al nuestro.

En el INEEL se han desarrollado inversores para la conexión de los paneles solares a la red.

### **Apoyos requeridos.**

Hace falta que se creen empresas vinculadas a las instituciones con el conocimiento tecnológico y que el know-how se oriente a la fabricación de paneles solares fotovoltaicos y sus conexiones a la red; para lo que requerirá acceso a financiamientos importantes y mecanismos para privilegiar los paneles de fabricación nacional sobre los importados, para dar seguridad sobre el potencial del mercado nacional.

### **Energía solar térmica**

Al analizar el sector industrial, quedó claro que el uso de energía solar para suministrar calor de baja y media temperatura tiene gran importancia. Existen en México varias empresas que fabrican desde hace muchos años equipos para baja temperatura y pocas para media temperatura, también se tiene una importante importación de equipos chinos basados en tecnología de tubos evacuados, pero no han tenido la penetración que se esperaría. Aunque México ocupó el décimo lugar a nivel mundial en capacidad térmica instalada (308,000 m<sup>2</sup> en 2014), esto es la mitad de lo que instaló Brasil, y si se compara con un índice de energía térmica instalada por año, por cada 1,000 habitantes, México baja a un modesto lugar 33. [19]

### **Capacidad tecnológica**

El IER y el INEEL, además de otros grupos académicos, han desarrollado un buen número de prototipos de colectores planos y a concentración y, en algunos casos, han transferido los desarrollos a la industria.

Dentro de los proyectos fototérmicos del CEMIE solar se desarrollan nuevos colectores, recubrimientos selectivos, aplicaciones de enfriamiento, laboratorios de pruebas, almacenamiento, procesos termoquímicos de alta temperaturas, entre otros.

### **Apoyos requeridos**

Se requieren mecanismos para incentivar al usuario final para que use energía solar. La penetración de calentadores solares para uso residencial ha tenido poca penetración, a pesar de que representan ahorros importantes para el usuario. Una barrera parece ser la escasez de recursos para inversión, que podría remediarse con créditos y programas de financiamiento accesibles.

En el caso de media temperatura para aplicación en la industria, el problema parece ser el costo de los equipos, por lo que se sugiere establecer un mecanismo similar al de los CEL's para la electricidad, que incentive el uso de energía solar. Adicionalmente, el uso de energía solar para calor de media temperatura en la industria, requiere de la eficientización de los procesos y es necesario crear empresas con personal técnico que tengan las capacidades para el diseño e instalación de los colectores solares, para los sistemas de almacenamiento de energía y para hacer una integración óptima con los procesos industriales.

### **Energía eólica**

La energía eólica ha tenido un desarrollo importante en el país y se espera que continúe siendo una de las tecnologías de mayor impacto en el área de renovables, aunque todo el suministro de equipos ha venido del extranjero.

### **Capacidad tecnológica**

Existe el CEMIE Eólico que agrupa a centros de investigación y desarrollo como el INEEL, el CIATEQ y otros.

Se tiene un centro de prueba de equipos eólicos que forma parte del INEES, en el estado de Oaxaca y se tiene un proyecto en el CEMIE de desarrollo de una máquina eólica mexicana.

### **Apoyos requeridos**

Una barrera que dificulta que las empresas inviertan en infraestructura para la fabricación de equipos eólicos como sistemas es la imposibilidad de contar con un mercado razonablemente seguro. Se tiene que competir con grandes empresas extranjeras con experiencia y capital como pueden ser GE de los EE.UU y Acciona de España, que resultan atractivas para las empresas eléctricas de carácter conservador.

Se sugiere plantear convenios a largo plazo entre los generadores y los fabricantes de equipo, en el que se establezcan requerimientos de desempeño y precios, con el compromiso de que si estos

requerimientos son satisfechos se les dará trato preferencial como proveedores.

Adicionalmente es posible que se requiera que el Gobierno funja como aval de las garantías de empresas que no pueden demostrar la experiencia requerida por los clientes, de una manera similar a lo que los EE.UU. ha planteado para desarrollar su industria nuclear.

## Captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>

En el análisis presentado, esta tecnología se vuelve esencial, dada la alta participación del gas natural en la generación eléctrica.

Se trata de una tecnología de proceso dominada para varias empresas en México, fabricantes de equipo de generación de vapor y de columnas de absorción y destilación. La tecnología especial, que representa una pequeña parte del total del sistema, son los solventes usados para la absorción que pueden desarrollarse en el país o pueden adquirirse en el mercado mundial.

### **Capacidades tecnológicas.**

El INEEL ha venido desarrollando proyectos en el tema y está por decidirse una convocatoria para un CEMIE en CCS en cuya propuesta participaron los tres institutos del sector energía: el INEEL, el IMP y el ININ.

Hay empresas como CERREY que fabrican equipos de generación de vapor y que tienen la infraestructura industrial para fabricar los equipos requeridos en CCS.

### **Apoyos requeridos**

Los proyectos de CCS requieren de largos tiempos de maduración, del orden de tres a cuatro años, una vez que se tiene la tecnología y la infraestructura de fabricación.

Para que estas inversiones a largo plazo se den, es necesario que haya una planeación clara de las intenciones del Gobierno Mexicano para exigir la implantación de la tecnología y posiblemente el establecimiento de convenios a largo plazo, en los que las empresas se comprometen a hacer las inversiones y el Gobierno a dar los incentivos para que compitan favorablemente en el mercado.

# La NOM de eficiencia energética para calentadores de agua a gas y sus impactos energéticos, económicos y ambientales

Odón de Buen, Ybo Pulido y Juan Ignacio Navarrete B.

*Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía  
Enero de 2016*

## Resumen

El presente documento presenta una evaluación del impacto de la NOM-003-ENER, que establece los niveles mínimos de eficiencia térmica que deben cumplir los calentadores de agua a gas para uso doméstico y comercial que se encuentren en el mercado nacional. Para esto, se llevó a cabo un análisis comparativo entre la evolución del consumo de gas (LP y natural) y la de un escenario de crecimiento asociado al del crecimiento de la población en México desde la entrada en vigor de la NOM en 1996. En términos generales, se estima que la aplicación de la NOM-003-ENER ha evitado el consumo de 900 PJoules de gas desde la puesta en vigor de la NOM, lo que es igual a más de tres veces el consumo anual actual, con ahorros a la economía nacional de más de 320 mil millones de pesos de 1996 a 2014 y emisiones evitadas de 56.1 Ton de CO<sub>2</sub>eq, equivalentes a cerca de dos años de emisiones por quema directa de combustibles de los sectores residencial y comercial.

## La importancia del uso del gas para el calentamiento de agua

En el sector residencial de México, el gas es el combustible que más se consume en términos de su contenido energético, ya que representa el 42% del consumo de energía del sector (38% gas LP y 4% gas natural) [1]. Sin embargo, su peso en la economía de las familias es aún más importante ya que el gasto en gas representa el 63% del gasto total en energéticos [2]. A su vez, el uso del gas para

calentamiento de agua es su principal destino ya que se estima que el 54% del consumo de gas del sector residencial corresponde al calentamiento de agua [3]. Sin embargo, solo cerca de la mitad de los hogares cuenta con calentador de agua [4].

Por lo mismo, cualquier política pública orientada a mejorar la eficiencia energética en el uso del gas y en especial el que se usa para calentamiento de agua, es de gran importancia no solo en términos energéticos, sino también económicos, ambientales y sociales.

### La NOM-003-ENER-2011, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial. Límites, método de prueba y etiquetado

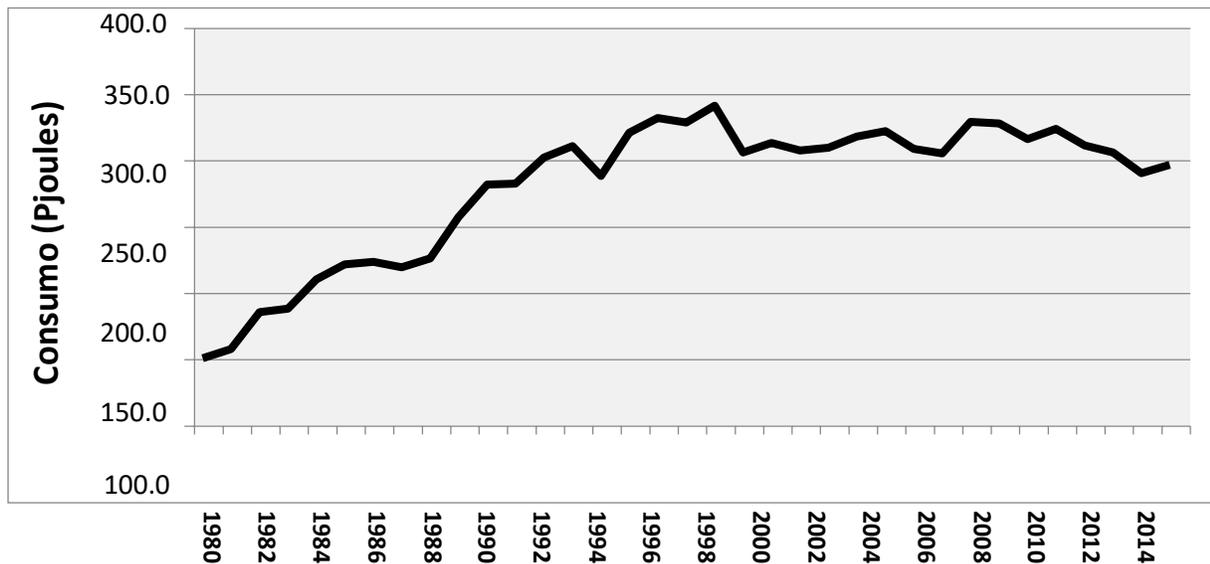
En México, a partir de la Ley Federal de Metrología y Normalización publicada en 1992 y a través primero de la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (Conae) y, a partir de 2009, de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee), se ha venido estableciendo un conjunto amplio de Normas Oficiales Mexicanas para la eficiencia energética con un robusto sistema de evaluación de la conformidad, que ha permitido tener impactos importantes en los consumos de electricidad y gas, particularmente en el sector residencial [5].

La NOM-003-ENER-2011, *Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial. Límites, método de prueba y etiquetado* es una norma cuya primera versión se publicó en 1995 [6] y ha sido actualizada dos veces (en el 2000 y el 2011) [7] [8]. Establece los niveles mínimos de eficiencia térmica que deben cumplir los calentadores de agua para uso doméstico y comercial que se encuentren en el mercado nacional. También especifica el método de prueba que debe aplicarse para verificar dicho cumplimiento. Esta NOM entró en vigor en junio de 1996 [6].

Por lo anterior, en el año de 2016 se cumplen 20 años de la entrada al mercado de los equipos de calentamiento de agua que cumplen con una NOM de eficiencia energética (incluyendo su etiqueta amarilla, que es obligatoria). Dado que se estima que la vida útil promedio de estos equipos es de 10 años, se puede afirmar que prácticamente todos los calentadores de gas en operación en México tienen certificados con la NOM-003-ENER, en sus versiones 1995, 2000 o 2011.

### Evolución del consumo de gas (LP y natural) en el sector residencial y del número de viviendas y población entre 1980 y 2014

Una revisión de la evolución del consumo de gas (LP y natural) en el sector residencial entre 1980 y 2014 hace evidente un drástico cambio de una tendencia de alto crecimiento hacia una a la baja, a partir de los años en los que entra en vigor la primera versión de la NOM-003-ENER (Fig. 1) [1].

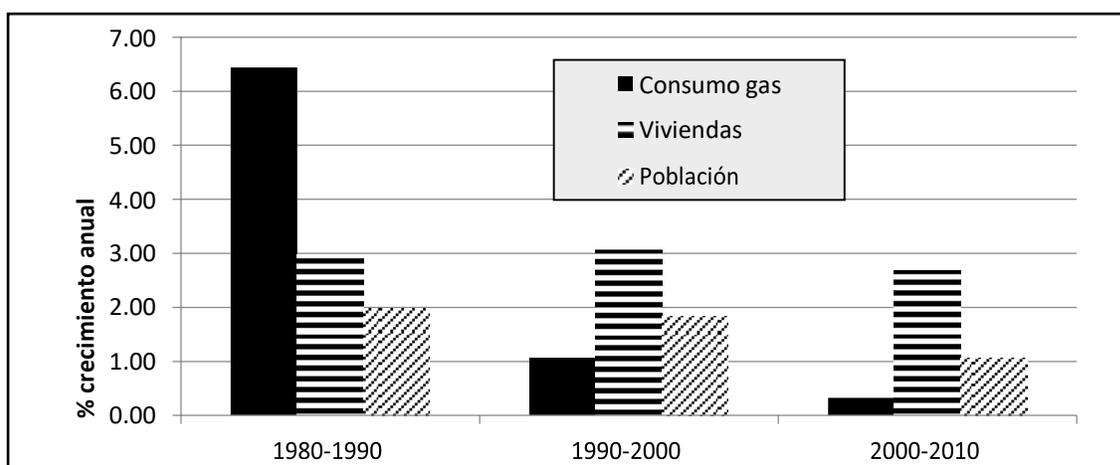


Fuente: Secretaría de Energía (SENER) [1].

*Figura 1. Evolución del consumo de gas (LP y natural) en el sector doméstico de México entre 1980 y 2014*

En particular, el consumo de gas se duplicó en quince años entre 1980 y 1995, y a partir de 1998, se detiene e inclusive decrece.

A su vez, una revisión de las tasas de crecimiento en tres décadas, de 1980 a 2010, del consumo de gas en el sector residencial, del número de habitantes y del número de viviendas en México hace igualmente evidente el cambio que se presenta a partir la aparición de la NOM-003-ENER en la segunda parte de los noventa (Fig. 2) [9].



Fuentes: Elaboración propia de los autores con datos de SENER e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

*Figura 2. Tasas de crecimiento de consumo de gas en sector residencial, número de viviendas y*

### *población en México (1980-1990, 1990-2000 y 2000-2010)*

Así, mientras en el lapso entre 1980 y 1990 la tasa de crecimiento del consumo de gas (6.4%) era más del doble que la del número de viviendas (3.0%) y del triple del de la población (2.0%), ya para el período 1990 a 2000 la situación cambia radicalmente, pues mientras las tasas de crecimiento de número de viviendas y población no varían mucho, la de consumo de gas se reduce a la sexta parte (poco más de 1%). Más aún, entre 2000 y 2010 la tasa de crecimiento del consumo es casi nulo y varias veces menor al de la vivienda y de la población.

A su vez, una comparación de las tasas de crecimiento de la población y del consumo de gas en períodos antes (1980 a 1996) y después de la entrada en vigor de la NOM (1997 a 2014) muestra un descenso de las tasas, siendo negativa para el consumo de gas para los años posteriores a la entrada en vigor de la NOM (Tabla 1).

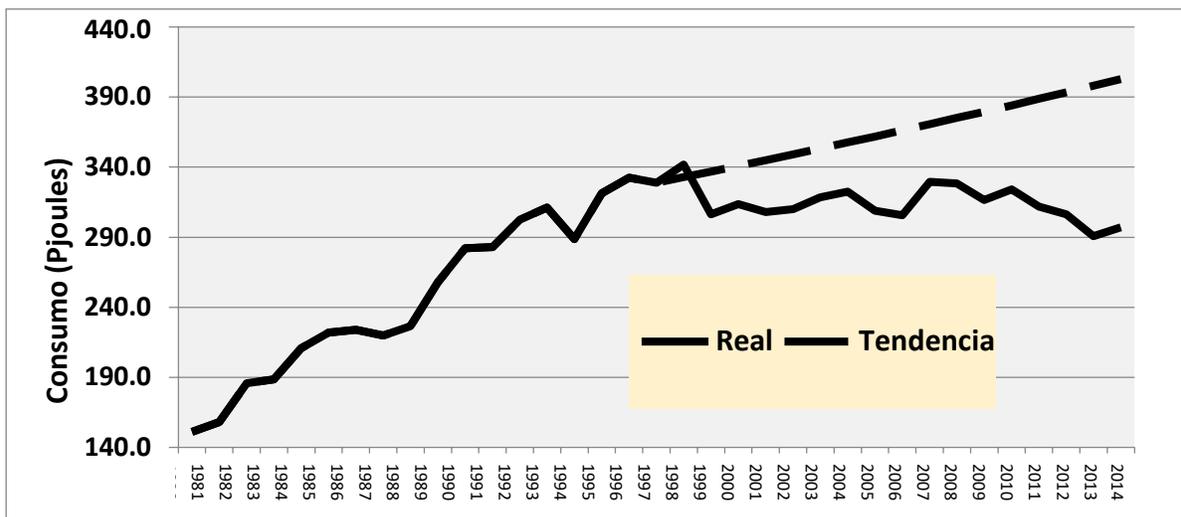
*Tabla 1. Tasas de crecimiento de consumo de gas en sector residencial y población de México (1980-1996 y 1997-2014)*

Concepto	1980-1996	1997-2014
Consumo gas en sector residencial	3.02	-0.60
Población	1.93	1.20

*Fuentes: Elaboración propia de los autores con datos de SENER e INEGI.*

### **El impacto energético, económico y ambiental de la NOM-003-ENER-2011**

Para establecer el impacto energético, económico y ambiental de la NOM-003-ENER se considera un escenario de referencia relacionando con el crecimiento de la población en México. De esta manera, se hace la consideración de que en el escenario de referencia (sin NOM-003-ENER) la tasa de crecimiento de la demanda de gas en el sector residencial sería igual al de la población entre 1997 y 2014 (1.2%), que es el período posterior a la entrada de la NOM (Fig. 2).



*Fuentes: Preparado por los autores en base a datos de la SENER y de INEGI.*

*Figura 3. Evolución real y estimada del consumo de gas en el sector doméstico de México entre 1990 y 2014*

Esto significa que, tan solo para el año 2014, **el consumo de gas LP fue 37% menor de lo que la tendencia de crecimiento de la población indicaría**, lo que representa un ahorro de 110 PJoules al año (2.1 millones de Ton de gas) y con un valor, a precio de octubre de 2015, de cerca de 30 mil millones de pesos y emisiones evitadas de 6.6 mil Toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (Tabla 2).

*Tabla 2. Estimados de ahorros de energía y dinero y emisiones evitadas por la NOM-003- ENER-2011*

<b>Concepto</b>	<b>1995-2014</b>	<b>2014</b>
<b>Energía ahorrada (PJoules)</b>	900	110.
<b>Cantidad de gas (millones de Ton gas LP eq)</b>	17.0	2.1
<b>Ahorro (\$ miles de millones)<sup>1</sup></b>	254.0	30.0
<b>Emisiones CO<sub>2</sub> (miles de Ton COeq)</b>	56.1	6.6

<sup>1</sup> A 14.1 \$/Kg LP

Fuentes: Preparado por los autores con base en datos de la SENER e INEGI.

A su vez, como valor acumulado en 18 años (de 1996 a 2014), el consumo evitado de gas desde la puesta en vigor de la NOM se estima en 900 PJoules, lo que representa más de tres veces el consumo anual actual. Esto también equivale a más de 17 mil millones de kilos de gas LP, que a precio al público en octubre de 2015 (14 \$/Kg) tiene un valor de 254 mil millones de pesos. En emisiones evitadas, esto representa 56.1 Ton de CO<sub>2eq</sub>, equivalentes a cerca de dos años de emisiones por quema directa de combustibles de los sectores residencial y comercial [10].

A su vez y considerando un subsidio promedio de 30% sobre el precio al usuario de gas LP [3] y que este se ha aplicado al 85% de los usuarios, se estima que se ha tenido un ahorro adicional, esta vez para las finanzas públicas, de 66 mil millones de pesos, lo que lleva a un total de ahorro para la economía nacional de más de 320 mil millones de pesos.

## Conclusiones

Una revisión de la evolución del consumo de gas (LP y natural) en el sector residencial entre 1980 y 2014 hace evidente un drástico cambio de una tendencia de alto crecimiento hacia una a la baja a partir de los años en los que entra en vigor la primera versión de la NOM-003-ENER.

Para estimar la cantidad de gas que se ahorra por la NOM se llevó a cabo un análisis comparativo entre la evolución del consumo de gas (LP y natural) en el sector residencial de México y la de un escenario de referencia (sin NOM-003-ENER) asociado al crecimiento de la población en el país entre 1996 y 2014. En términos generales, se estima que la aplicación de la NOM-003-ENER ha evitado el consumo de 900 PJoules de gas desde su puesta en vigor, lo que es igual a más de tres veces el consumo anual actual, con ahorros a la economía nacional de más de 320 mil millones de pesos y emisiones evitadas de 56.1 Ton de CO<sub>2eq</sub> de 1996 a 2014, equivalentes a cerca de dos años de emisiones por quema directa de combustibles de los sectores residencial y comercial.

## Referencias

1. SENER. *Sistema de Información Energética*. 2016 [cited 2016 Enero]; Available from: <http://sie.energia.gob.mx/>.
2. INEGI. *Encuesta Ingreso y Gasto de los Hogares 2008*. 2009 [cited 2011 15 de Marzo]; Available from: [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx).
3. GIZ, *Análisis de viabilidad y dimensionamiento del potencial de ahorro de un programa de sustitución de calentadores de agua* 2011, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH: México. p. 85.
4. INEGI. *Censo de Población y Vivienda 2010*. 2011 [cited 2011 15 de Marzo]; Available from: <http://www.censo2010.mx/>.
5. Conuee, *Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética. Balance al 2013*, 2015, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía: México DF. p. 63.
6. Conae. *NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ENER-1995, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial*. 1995 [cited 2016 Enero]; Available from: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4884401&fecha=07/11/1995](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4884401&fecha=07/11/1995).
7. Conae, *NOM-003-ENER-2000 Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial. Límites, método de prueba y etiquetado.*, Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, Editor 2000. p. 17.
8. Conuee. *NORMA Oficial Mexicana NOM-003-ENER-2011, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial. Límites, método de prueba y etiquetado*. 2011 [cited 2016 Enero]; Available from: <http://www.conuee.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/6933/19/NOM003ENER2011.pdf>.
9. INEGI. *Viviendas habitadas por tipo y clase de vivienda, 1990 a 2010*. 2016 [cited 2016 Enero]; Available from: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/sisept/default.aspx?t=mviv27&s=est&c=26529>.
10. INECC. *Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero. Actualización 2013*. [cited 2016 Enero]; Available from: [http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015\\_inv\\_nal\\_emis\\_gei\\_result.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/2015_inv_nal_emis_gei_result.pdf).

# Biorrefinerías

Dra. Margarita M. González Brambila

*Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco*

*Departamento de Energía*

*Email: mmgb@correo.azc.uam.mx*

A pesar de que la civilización humana estuvo basada casi exclusivamente en el uso de productos provenientes de fuentes renovables de energía durante siglos, ello cambió a partir del siglo XIX y actualmente la mayor parte de la energía y los materiales que utilizamos están basados en el petróleo; se considera que el 90 % de los compuestos químicos orgánicos que utilizamos actualmente se obtienen del petróleo.

El siglo XXI es un período de la historia de la humanidad en el que los recursos naturales se han explotado al límite, las emisiones de gases de efecto invernadero han llegado a límites peligrosos, el calentamiento global y la contaminación en general son problemas que requieren una solución urgente y la población mundial continua aumentando, la cual se espera que alcance los 9,000 millones de habitantes en el año 2050. Todo ello ha ocasionado que algunas personas opinen que estamos en un camino que nos lleva irremediabilmente hacia la catástrofe. Sin embargo existen otros puntos de vista que apuntan hacia que el *luchar a contracorriente es parte de la naturaleza humana*; sin embargo ganar esta batalla implica que logremos crear una relación sustentable con nuestro planeta.

El alcanzar esta relación sustentable, con el incremento poblacional actual, nos lleva a pensar en dos alternativas: 1) reducir el uso de recursos por habitante y 2) reemplazar las materias primas que se utilizan actualmente. La primera de estas alternativas incluye "*el volver a lo natural*", lo cual implica reducir la producción mundial en general, contraer la economía, volver a tener esperanzas de vida promedio menores a las alcanzadas actualmente (Ver Tabla 1) y olvidarnos de los estándares de vida y confort a los cuales nos hemos ido acostumbrando tales como realizar un viaje México-Londres por avión en 10 horas 40 minutos o realizar un viaje de México a Acapulco en caballo en probablemente 2 o 3 días.

*Tabla 1. Esperanza de vida a lo largo de la historia y por Continente*

<b>Fecha</b>	<b>Esperanza de vida</b>
<b>Edad Media</b>	30 años
<b>Inicio del siglo XIX</b>	30 – 40 años
<b>Inicio del siglo XX</b>	50 – 65 años
<b>2010 Europa</b>	78.4 años
<b>América del Norte</b>	77.6 años
<b>Oceanía</b>	74.0 años
<b>América Latina</b>	71.5 años
<b>Asia</b>	61.3 años
<b>África</b>	49.2 años
<b>2014 México</b>	76.7 años

La segunda alternativa consistente en reemplazar las materias primas, principalmente el petróleo, por otras con características más sustentables para obtener la energía, los compuestos químicos y los materiales de construcción que requerimos, de una manera que impacte menos al medio ambiente. Por ello se trabaja intensamente en desarrollar procesos para obtener energía de fuentes renovables, tales como la energía hidráulica, la energía solar fotovoltaica, la energía solar térmica, la energía geotérmica, la energía eólica, la energía maremotriz y la bioenergía. Es importante considerar que una sola de estas fuentes alternas de energía no resolverá definitivamente el problema. Por ejemplo, los vehículos eléctricos ofrecen una alternativa prometedora para aminorar la contaminación en las ciudades, sin embargo si todos los vehículos de combustión interna se cambiaran por vehículos eléctricos y tomando en consideración que en promedio los requerimientos energéticos de cada vehículo son de 30 kW, se requeriría una potencia total de 18,000 millones de kW y actualmente en el mundo la capacidad instalada es de 4,000 millones; por otra parte mientras la potencia eléctrica se obtenga a partir de derivados del petróleo, no se tiene una solución real al problema de la contaminación.

La Tierra nos proporciona una amplia variedad de recursos naturales en forma de biomasa que podemos utilizar para satisfacer nuestros requerimientos básicos de materiales de construcción, productos químicos, recursos energéticos y recursos alimentarios, y es en este contexto en el que comienza a hablarse de obtener energía a partir de desechos orgánicos de plantas y animales, es decir, utilizar la biomasa. Se entiende por biomasa todos los materiales orgánicos que en algún momento se obtuvieron natural o artificialmente por medio del proceso de fotosíntesis, en un período de tiempo no mayor a 500 años; esto incluye productos agrícolas y silvestres, productos de desechos animales, etc.

De manera general la energía se consume en tres sectores: industrial, residencial y transporte. Este último representa aproximadamente el 30 % de la energía total consumida, lo cual implica un consumo de 8.3 millones de barriles de crudo diariamente. Substituir esta cantidad de crudo no es

una tarea menor y como se mencionó anteriormente se trabaja en el desarrollo e implementación de vehículos eléctricos, y de vehículos impulsados por hidrógeno, sin embargo ambas tecnologías implican un cambio importante o una sustitución completa de los motores actuales. A este respecto los biocombustibles ofrecen una alternativa más fácil de implementar a corto plazo porque el biodiésel, el bioetanol y el biogás pueden utilizarse mezclándose en proporciones importantes con el diésel, la gasolina y el gas obtenidos del petróleo, sin hacer cambios importantes en los motores.

A partir del petróleo se obtienen, además de los combustibles, una gran diversidad de compuestos químicos como: lubricantes, ceras, parafinas, plásticos, pinturas, barnices, disolventes, fertilizantes, insecticidas, detergentes, caucho artificial, poliéster, fibras sintéticas, detergentes, tiner, cloruro de vinilo (base para fabricar manteles, cortinas para baño, muebles, alambres y cables eléctricos, techos, botellas, etc.), polietileno (para fabricar plásticos), negro de humo (para la producción de neumáticos), azufre (para obtener ácido sulfúrico), brea, asfalto y gran cantidad de productos petroquímicos que se utilizan para producir una diversidad de productos de uso común.

Con el propósito de sustituir el uso del petróleo no únicamente para satisfacer los requerimientos energéticos, sino también en la obtención de la gran diversidad de productos químicos es que aparece la idea de las biorrefinerías. Las biorrefinerías, de manera similar a las refinerías de petróleo, son instalaciones que integran procesos y equipos para producir combustibles, electricidad y productos químicos de alto valor agregado a partir de biomasa.

El objetivo general de las biorrefinerías es aislar todos los productos con valor agregado contenidos en la biomasa que utiliza como materia prima, hasta disminuir al mínimo los residuos o preferentemente no producirlos. Además busca que los procesos sean sustentables por lo cual utiliza principalmente procesos biotecnológicos, aunque si es necesario, también se incluyen procesos físicos y químicos. Se considera que los procesos biotecnológicos son más sustentables debido a que los compuestos, las presiones y las temperaturas de operación son, en la mayoría de los casos, mucho menos severos y contaminantes que los que requieren los procesos químicos y físicos.

Una biorrefinería también puede definirse como una instalación que produce alimentos, materiales de construcción, productos químicos, electricidad y calor a partir de biomasa. Las biorrefinerías pueden ser altamente competitivas si logran utilizar la mayor parte de los componentes de un tipo de biomasa para maximizar el valor de ésta. Así mismo, las biorrefinerías pueden llegar a convertirse en un futuro cercano en una parte importante de la economía mundial, debido a que utilizan tecnología para convertir las diferentes fuentes de biomasa disponible en productos con alto valor agregado.

El concepto de biorrefinería en sí, representa una gran variedad de retos y oportunidades para los investigadores y tecnólogos, ya que tiene entre sus objetivos el de que las materias primas, los procesos, los productos, los servicios auxiliares e inclusive los desechos sean sustentables. Para que un proceso o producto se considere sustentable debe cumplir básicamente con tres requisitos: ser amigable con el medio ambiente, ser socialmente aceptable y ser económicamente viable. Ser amigable con el medio implica tener un balance positivo en cuanto a su huella de carbono, la cual debe evaluarse desde la perspectiva de análisis de ciclo de vida, donde se analiza su impacto desde la generación de las materias primas para producirlo, pasando por los procesos productivos y de comercialización, el impacto ambiental durante su vida útil, el reciclaje de sus partes y los desechos que genera cuando ya no es útil.

En cuanto a las materias primas que se emplean en una biorrefinería, se espera que éstas provengan en su mayor parte de productos agroindustriales de desecho, para evitar la competencia entre los

alimentos y los biocombustibles, por el espacio, el agua, la mano de obra y los fertilizantes. A este respecto existe a nivel mundial un extenso debate, algunas personas opinan que no es ético satisfacer las necesidades de combustibles para una parte de la sociedad mientras no se logre solventar los requerimientos alimenticios de toda la humanidad. Utilizar tierras de cultivo para la obtención de cosechas destinadas a producir biocombustibles resta espacio, recursos hídricos, fertilizantes, mano de obra e infraestructura a la industria alimentaria, elevando el costo de los alimentos.

Por otra parte algunos especialistas opinan que la utilización de tierras agrícolas para la producción de biocombustibles ayudaría al desarrollo económico de las zonas rurales. Esta idea surge debido a que el producir biocombustibles aumentaría el valor de los cultivos tanto de productos alimenticios como de cultivos destinados a la producción de combustibles, por una parte, y por la otra, los biocombustibles podrían fabricarse en las zonas rurales, al menos para satisfacer los requerimientos de la región, ahorrando a los productores locales los gastos en la compra de éstos. Sin embargo, el uso de biocombustibles alrededor del mundo al igual que el debate entre las personas a favor y en contra, se intensifican cada vez más.

Los biocombustibles son una alternativa muy interesante a los combustibles fósiles ya que son renovables, no contribuyen a aumentar el carbono en la atmósfera, su disponibilidad no depende de la ubicación geográfica, contribuyen al desarrollo sustentable y a la preservación del medio ambiente. Además de que son, entre todas las fuentes alternas de energía, la única que permite sustituir al petróleo en la obtención de los productos químicos que requiere la industria. Se espera que los biocombustibles cubran una parte importante de la demanda energética en el mundo a mediados del siglo XXI. Sin embargo, el principal reto para el futuro es desarrollar biocombustibles que no compitan con la cadena alimenticia, que sean sustentables y eficientes en términos económicos y energéticos, y que dentro de la huella de carbono tengan un balance positivo.

Los biocombustibles que se producen actualmente son biodiésel, bioetanol, biogás, biotursina y biohidrógeno. El biodiésel se obtiene por la reacción de transesterificación de lípidos que pueden provenir de aceites vegetales, aceites vegetales residuales de la preparación de alimentos, grasas animales de desecho o aceites de microalgas. El bioetanol se obtiene por medio de la fermentación anaerobia de azúcares y actualmente se trabaja en el desarrollo de procesos para obtenerlos a partir de desechos agrícolas como las pajas de maíz y trigo, o el bagazo de caña que son residuos producidos en grandes cantidades. El biogás se obtiene por medio de la fermentación de residuos orgánicos urbanos o agrícolas; actualmente se comienzan a experimentar tecnologías para obtener turbosina a partir del aceite de micro algas. Otro tipo de investigaciones que se desarrollan actualmente incluyen la optimización de los procesos de gasificación de biomasa para la obtención de gas de síntesis ( $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ), el cual puede emplearse para producir metanol o alcanos líquidos utilizando procesos bien establecidos.

Los materiales lignocelulósicos son los materiales más abundantes en la naturaleza, entre ellos se encuentran los residuos de maderas duras y suaves (residuos de la industria maderera), residuos vegetales de las industrias agroindustriales, papel de desecho y residuos municipales. La cantidad de estos desechos a nivel mundial representa una fuente enorme para la producción tanto de biocombustibles como para la obtención de otros productos con mayor valor agregado que pueden obtenerse a partir de azúcares simples por medios biotecnológicos. Un ejemplo lo representa la avena, por cada kg de avena producida se desechan 1.1 kg de paja y de acuerdo con la FAO, en 2007 se produjeron 680 millones de toneladas de avena en el mundo. Sin embargo, los materiales lignocelulósicos son muy difíciles de descomponer en los compuestos que los forman: lignina, celulosa y hemicelulosa. Para lograrlo se proponen dos tipos distintos de procesos, los biotecnológicos y los

termoquímicos, aunque aún no se tiene una tecnología ganadora, la combinación de ambas tecnologías parece ser una opción más viable hasta el momento; la biomasa puede someterse primero a condiciones severas de pH, temperatura o extracción con solventes, para luego utilizar cocteles enzimáticos para obtener los productos deseados.

La utilización de enzimas libres o inmovilizadas como catalizadores de las reacciones en los procesos, son una tecnología muy prometedora, ya que son procesos que requieren condiciones de operación muy suaves y por tanto poco costosas para las reacciones; sin embargo los procesos de obtención de las enzimas, la inmovilización de las mismas y la conservación de la actividad enzimática por largos períodos de tiempo son temas que aún requieren investigación.

Por otra parte, los sistemas de separación juegan un papel preponderante tanto en el desarrollo de los procesos como en la economía de las biorrefinerías, ya que representan entre el 60 y el 80 % de los costos de producción. Encontrar las tecnologías óptimas de separación ayudará de manera muy importante a mejorar los costos de producción y la viabilidad y sustentabilidad de los procesos. Algunos ejemplos de procesos de separación y purificación importantes dentro de las biorrefinerías son la pre-extracción de fitoquímicos a partir de materiales lignocelulósicos; la separación de los principales componentes de la biomasa: lignina, hemicelulosa, celulosa y extractivos; la extracción y purificación de celulosa antes del pulpeo para fabricar papel; la separación de compuestos químicos valiosos a partir de la biomasa hidrolizable; la remoción de compuestos que inhiben la fermentación para mejorar la conversión y el rendimiento; la concentración de las corrientes de proceso para alcanzar las especificaciones de los productos deseados; la integración de las tecnologías de separación y purificación con los bioprocesos; la limpieza del gas de síntesis; la purificación y concentración de las materias primas y reactivos, ya que de origen contienen grandes cantidades de agua; la purificación de la glicerina obtenida en la producción de biodiésel para la producción de ácido succínico, ácido acrílico, etc., y la separación y purificación de productos como etanol, butanol y ácido láctico, entre muchos otros.

Actualmente, el mayor impedimento para el uso de la biomasa es el desarrollo de procesos económicamente viables, ya sean físicos, químicos, termoquímicos o bioquímicos, para transformarla en energía, compuestos químicos y materiales de construcción. Este es un reto difícil de superar porque estos procesos deben competir con procesos que han sido mejorados durante más de un siglo, por lo cual tienen actualmente un alto grado de tecnificación y de optimización en cuanto a costos.

La economía basada en biorrefinerías es una visión a futuro que pretende coadyuvar en el reemplazo de los combustibles fósiles por renovables, sin embargo ello requiere de inversiones importantes en la infraestructura necesaria para producir, almacenar y entregar los productos obtenidos en las biorrefinería a los consumidores finales. Esto genera disyuntivas acerca de si es mejor construir grandes biorrefinerías donde se concentren las materias primas que serán procesadas, con los consecuentes gastos en transporte de productos, o si es una mejor opción construir pequeños centros de transformación cerca de los lugares donde se producen las materias primas.

Otro factor económico que debe tomarse en cuenta es que los costos de los productos pueden variar de acuerdo a la disponibilidad de las materias primas, la cual puede ser estacional o depender de factores climáticos, a menos que los procesos desarrollados tengan la flexibilidad suficiente para procesar distintos insumos.

Existen muchos retos técnicos y no técnicos para lograr que las biorrefinerías sustituyan a las refinerías convencionales, algunos de ellos, relacionados con la producción de biocombustibles, están asociados

con los costos de producción, con las dificultades para cosechar y con el almacenamiento tanto de insumos como de productos, debido a que ambos son biodegradables en períodos cortos de tiempo. Para hacer frente a estos retos se requiere de investigadores en energía, ingenieros químicos, biotecnólogos, especialistas en fuentes de energía, agricultores y recolectores, entre muchos otros, dispuestos a trabajar en el desarrollo de las tecnologías necesarias.

Dentro de la naturaleza de los ingenieros, los científicos y los investigadores se encuentra la necesidad de desarrollar ideas innovadoras y de probarlas en sus laboratorios, así *como* verlas cristalizadas en proyectos y procesos de gran alcance. Sin embargo es indispensable realizar estudios de factibilidad económica y análisis de ciclo de vida exhaustivos antes de pensar en comercializar dichos procesos.

El reto para las generaciones actuales y futuras de ingenieros, científicos, investigadores, tecnólogos e innovadores es: Desarrollar metodologías más sustentables para crear prosperidad y combatir la pobreza y el hambre en el mundo.

## Referencias

1. Abbas Kazmi. Advanced Oil Crop Biorefineries. 2012. RSC Publishing.
2. Ayhan Demirbas. Biorefineries for biomass upgrading facilities. 2010. Springer.
3. James Clark, Fabien Deswarte. Introduction to chemicals from biomass. 2008. Willey.
4. Rafael Luque, Juan Campelo, James Clark. Handbook of biofuels production. 2011. Woodhead Publishing Limited.
5. Shri Ramaswamy, Hua-Jiang Huang, Bandarie V. Ramarao. Separation and Purification Technologies in Biorefineries. 2013. Willey.
6. Tomás-Pejó, E., Oliva, J. M., Ballesteros, M. 2008. Realistic approach for full-scale bioethanol production from lignocellulose: a review. Journal of Scientific & Industrial Research. Vol. 67. Pp. 874-884.
7. World Energy Council. Biofuels: Policies, Standards and Technologies. 2010.
8. <http://www.datosmacro.com/demografia/esperanza-vida/mexico>
9. <http://datos.bancomundial.org/indicador/SP.DYN.LE00.IN>
10. [https://es.wikipedia.org/wiki/Derivado\\_del\\_petr%C3%B3leo](https://es.wikipedia.org/wiki/Derivado_del_petr%C3%B3leo)

# **RESEÑA DE LA NORMA MEXICANA NMX-AA-164-SCFI- 2013 EDIFICACIÓN SUSTENTABLE - CRITERIOS Y REQUERIMIENTOS AMBIENTALES MÍNIMOS**

Dr. Homero Jiménez Rabiela

*Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco*

*Departamento de Energía*

*Email: hjr@correo.azc.uam.mx*

La norma fue publicada en México D.F., el 4 de septiembre de 2013, en el Diario Oficial de la Federación (DOF), por la Secretaría de Economía y firmada por el DIRECTOR GENERAL DE NORMAS LIC. ALBERTO ULISES ESTEBAN MARINA y consta de 158 páginas. En su elaboración participaron dependencias, organizaciones y empresas, 26 en total.

## **RESUMEN**

La Norma Oficial Mexicana NMX-AA-164-SCFI-2013, sobre la edificación sustentable - criterios y requerimientos ambientales mínimos, incluye las siguientes secciones: introducción, objetivo, campo de aplicación, referencias, definiciones, requisitos, procedimiento de la evaluación de la conformidad, vigencia, bibliografía, concordancia con normas internacionales y 13 interesantes apéndices informativos. Éstos últimos relacionados con usuarios, vegetación, movilidad, energía, agua, elementos prohibidos y con los campos térmico, acústico y visual.

La Norma aborda los temas desde diferentes puntos de vista: técnico, económico, social, ambiental, local, civil, mercantil, administrativo, salud, temporal, público y privado. Incluye aspectos relacionados con energías renovables, huella de carbono y ciclo de vida.

Su objetivo está implícito en el título de la norma. Es voluntaria para todas las edificaciones dentro del

territorio nacional, públicas o privadas, destinadas a diferentes actividades de índole habitacional, comercial, de servicios o industrial. Se aplica al diseño, operación, mantenimiento, renovación y demolición.

Para su correcta aplicación, se hace referencia a diversas normas de las Secretarías de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), de Energía, de Salud, del Trabajo y Previsión Social y de Economía. Considera las definiciones contenidas en diversas Leyes: General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, de Aguas Residuales, General de Asentamientos Humanos, General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía, General de Cambio Climático, General de Desarrollo Forestal Sustentable, así como sus respectivos Reglamentos. Adicionalmente define absorción acústica, agua de lluvia, aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales, análisis de ciclo de vida, área libre, áreas interurbanas, áreas periurbanas, área verde, azotea verde naturada, calidad de ambiente interior, ciclo de vida, ciclo de vida de una edificación, confort, decibel acústico, diseño modular, edificación, edificación sustentable, edificio, eficiencia energética, energías renovables, envolvente, escurrimientos pluviales, especies vegetales nativas, evaluación de la conformidad, evapotranspiración, factores ergonómicos, flujos naturales, función testimonial del paisaje, habitabilidad, impacto visual, índice de reflexión solar, inmueble, instalaciones exteriores, mantenimiento predictivo, naturación, pacificación del tránsito, paisaje, parámetros visuales, planta baja activa con dinámica las 24 horas del día, predio, presupuesto energético, proceso de diseño integrado, producto o material de construcción, programa de movilidad eficiente, reciclable, reciclado, recurso renovable, redensificación, regeneración urbana, remediación, remodelación renovación o reacondicionamiento del edificio, reutilización, reverberación, sistema de riego eficiente, sistema producto, verificación, vida útil del edificio, vigilancia, visibilidad del paisaje, zona de amortiguamiento y zona núcleo.

Establece requisitos para que las personas físicas o morales puedan ser consideradas sustentables. Como requisitos generales incluye: Cumplir con las normas enunciadas en el apartado de referencias. Generar información estadística. Ofrecer información y orientación para los usuarios. Establece requisitos particulares relacionados con: el agua, los materiales y residuos, la calidad ambiental y responsabilidad social, el suelo y la energía.

El interesado tendrá la opción de contratar una unidad de verificación, en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización y su Reglamento, para verificar el grado de cumplimiento con la Norma. Los aspectos a verificar durante el proceso de evaluación, se realizará según aplique, mediante revisión documental, entrevistas, constatación física, para lo que será necesario:

- Planos, fotografías, documentos técnicos y memorias de cálculo.
- Información que permita constatar el grado de cumplimiento.
- Cumplir requisitos obligatorios.
- Remisión, por la Unidad de verificación y la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), del dictamen a la SEMARNAT.

La presente norma entró en vigor 60 días naturales después de la publicación de su declaratoria de vigencia en el DOF.

En la Bibliografía se incluyen Leyes y normas de las Secretaría involucradas, estudios del Centro Mario Molina, así como documentos relativos de organizaciones y empresas.

Esta norma no coincide con la norma internacional ISO 15392:2008 debido a que es de carácter general

y no establece criterios y requerimientos específicos para el contexto mexicano.

## VALORACIÓN

La Norma, en tanto que fue redactada por dependencias, organizaciones y empresas es incluyente así como multidisciplinar. Resulta, junto con sus referencias, bibliografía y apéndices informativos un sistema integral aplicable a cualquier edificación. De sus apéndices informativos el de elementos prohibidos resulta de especial interés para el público; al describir, para cada uno de ellos, sus efectos sobre la salud, efectos sobre el medio ambiente, regulación, protección y prevención. La aplicación de la norma, actualmente voluntaria, tiene ventajas si se hace un análisis costo – beneficio a largo plazo; sobre todo si se tiene en cuenta los efectos sobre la salud de los campos mecánicos, térmicos y acústicos. El ahorro de energía está presente en toda la norma al considerar usuarios, movilidad, agua, así como los campos antes mencionados. Es, ésta, una de las normas de lectura, análisis, síntesis y evaluación obligada para los peritos responsables de obra.

# INGENIERÍA DE PROCESOS ENERGÉTICOS

Dr. Héctor F. Puebla Núñez

*Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco*

*Departamento de Energía*

*Email: hpuebla@correo.azc.uam.mx*

La ingeniería de procesos, cuyos métodos y conceptos generalizan los de la ingeniería química, se encarga del desarrollo, evaluación, diseño, optimización y control de procesos químicos y biotecnológicos productivos. A diferencia del enfoque tradicional de la Ingeniería Química, que se basa en conocimientos fundamentales de química, termodinámica y fenómenos de transporte, la ingeniería de procesos se apoya fuertemente en el uso de herramientas matemáticas y computacionales para el análisis sistemático de los procesos industriales.

## Modelado y Simulación de Procesos

La formulación de modelos y la simulación numérica correspondiente de un proceso representan una alternativa muy conveniente para estudiar el proceso y realizar inferencias sin recurrir físicamente al proceso. Esta opción resulta más favorable, por ser mucho más económico realizar una simulación y proponer distintas configuraciones del proceso para evaluar la respuesta del sistema, que hacerlo con los equipos físicos. Esto último representaría un costo muy elevado sin ninguna clase de remuneración a corto plazo. Además otra de las ventajas es que facilita la optimización del proceso y proponer e implementar esquemas de control.

La formulación de modelos en procesos químicos y biotecnológicos se basa en la aplicación de los principios de conservación, los cuales varían en complejidad y detalle dependiendo del proceso a modelar y los fenómenos más relevantes subyacentes. Los modelos matemáticos contienen además parámetros que tienen cierto grado de incertidumbre, los cuales comúnmente se deben de estimar con métodos de estimación adecuados en conjunto con datos experimentales. La incertidumbre del proceso se puede estudiar además incluyendo elementos estocásticos en el modelo.

El modelo resultante se puede estudiar a través de análisis matemático o simulación numérica. Para el análisis matemático existe una amplia gama de técnicas y herramientas, tales como métodos de energía, funciones de Lyapunov, linealización de procesos, transformada de Laplace, etc. Para la simulación numérica existen también diversas posibilidades, dependiendo de las características del modelo a resolver numéricamente. Los modelos de mayor complejidad se representan por sistemas de ecuaciones diferenciales parciales no lineales en más de una dimensión. Métodos numéricos como diferencias finitas, colocación ortogonal y elemento finito se pueden utilizar para resolver numéricamente este tipo de ecuaciones.

El modelado y simulación de procesos químicos y biotecnológicos se ha abordado también a través de simuladores comerciales de procesos, tales como ASPEN y Chemcad, o la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés), tales como COMSOL y ANSYS Fluent. Los simuladores comerciales de proceso permiten predecir el comportamiento de un proceso mediante relaciones básicas de ingeniería, tales como balances de masa y energía, equilibrio químico y fases, y cinéticas de reacción. Teniendo datos fiables termodinámicos, condiciones reales de funcionamiento, y los modelos rigurosos de equipos, se puede simular el comportamiento real de la planta. Así, esta herramienta puede ayudar a diseñar mejores plantas y aumentar la rentabilidad de las plantas existentes. CFD es una herramienta que puede ayudar a predecir el comportamiento de los patrones de flujo que ocurren en un proceso. La CFD utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes, modelos de turbulencia; así como métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo en unidades de procesos en cualquier geometría. Las bases de la CFD es la descripción de los regímenes de flujo en un proceso, en particular, el régimen de flujo turbulento, el cual presenta retos interesantes para su estudio debido a la complejidad de su descripción matemática y su fenomenología. Una ventaja de CFD respecto a las herramientas experimentales más modernas para la visualización de variables fluido-dinámicas, como el velocímetro de Imagen de Partículas y el velocímetro por Láser Doppler, radica en que con CFD es posible determinar parámetros hidrodinámicos del fluido que influyen en la eficiencia del proceso en regiones de interés imposibles de medir experimentalmente, e.g. en la zona de barrido del agitador. Esto ha permitido evaluar el desempeño de diferentes equipos comerciales y mejorar los patrones de flujo, los cuales permiten maximizar el rendimiento global del proceso.

## Síntesis y Diseño de Procesos

El objetivo principal de la síntesis de procesos es descubrir el mejor diagrama de flujo de procesos para alcanzar una meta de proceso. La síntesis de procesos de industrias químicas y bioquímicas determina la interconexión óptima entre las unidades del proceso como también el tipo de diseño de las operaciones unitarias dentro del sistema para alcanzar los objetivos de producción específicos. La interconexión de unidades de proceso se denomina la estructura de un proceso. Cuando el desempeño de un proceso se especifica, la estructura del mismo y el desempeño de las unidades de procesamiento no se definen en forma única. El objetivo es seleccionar una conexión particular de un gran número de alternativas las cuales alcancen el desempeño especificado.

La síntesis de procesos ha sido llevada a cabo tradicionalmente de manera manual e intuitiva, una vez que se proponen diferentes esquemas de diagramas de flujo, los ingenieros se centran en elegir el esquema de la planta económicamente óptimo desde el punto de vista de ingeniería civil, pero sin

tener en cuenta la secuencia e interconexión óptima entre las unidades que lo componen, y sin considerar las características de controlabilidad en lazo abierto o en lazo cerrado que tendría la planta una vez diseñada. Grossmann y colaboradores formularon el problema convencional de síntesis y diseño de procesos por medio de programación matemática al considerar todas las posibles interconexiones por medio de superestructuras.

En procesos químicos industriales, la síntesis de procesos se ha aplicado en prácticamente todos las unidades de proceso principales: columnas de separación, reactores, intercambiadores, redes de intercambio de masa y energía, etc. En cambio, los bioprocesos se han beneficiado solo recientemente de los desarrollos teóricos existentes para la síntesis de procesos. En la literatura científica han aparecido numerosas publicaciones que describen aplicaciones tales como procesos de tratamiento de aguas residuales, metalúrgicos, de producción de polímeros, de producción de farmacéuticos, y nano-materiales.

El diseño de procesos está enfocado a la determinación de las condiciones de operación de cada una de las unidades del proceso y los dimensionamientos que se requieren para la producción de dicho material o producto específicos. El problema de diseño de procesos para procesos químicos y biotecnológicos con un enfoque de la ingeniería de procesos, se puede abordar de tres formas: (i) El diseño de procesos completos siguiendo el enfoque de la síntesis de procesos, es decir, con un enfoque modular secuencial integrado. (ii) El diseño de equipos nuevos o mejora de equipos existentes a través de herramientas de la dinámica de fluidos computacionales, por ejemplo COMSOL y ANSYS. (iii) El diseño y dimensionamiento de equipos utilizando simuladores comerciales de procesos, tales como el CHEMCAD y el ASPEN PLUS y ASPEN HYSYS, que se basan, por ejemplo en métodos cortos de diseño.

## Optimización y Control de Procesos

Desde el punto de vista de proceso, determinar las mejores condiciones de operación y asegurar el cumplimiento de estas condiciones corresponden a la optimización y el control del proceso. Esta es la principal razón para investigar sobre nuevas alternativas o implementar técnicas de control y optimización e incluso mejorar las opciones ya existentes para satisfacer los requerimientos del mercado sin acrecentar las repercusiones ambientales. Para procesos nuevos, la determinación de las mejores condiciones de operación es una tarea de la optimización de procesos. Para procesos existentes, en muchas ocasiones la producción actual del proceso se desvía de las condiciones de diseño, y se tienen que determinar nuevas condiciones de operación para operar en forma óptima el proceso, lo cual corresponde a un problema de optimización. La formulación de un problema de optimización puede incluir costos asociados al proceso a optimizar y restricciones de operación.

Una vez determinadas las mejores u óptimas condiciones de operación, la tarea del control de procesos es asegurar que estas condiciones de operación se alcancen y mantengan a pesar de cambios en variables que conducen a cambios en el punto de operación óptimo. El control de procesos tiene una amplia gama de campos de aplicación pero su utilidad solo se observa a través de ser usada directamente en los procesos industriales. El control necesariamente interacciona con otras disciplinas para generar y aplicar tecnologías a situaciones reales que involucran problemas de calidad, seguridad y disposición de residuos.

El control de procesos en el ámbito industrial involucra el control de variables tales como temperatura, presión, flujo, etc. El control de procesos se ha aplicado en una gran variedad de procesos industriales, que van desde procesamiento de minerales y de refinación, hasta procesamiento de alimentos y productos farmacéuticos. Los procesos químicos y biotecnológicos generalmente presentan distintas características como comportamiento dinámico no lineal, interacción entre variables manipuladas y controladas, variables no medibles, perturbaciones frecuentes y no detectables, restricciones sobre variables manipuladas, parámetros que varían con el tiempo, entre muchas otras. Desde el punto de vista de la optimización y control de procesos, estas características de los procesos químicos y biotecnológicos generan problemas de optimización y control complicados y que no son fáciles de resolver con técnicas de optimización y control convencionales.

Los problemas de optimización en procesos químicos y biotecnológicos son altamente no-lineales, de gran escala, y con muchas interacciones. Para resolver esta clase de problemas se han desarrollado diversas técnicas, incluyendo métodos determinísticos y heurísticos avanzados, los cuales por su naturaleza no se abordan en cursos y proyectos de tesis a nivel licenciatura. En el Posgrado de Ingeniería de Procesos se cuenta con experiencia en la formulación y solución de problemas de optimización para procesos químicos y biotecnológicos, incluyendo la aplicación de programación no-lineal y de métodos evolutivos. Por otro lado, los problemas de control de procesos químicos y biotecnológicos conducen a problemas de control robusto y multivariables. Por una parte, la solución del problema de robustez en el diseño de control se puede resolver a través de técnicas de control convencionales mejoradas como el control proporcional-integral que permitan incluir la cuantificación del efecto de incertidumbres en el desempeño y sintonizado de esta clase de controladores y con técnicas de control basado en modelo que se han aplicado con éxito en otras industrias, las cuales no obstante se han aplicado escasamente en procesos químicos y biotecnológicos, a excepción del control predictivo. En el caso de control multivariable, existen muchas herramientas para analizar la interacción de diversos lazos de control y el mejor sintonizado de los mismos, los cuales también se trabajan por profesores que respaldan al Posgrado en Ingeniería de Procesos.

# POSGRADOS EN MÉXICO REFERENTES A ENERGÍA

## POSGRADO EN ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Recepción de documentos del 3 al 20 de octubre de 2016

Resultados 3 de enero de 2017

Inicio de cursos 16 de enero de 2017

[http://pema-uam.org/?page\\_id=261](http://pema-uam.org/?page_id=261)

Tienen 4 líneas de investigación:

1. Ingeniería en energía
2. Remediación ambiental
3. Recursos hidrológicos
4. Ecología y medio ambiente

## INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES, UNAM MAESTRÍA Y DOCTORADO SISTEMAS ENEGÉTICOS FUENTES RENOVABLES DISEÑO BIOCLIMÁTICO



Ingreso: informes a partir del 18 de enero del 2016. Entrega de documentos del 29 de febrero al 31 de marzo. Curso propedéutico \$750

Página web: <http://posgrado.ier.unam.mx/plan/>

Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME Culhuacán

## UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO MAESTRÍA EN INGENIERÍA ENERGÉTICA



Convocatoria: 13 al 17 de mayo hasta el 6 de julio se entregan resultados. Inicio de clases 15 de agosto del 2016.

Página web: <http://portal.uacm.edu.mx/Default.aspx?alias=portal.uacm.edu.mx/programaenergia>

## UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

### Maestría en energía renovable

12 asignaturas (8 básicas y 4 optativas).

No aparece información con respecto al ingreso.

Página web: <http://www.uag.mx/maestria/maestria-energia-renovable/>

## MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

### TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC

Registro de aspirantes 2 de mayo al 10 de junio

Curso propedéutico 4 de julio

Inicio de semestre 2016 -2, 22 de agosto de 2016

Líneas de investigación: Eficiencia energética y energías convencionales, energías alternas renovables.

[http://www.tese.edu.mx/documentos2004/5007\\_EMSTKWK.pdf](http://www.tese.edu.mx/documentos2004/5007_EMSTKWK.pdf)

# Diseño de Redes de Intercambio Térmico, Método del Punto de Pliegue

*Gallegos Delgado R., Guadarrama Pérez R., Hernández Ramírez S., Rivera Barrios E., Yáñez Varela  
J. A.*

**Posgrado en Ingeniería de Procesos  
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco**

## Resumen

En este trabajo se exponen algunos aspectos generales del método del punto de pliegue, tal como su origen y las ventajas que provee a la ingeniería de procesos. Posteriormente se detalla la técnica del método y se desarrolla la aplicación a un proceso propuesto para mostrar cada uno de los pasos que se siguen al atacar un problema de este tipo. Finalmente se muestran las ventajas económicas que proporciona la integración térmica realizando una comparación entre los costos generados por un proceso sin integración térmica y un proceso con recuperación térmica diseñado con el método del punto de pliegue.

## Introducción

La metodología del punto de pliegue fue originalmente desarrollada desde 1970 en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich y en la Universidad de Leeds gracias a Linnhoff y Flower. Motivados por los altos costos para la generación de energía que se observaron en esa década, realizaron esfuerzos para desarrollar procesos en los cuales se optimiza el uso de energía y con ello la disminución en los costos de operación y por tanto incrementar su factibilidad.

En los procesos químicos comúnmente se tiene la necesidad de incrementar o reducir la temperatura de varias corrientes. Generalmente esto se satisface mediante el uso de servicios auxiliares (ej. vapor o agua de enfriamiento), sin embargo el consumo de estos insumos aumenta los costos de operación del proceso. La metodología del punto de pliegue ofrece una técnica para la síntesis de sistemas de intercambio térmico, que aprovechan las características de las corrientes involucradas en el proceso, de tal manera que las corrientes calientes y las corrientes frías intercambien calor para ahorrar el consumo de servicios. Esto podría resultar en un número mayor de intercambiadores de calor, sin embargo, al reducir los costos de operación, económicamente se compensa el aumento en los costos

de inversión.

En un problema típico de síntesis de redes de intercambio térmico siempre se tendrán  $n$  corrientes calientes que deben enfriarse y  $m$  corrientes frías que requieren calentamiento, el objetivo es encontrar una red de intercambiadores de calor que satisfaga los requerimientos de temperaturas finales a un costo mínimo [2]. Es evidente que existe un problema de combinación que aumenta drásticamente a medida que se consideran mayor número de corrientes lo cual complica la búsqueda de la estructura óptima.

Además de un mejor uso de la energía y la reducción de costos, el método del punto de pliegue permite a los ingenieros de proceso diversas ventajas [3]:

- Actualizar o modificar el diagrama de flujo de proceso: El método cuantifica los ahorros disponibles cambiando el proceso mismo. Muestra dónde específicamente los cambios al proceso reducen los objetivos globales de energía, no sólo el consumo local de energía.
- Realizar estudios de simulación de procesos: El método permite remplazar los viejos estudios de energía con información que puede ser actualizada fácilmente y usada para simulación. Dichos estudios de simulación pueden ayudar a evitar costos de capital innecesarios identificando los ahorros de energía con una pequeña inversión antes de que los proyectos sean implementados.
- Establecer objetivos prácticos: Tomando en cuenta restricciones prácticas (fluidos complejos, retraso, seguridad, etc.), los objetivos teóricos son modificados de forma que pueden ser alcanzados en realidad. Comparando los objetivos prácticos con teóricos se pueden cuantificar las oportunidades no visibles por las restricciones.
- Eliminar de los cuellos de botella: El análisis mediante este método puede llevar a la reducción de los costos de operación e inversión además de la disminución de la demanda energética, mucho más rápidamente a comparación con métodos convencionales.

A continuación se describe brevemente cada uno de los pasos en método del punto de pliegue que posteriormente se aplican a un proceso y se muestra a detalle el beneficio económico que conlleva el utilizar esta metodología en función de la reducción en el requerimiento de servicios auxiliares.

## Metodología

### Determinación de los servicios mínimos de enfriamiento y calentamiento

Se inicia estableciendo una diferencia mínima de temperaturas entre la corriente de calentamiento y la corriente de enfriamiento, representada como  $\Delta T_{min}$ . Esta restricción para el intercambio térmico entre corrientes se establece por motivos de ingeniería, pues mientras termodinámicamente siempre es posible intercambiar calor de una temperatura mayor a una temperatura menor, en la práctica cuando existen diferencias de temperatura muy pequeñas entre las corrientes pueden requerirse áreas de intercambio térmico demasiado grandes, muy costosas o imprácticas. Generalmente el valor  $\Delta T_{min}$  se establece con un valor entre 5°C a 20°C. Utilizando el valor de  $\Delta T_{min}$  se ajustan las temperaturas de las corrientes calientes restando a cada una de ellas el valor del  $\Delta T_{min}$ . Nótese que las temperaturas de las corrientes frías permanecen inalteradas.

Las temperaturas ajustadas se establecen en un orden decreciente. A partir de este orden decreciente

resultado de las temperaturas ajustadas que se han obtenido, se definen los intervalos de temperatura, y para cada uno de ellos se efectúa un balance de entalpía. Para cualquier intervalo  $i$  el balance de entalpía está dado por:

$$\Delta H_i = \left[ \sum (WCp_c) - \sum (WCp_f) \right] * (T_i - T_{i+1}) \quad (1)$$

Donde  $WCp_c$  y  $WCp_f$  es la razón de flujo de la capacidad calorífica de las corrientes calientes y frías respectivamente involucradas en cada intervalo  $i$ . La idea es ahora formar una cascada de calor que vaya desde  $T_1$  hasta  $T_n$ . Si suponemos especialmente que no hay una fuente de calor externa ( $Q_h = Q_1 = 0$ ), podemos evaluar la cantidad de calor que fluye desde un nivel de temperatura  $T_i$  hasta  $T_{i+1}$  mediante el siguiente balance:

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta H_{i+1} \quad (2)$$

Si en la cascada de calor resultante observamos que se obtienen valores negativos para algunos niveles, esto implica que la cascada de calor viola la segunda ley de la termodinámica ya que significaría que se está transfiriendo calor de una región de baja temperatura a otra de alta temperatura. Para corregir este efecto, necesitamos agregar calor de alguna fuente externa. Se elige entonces, el valor negativo más alto y se agrega esa cantidad como  $Q_h$ . El esquema resultante debe cumplir ahora con el flujo natural de calor, es decir  $Q_i$  debe ser mayor o igual a cero para toda  $i$ . De este análisis se desprenden tres puntos importantes para el diseño de intercambiadores de calor:

- $Q_h$  representa la cantidad mínima de calentamiento que se necesita suministrar por medio de servicios.
- $Q_c$  es el último valor de la cascada de calor que es necesario extraer del sistema utilizando servicios auxiliares.
- Notamos que en algún intervalo  $i$  el flujo de calor  $Q_{pp}$  es cero. Esto proporciona un punto crítico para el diseño de la red llamado “el punto de pliegue” para lo cual se toma la temperatura de ese intervalo como la referencia.

### Diseño de la red de intercambio térmico

El objetivo ahora es diseñar una red de intercambiadores de calor que cumpla con los requerimientos mínimos de servicios que se han estimado. El punto de pliegue divide a la red en dos zonas: la zona fría que está ubicada abajo del punto de pliegue y la zona caliente ubicada por encima del punto de pliegue. Para lograr sintetizar la red de intercambio de calor con la máxima recuperación de energía se deben seguir los siguientes criterios en el diseño:

#### **No transferir calor a través del punto de pliegue**

Cualquier cantidad de calor que se transfiera debe satisfacer el balance global de energía, lo cual implicaría que el consumo de servicios va a exceder los requerimientos mínimos en una cantidad equivalente a la que se transfiere a través del punto de pliegue.

#### **No usar calentamiento debajo del punto de pliegue**

La cantidad que se use en esta zona debe rechazarse eventualmente a una fuente de enfriamiento externa, alterando así el consumo de servicios con respecto a los requerimientos mínimos.

### No usar enfriamiento arriba del punto de pliegue

La cantidad de enfriamiento que se use en esta zona debe compensarse con una cantidad equivalente de calentamiento.

La red con máxima recuperación de energía no es siempre la más económica. En ocasiones es necesario hacer cambios en el diseño obtenido para generar diseños más económicos.

### Estimación de costo anualizado

Como se mencionó, una de las ventajas de este método es la posibilidad de conocer de manera práctica la factibilidad económica. El costo anualizado se calcula mediante:

$$C_A = in \left[ \sum_{i=1}^n C_{i.c.}^i + \sum_{j=1}^m C_{e_{i.c.}}^j \right] + C_o \quad (3)$$

Donde  $C_A$  es el costo anualizado,  $in$  es la tasa interna de retorno,  $C_i$  es el costo unitario de cada intercambiador dentro de la red,  $C_e$  es el costo unitario de cada intercambiador de calor externo a la red y  $C_o$  son los costos de operación anualizados. Para poder realizar un cálculo correcto del costo anualizado requeriremos los costos de inversión y los costos de operación.

### Costos de inversión.

Los costos de inversión estimados dependen del número de equipos de intercambio térmico empleados en la red y las áreas de estos. Es posible estimar el área mediante la ecuación (4).

$$A = \frac{Q}{U * \Delta T_{ln}} \quad (4)$$

Donde  $A$  es el área del intercambio de calor,  $Q$  es la carga térmica,  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor y  $\Delta T_{ln}$  es la media logarítmica de la temperatura la cual podemos obtener mediante la ecuación de diseño para intercambiadores de calor:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_C^E - T_F^S) - (T_C^S - T_F^E)}{\ln \left( \frac{T_C^E - T_F^S}{T_C^S - T_F^E} \right)} \quad (5)$$

Donde las  $T$  son las temperaturas de operación del intercambiador de calor para las que los subíndices  $C$  y  $F$  indican si son corrientes calientes y frías respectivamente, y los superíndices  $E$  y  $S$  indican si son de entrada o salida respectivamente. Además de conocer el área de cada intercambiador es necesario conocer el material de éste. Con esta información podemos consultar los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $n$  de la ecuación 6 en tablas establecidas en la literatura [4] y calcular el costo unitario de cada equipo.

$$C_{i.c.} = a + b * A^n \quad (6)$$

Finalmente el costo de inversión se calcula sumando los costos unitarios de cada unidad de intercambio térmico.

### Costo de operación

Los costos de producción están relacionados directamente con los costos generados por los servicios

auxiliares, por lo que mientras mayor sea el consumo de éstos mayor será el costo de producción. Los costos de operación deben calcularse dependiendo de los medios de calentamiento y enfriamiento empleados específicamente para cada caso y obtener una cifra que sea lo más cercano posible al costo real por lo que debe incluir todos los insumos necesarios para generar el servicio.

## Aplicación

Considere un proceso en el que dos corrientes deben calentarse (C1 y C2) y dos corrientes deben enfriarse (H1 y H2) de acuerdo a los datos mostrados en la tabla 1.

*Tabla 1. Datos del caso de aplicación*

Corriente	C (kW/K)	h (kW/m <sup>2</sup> K)	T <sub>s</sub> (K)	T <sub>o</sub> (K)
H1	10	1.0	650	370
H2	20	1.0	590	370
C1	15	1.0	410	650
C2	13	1.0	350	500

Donde C es el flujo de capacidad calorífica, h es el coeficiente de película para la transferencia de calor, T<sub>s</sub> representa la temperatura de suministro y T<sub>o</sub> la temperatura objetivo. En este proceso se dispone de los siguientes servicios:

- I. Vapor a 680 K (h=5.0 kW/m<sup>2</sup>K) con un costo de 85 dls/kW.
- II. Agua de enfriamiento a 300 K que puede calentarse hasta 320 K (h=1.0 kW/m<sup>2</sup>K) con un costo de 15 dls/kW.

A continuación, se describe brevemente la aplicación de la metodología del punto de pliegue para diseñar una red de intercambio térmico utilizando la metodología de punto de pliegue para el proceso mencionado, donde se intercambia calor entre las corrientes que requieren enfriarse y las que requieren calentarse.

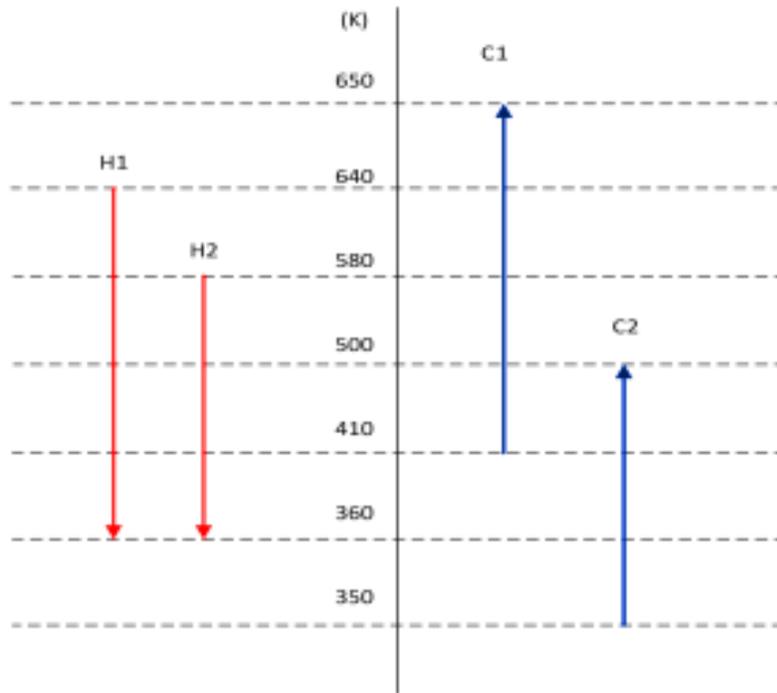


Figura 1. Intervalos de temperatura (en °C) determinados para el proceso estudiado.

A partir de los cálculos en los intervalos de temperatura definidos (véase figura 1) se determinó que el punto de pliegue para este proceso se encuentra en 580-590 K y los servicios mínimos requeridos son 450 kW de calentamiento y 2100 kW de enfriamiento (tabla 2).

Tabla 2. Cálculo de los servicios de enfriamiento y calentamiento requeridos de acuerdo a la metodología del punto de pliegue.

T(K)	Residual (kW)	Residual balanceado (kW)
--	--	450
<b>640</b>	-150	300
<b>580</b>	-450	0 (Punto de Pliegue)
<b>500</b>	750	1200
<b>410</b>	930	1380
<b>360</b>	1780	2230
<b>350</b>	1650	2100

Siguiendo los criterios de diseño que impone la metodología del punto de pliegue, explicados anteriormente se propone el diseño de red de recuperación de calor mostrado en la figura 2, el cual recupera la máxima cantidad de energía posible determinada por los cálculos. Donde CU y HU son los servicios de enfriamiento y calentamiento respectivamente.

Los costos de los equipos se calcularon suponiendo acero al carbono como material de construcción, que es el estándar. Podría requerirse emplear otro tipo de material si los fluidos del proceso lo necesitan por sus características (por ejemplo, si son corrosivos), en tal caso los costos variarían.

Se supone el empleo de intercambiadores de calor de doble tubo para áreas de transferencia menores a 10 m<sup>2</sup> y de coraza y tubos para áreas mayores. Se emplean los datos y procedimiento de cálculo de equipos propuesto en [4] y el resultado se proporciona en dólares del 20.

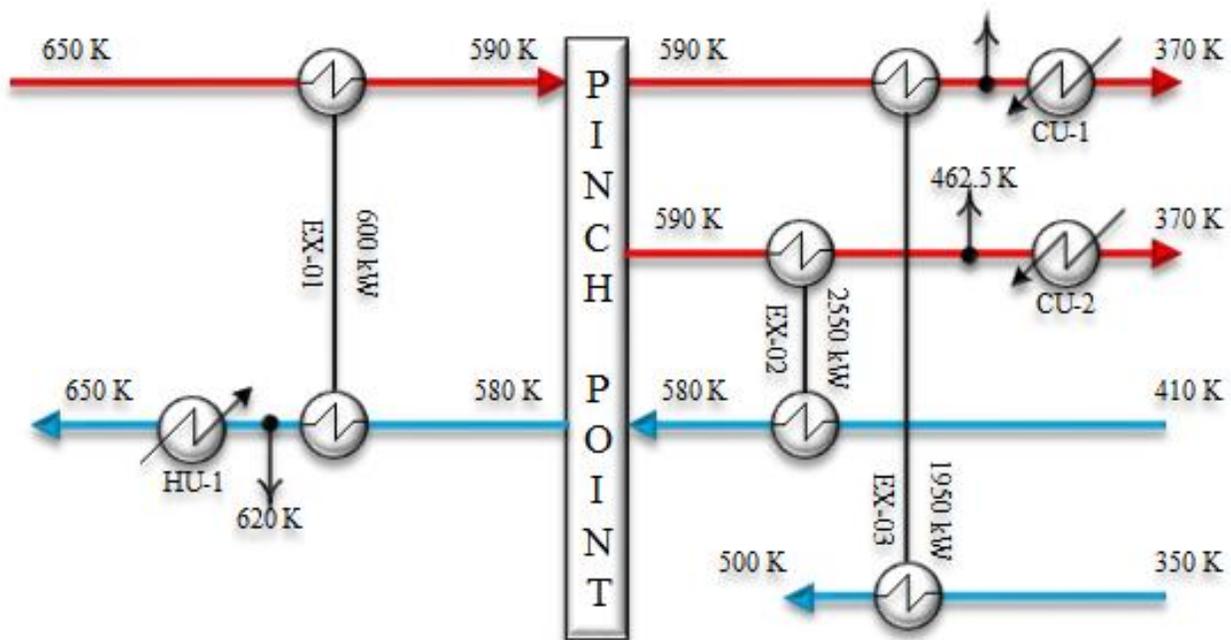


Figura 2. Diseño de la red de integración térmica.

## Resultados

Los 6 intercambiadores de calor requeridos tienen las características mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Datos de los equipos de la red de recuperación de calor.

Equipos	Corrientes	q (kW)	A (m <sup>2</sup> )
EX-01	H1-C1	600	65.9
EX-02	H2-C1	2550	198.9
EX-03	H1-C2	1950	60.1
HU1	C1-HU	450	12.5
CU1	H1-CU	250	6.9
CU2	H2-CU	1850	36.3

Si no se realiza integración térmica, las temperaturas objetivo deben alcanzarse usando únicamente

servicios de calentamiento y enfriamiento respectivamente y se requieren 4 intercambiadores de calor, de los cuales sus características se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Datos de los equipos requeridos cuando no existe recuperación de calor.

Equipo	Corrientes	q (kW)	A (m <sup>2</sup> )
CU1	H1-CU	2800	33.398
CU2	H2-CU	4400	59.397
HU1	C1-HU	3600	39.550
HU2	C2-HU	1950	9.456

A partir de esta información, se encuentran las características económicas para los procesos con integración (PCIT) y sin integración térmica (PSIT) mostradas en la figura 3.

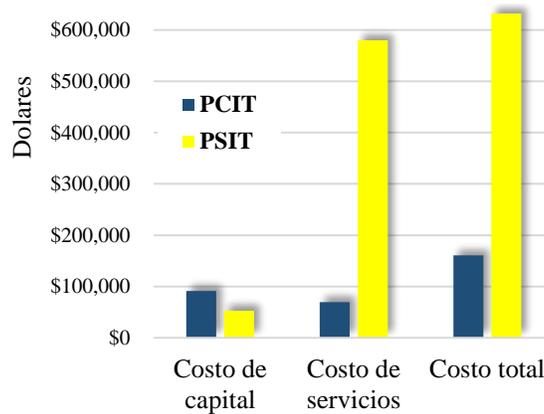


Figura 3. Comparación entre los costos de las dos las alternativas de procesos PCIT y PSIT.

En la figura 3 se observa que la red con recuperación de calor implica un aumento en la inversión del 73% en equipos debido a que el uso de 2 intercambiadores más, sin embargo, esto es compensado por una disminución del 88% en los costos de servicios empleados, hecho que tiene repercusiones altamente importantes, ya que los costos de servicios son considerados dentro de los costos de producción los cuales continuamente deben ser cubiertos por los industriales. Es por ello que aunque el PCIT implique una inversión mayor que el PSIT, el beneficio es superado por la disminución de los costos durante la operación, además de que el mayor aprovechamiento energético otorga al proceso ventajas ambientales que promueven la sustentabilidad.

## Conclusiones

El método del punto de pliegue es una herramienta sencilla y práctica que permite un aumento en el aprovechamiento energético de las diferentes corrientes que circulan en los procesos químicos. La aplicación del mismo refuerza la factibilidad económica y ambiental de los procesos. Sin embargo su aplicación está sujeta a la complejidad particular de los procesos a los que se desee aplicar, es por ello que deberán considerarse cuidadosamente todos los factores que se involucran al determinar una posible integración térmica.

## Referencias

1. Kemp, Ian C. Pinch Analysis and Process Integration. Second Edition. Butterworth-Heinemann. 2007.
2. Jiménez Gutiérrez, Arturo. Diseño de procesos en ingeniería química. Primera Edición. Editorial Reverté S.A. 2003.
3. Velázquez Miguel. Manual del Curso: Introducción de la integración de procesos para el control ambiental en la currícula de ingeniería. Texas A&M University. 2005.
4. González Brambila Margarita M. Introducción a la ingeniería de procesos. Primera Edición. Editorial Limusa. 2011.

# Hoja de Cálculo para el Diseño de Redes de Intercambiadores de Calor con Aplicaciones Educativas

RUBEN AGUILAR-ISLAS

Posgrado en Ingeniería de Procesos

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

Email: [rubennigge@gmail.com](mailto:rubennigge@gmail.com)

## RESUMEN

Una Hoja de Cálculo para la enseñanza del diseño de redes de intercambiadores de calor de manera gráfica y analítica denominada SEDRIC (Sistema para la Enseñanza del Diseño de Redes de Intercambiadores de Calor) ha sido desarrollada. La alimentación de los datos, el proceso de diseño y el análisis, se hacen de una manera amigable e interactiva obteniendo resultados analíticos y gráficos que permiten aplicar la metodología de la Tecnología Pinch de calor descrita en la literatura abierta. Se espera que ésta, llene el vacío existente entre los fundamentos de la Tecnología del Punto de Pliegue, los programas comerciales y la práctica en la industria.

## INTRODUCCIÓN

La producción y uso de energía de manera eficiente, rentable y ambientalmente sustentable es en cada momento muy importante; de ahí la trascendencia del análisis y mejoramiento de los sistemas de proceso para mejorar la situación energética en el ámbito mundial.

Los principales Métodos de Integración de Procesos están basados en el concepto del Pinch desarrollado originalmente por Linnhoff y Hindmarsh, (Linnhoff, 1983). Este método se utiliza para la recuperación de calor en redes de intercambiadores de calor (RIC). En México, la Tecnología Pinch no está siendo completamente utilizada debido a la manera como se presenta y enseña; los trabajos reportados en la literatura son poco pedagógicos y dan la impresión que es necesario ser experto en el tema, manejar programas de computadora costosos y participar en cursos especiales para poder comprender esta tecnología. El estudiante, buscando la literatura académica para aprender la metodología y aplicarla, encuentra que existe un abismo entre lo reportado y lo que en la práctica se aplica.

El objetivo de la hoja de cálculo denominado SEDRIC (Sistema para la Enseñanza del Diseño de Redes de Intercambiadores de Calor), es proporcionar una herramienta didáctica para comprender y resolver problemas relacionados al diseño de RIC de complejidad básica útiles en la enseñanza a nivel Licenciatura, y problemas complejos de común interés académico e industrial útiles en la enseñanza de Integración de Procesos a nivel Maestría en áreas de Ingeniería Química, Ahorro de Energía y temas relacionados. De esta manera, se busca llenar el vacío que existe entre la teoría general y el entendimiento didáctico de los métodos en la Tecnología Pinch para fomentar un pensamiento crítico y constructivo en los que inician el estudio de Integración de Procesos antes de pasar en automático a utilizar programas comerciales (Aspen Energy Analyzer, Aspen HX-Net, Super Target de KBC, Hextran de SimSci, Honeywell UniSim Design 430).

El resultado de desarrollar problemas asistidos con esta hoja de cálculo, será de apoyo fundamental para la enseñanza-aprendizaje de la Tecnología Pinch y un mejor dominio de los simuladores comerciales disponibles en esta área de trabajo. Si bien no es un tema novedoso, si lo es el hecho de hacer aportaciones específicas y proporcionar la práctica en problemas de distintas magnitudes, situación que se piensa es primordial para ampliar la curricula nacional en Integración de Procesos tanto a nivel Licenciatura como a nivel Posgrado.

## DESCRIPCIÓN DE SEDRIC

SEDRIC hace uso Excel Microsoft Windows; esta dividido en su primera versión en 65 hojas de cálculo donde se realizan operaciones aritméticas, selección de celdas, y gráficos de manera semiautomática; tiene una ayuda incorporada a manera de tutorial en algunas celdas que explican actividades a realizar, datos que alimentar, datos a graficar y variables a calcular; esto facilita al usuario el resolver problemas al mismo tiempo que aplica los fundamentos de la Tecnología Pinch en forma completamente interactiva. En la Tabla 1 se muestra la descripción de las hojas de cálculo, así como referencias bibliográficas en donde se encuentra la teoría que complementaria. SEDRIC puede manejar hasta 10 corrientes de proceso (5 calientes y 5 frías), 1 división por corriente, 5 unidades de intercambio de calor por cada zona (arriba y abajo del Pinch), identificar y eliminar hasta 5 lazos de calor, y restablecer la Temperatura Mínima de Aproximación  $\Delta T_{min}$  (Linnhoff, 1982), hasta en 5 ocasiones mediante Rutas de Calor (Linnhoff, 1983), (Linnhoff, 1982).

*Tabla 1. Descripción de las Hojas de Cálculo en SEDRIC*

HOJA DE CÁLCULO	DESCRIPCIÓN	REF.
- Datos para el Problema	Introducción temperaturas y propiedades de las corrientes	(Linnhoff, 1983)
- Intervalos Nuevos Temperatura	Calcula los nuevos intervalos en función de la $\Delta T_{min}$ utilizando el Algoritmo de la Tabla Problema.	(Linnhoff, 1978)
- Tabla Problema	Se realiza la cascada de calor para determinar los requerimientos mínimos de energía y punto Pinch. Calcula el costo anualizado de los servicios auxiliares.	(Linnhoff, 1978)
- Datos para Gran Curva Compuesta	<b>A.</b> Los datos de la cascada de calor del problema se incorporan o se puede anexar datos de un problema nuevo.	(Linnhoff, 1982)
- Gráfico Gran Curva Compuesta	<b>B.</b> Se grafican los datos de la cascada de calor	
- Selección Servicios Auxiliares	<b>A.</b> Se anotan los servicios de calentamiento y enfriamiento auxiliares externos a incorporar en la Gran Curva Compuesta y se determinan las cargas térmicas en función de maximizar el uso.	(Linnhoff, 1982), (Townsend, 1983)
- Gran Curva Compuesta Selección Servicios Auxiliares	<b>B.</b> Se grafican los datos de la selección de servicios auxiliares externos en la gran curva compuesta.	
- Datos para Curvas Compuestas	<b>A.</b> En base a los requerimientos mínimos de calentamiento y enfriamiento para una $\Delta T_{min}$ determinada, se efectúan los	(Linnhoff, 1982)

- Gráfico de Curvas Compuestas	<p>cálculos para obtener los datos a graficar en la obtención de las Curvas Compuestas.</p> <p><b>B.</b> Se grafican los datos de la hoja de cálculo datos para Curvas Compuestas.</p>	
<p>- Datos para Curvas Compuestas Balanceadas</p> <p>- Gráfica Curva Compuesta Balanceada</p> <p>- Datos Intervalos de Entalpía</p> <p>- Gráfico Intervalos de Entalpía</p>	<p><b>A.</b> Se incorporan los datos de los servicios de calentamiento y enfriamiento del problema con los datos de las corrientes.</p> <p><b>B.</b> Se grafican los datos de las corrientes junto con la de los servicios de calentamiento y enfriamiento.</p> <p><b>C.</b> De manera interactiva se determinan los intervalos de intercambio de calor para calcular el área mínima objetivo de la red.</p> <p><b>D.</b> En combinación con la hoja Datos Intervalos de Entalpía, se determina de manera exacta las temperaturas de los intervalos sobre las curvas compuestas.</p>	(Linnhoff, 1990), (Townsend, 1984)
- Área de Transferencia 1-1	Se calcula el área mínima objetivo de la red utilizando intercambiadores de calor 1 paso por la coraza y 1 por los tubos.	(Townsend, 1984)
- Área de Transferencia 1-2	Se calcula el área mínima objetivo de la red utilizando intercambiadores de calor 1 paso por la coraza y 2 por los tubos y se obtiene además el número mínimo de corazas para la red.	(Ahmad, 1984), (Linnhoff, 1990)
<p>- Datos para Gráfica de Fuerza Impulsora (DFP)</p> <p>- Curvas Compuestas para obtener Gráfica DFP</p>	<p><b>A.</b> Se obtendrán los datos de las diferencias entre la curva compuesta caliente y la curva compuesta fría.</p> <p><b>B.</b> En combinación con la hoja Datos para Gráfica de Fuerza Impulsora, se determinan Intervalos de Entalpía de manera exacta entre las temperaturas de los intervalos sobre las curvas compuestas caliente y fría y se obtiene de manera simultánea la gráfica DFP.</p>	(Linnhoff, 1984), (Tjoe, 1986)
- Diagrama de Rejas	Se muestran las corrientes de proceso calientes y frías y el punto Pinch determinado en la Tabla Problema	(Linnhoff, 1982)
<p>- Tabla CP Arriba del Pinch</p> <p>- Tabla CP Abajo del Pinch</p>	Esta hoja de cálculo determina el número mínimo de unidades arriba y abajo del Pinch. Además, utiliza la Tabla CP para determinar las combinaciones entre las corrientes en el Pinch y alejándose del Pinch con o sin división de estas. Calcula además la razón $CP_{CALIENTE}/CP_{FRÍA}$ para establecer la factibilidad del diseño de la red en problemas donde se busca el diseño de la red en base al área mínima y no en base al número mínimo de unidades.	(Linnhoff, 1983), (Linnhoff, 1982)
<p>- Diseño Arriba del Pinch</p> <p>- Diseño Abajo del Pinch</p>	Se anotan las combinaciones establecidas en la Tabla CP y se calcula las nuevas temperaturas de las corrientes, así como la factibilidad térmica del intercambiador colocado.	(Linnhoff, 1983), (Linnhoff, 1982)
- Análisis Energía	En el caso del diseño de la red en base al área mínima, se busca	(Linnhoff, 1990),

<p>Remanente Arriba del Pinch</p> <p>- Análisis Energía Remanente Abajo del Pinch</p>	<p>que la combinación no afecte al remanente de las corrientes en función de requerir más energía que la determinada en la tabla problema.</p>	<p>(Linnhoff, 1983), (Tjoe, 1986)</p>
<p>- Localización Intercambiadores en DFP arriba del Pinch.</p> <p>- Localización Intercambiadores en DFP abajo del Pinch.</p> <p>- Gráfico DFP Arriba del Pinch</p> <p>- Gráfico DFP Abajo del Pinch</p>	<p><b>A.</b> Se anotan las temperaturas iniciales y finales de cada intercambiador, así como su carga térmica para graficarlas en la hoja Gráfico DFP arriba y abajo del Pinch.</p> <p><b>B.</b> Cuando se diseña la red en base al requerimiento del área mínima, en este gráfico se ven los intercambiadores y se observa su alineación; los intercambiadores alejados requerirán más área de intercambio y la red no cumplirá respecto a esta base.</p>	<p>(Linnhoff, 1984), (Tjoe, 1986)</p>
<p>- Diseño Completo de la Red</p>	<p>Se unen los diseños arriba y abajo del Pinch.</p>	<p>(Linnhoff, 1982)</p>
<p>- Número de Lazos de Calor en la Red</p>	<p>La hoja calcula el número de lazos que tuviera el diseño completo de la red en función del número de corrientes, número de servicios auxiliares y el número mínimo de unidades.</p>	<p>(Hohmann, 1971)</p>
<p>- Identificación Lazo de Calor</p> <p>- Eliminación Lazo de Calor paso A</p> <p>- Eliminación Lazo paso B</p> <p>- Ruta de Calor</p> <p>- Ajuste Ruta de Calor</p>	<p><b>A.</b> Determinado el número de lazos en la red con la hoja de cálculo anterior, se identifica el lazo.</p> <p><b>B.</b> Identificado el lazo de calor, en esta hoja se elimina el intercambiador de calor con la menor carga térmica y se ajustan las cargas térmicas y las temperaturas de los demás intercambiadores involucrados.</p> <p><b>C.</b> Se localiza alguna violación de la <math>\Delta T_{min}</math> al momento de ajustar las cargas térmicas y temperaturas de los intercambiadores de calor.</p> <p><b>D.</b> En caso de existir alguna violación de la <math>\Delta T_{min}</math>, se traza una ruta de calor para restablecer la diferencia mínima de temperatura.</p> <p><b>E.</b> Se determina la cantidad de calor que se deberá de ajustar a los intercambiadores de calor dentro de la ruta de calor para restablecer la <math>\Delta T_{min}</math></p>	<p>(Linnhoff, 1983), (Linnhoff, 1982)</p>
<p>- Red Definitiva</p>	<p>Eliminados todos los lazos de calor, se muestra la red de intercambiadores de calor definitiva.</p>	<p>(Linnhoff, 1982)</p>
<p>- Costo de la Red Definitiva</p>	<p>En esta hoja de cálculo se determina el costo capital anualizado de la red obtenida. Diversas conclusiones se obtienen de esta hoja en relación al área mínima objetivo de la red y el costo de</p>	<p>(Smith, 2005)</p>

	capital anualizado de la red.	
--	-------------------------------	--

En cada hoja de SEDRIC, existen celdas con un recuadro de ayuda que se incluyó como comentarios; estas celdas se pueden identificar por un triángulo rojo en la esquina superior derecha.

## DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA DEL PUNTO PINCH EN LA HOJA DE CÁLCULO

Para el diseño de redes de intercambiadores de calor, SEDRIC se organiza de la siguiente manera:

**a).** Se obtiene el requerimiento mínimo objetivo de calentamiento y enfriamiento utilizando una  $\Delta T_{min}$  ya establecida utilizando el Algoritmo de la Tabla Problema (Linnhoff, 1978) y gráficamente mediante las Curvas Compuestas (Linnhoff, 1982); Se traza la Gran Curva Compuesta (Linnhoff, 1982) y se integran Servicios Auxiliares Externos sobre esta (Linnhoff, 1982) y (Townsend, 1983).

**b).** A continuación, se obtiene el Costo Capital Anualizado Mínimo Objetivo (Smith, 2005) de la RIC calculando el Área Mínima Objetivo (Townsend, 1984) mediante las Curvas Compuestas Balanceadas (Linnhoff, 1990) y (Townsend, 1984) divididas en intervalos de entalpía; Esta área mínima objetivo se determina considerando intercambiadores de calor 1-1 (un paso por los tubos y un paso por la coraza) o intercambiadores 1-2 (un paso por los tubos y dos por la coraza); en estos últimos, se determina el Número Mínimo Objetivo de Corazas (Ahmad, 1984) y (Linnhoff, 1990) y el Factor de Corrección de Temperatura  $F_T$  (Ahmad, 1984).

**c).** Se elabora el diseño de la RIC separando el problema en dos secciones: arriba y abajo del Pinch; se determina el Número Mínimo Objetivo de Unidades (Linnhoff, 1982) en cada sección y se utiliza el Diagrama de Rejas (Linnhoff, 1982) para representar las corrientes frías y calientes. La combinación de corrientes frías y calientes se realiza colocando unidades de intercambio de calor en el diagrama de rejas siguiendo la Tabla CP (Linnhoff, 1983) y (Linnhoff, 1982), cuando se busca que el diseño de la red cumpla el número mínimo de unidades objetivo y tres metodologías distintas cuando el diseño de la RIC debe cumplir con el objetivo del área mínima: -La primera es comparar la relación  $CP_{CALIENTE}/CP_{FRÍA}$  de la combinación contra  $\Sigma CP_{CALIENTE}/\Sigma CP_{FRÍA}$  de todas las demás corrientes (Hohmann, 1971); si la diferencia es mayor que 0.005, indica que la combinación no tiene una transferencia de calor vertical exacta y por lo tanto no se esta aproximando al área mínima objetivo. -La segunda es el Gráfico de las Fuerzas Impulsoras Driving Force Plot, DFP por sus siglas en inglés (Linnhoff, 1984) y (Tjoe, 1986), que se utiliza cuando las relaciones CP de las combinaciones de corrientes son adecuadas, pero no se alcanza el área mínima objetivo de la RIC al final del diseño. Se examina la alineación de los intercambiadores propuestos en el gráfico  $\Delta T$  de las curvas compuestas contra las temperaturas de las corrientes frías  $T_{FRÍA}$  y si la combinación hace poco uso de las fuerzas impulsoras, se verá desalineada con respecto a la curva. -La tercera metodología realiza el Análisis de Energía Remanente (Linnhoff, 1990), (Linnhoff, 1983) y (Tjoe, 1986) en donde se compara el requerimiento mínimo de calentamiento y enfriamiento con el requerimiento obtenido sin considerar la combinación de corrientes establecida (remanente); si el requerimiento mínimo de calentamiento y enfriamiento remanente de la combinación es mayor que el requerimiento objetivo original, entonces se tendrá una penalización de energía que señala a la combinación como no adecuada.

**d).** Con la RIC diseñada, se determina el Número de Lazos de Calor (Hohmann, 1971), y en caso de que existan, se identifican, eliminan, y se restablece la  $\Delta T_{min}$  (Linnhoff, 1983) y (Linnhoff, 1982) en caso de su violación trazando una ruta de calor que conecta la unidad de calentamiento con la unidad de

enfriamiento entre unidades de intercambio de calor dentro de la RIC. Restablecida la  $\Delta T_{min}$  y eliminados todos los lazos de calor se obtiene la RIC definitiva, se calcula el área de intercambio de calor ( $A = Q / U\Delta T_{LMTD}$ ) y se determina el costo capital anualizado a cada unidad que se compara con el Área Mínima y Costo Mínimo Objetivo determinados en el punto b. Esta última hoja dará conclusiones acerca de lo cercano que se encuentra el diseño de la RIC contra los objetivos del punto a y b (Smith, 2005).

## EJEMPLO DE APLICACIÓN.

El uso de SEDRIC en un problema de diseño se muestra en la Figura 1 (Smith, 2005).

DATOS PARA EL PROBLEMA					
Descripción: <i>Figura 16.2 Chemical Process Design and Integration Robin Smith, 2005</i>				Temperatura Mínima de Aproximación $\Delta T_{min}$ : 10.00 °C	
ID	Temperatura Inicial, °C	Temperatura Final, °C	Capacidad Calorífica de Flujo, kW/°C	Coef. de Transf. Calor de Película, kW/m <sup>2</sup> °C	Servicios Auxiliares.
Corrientes Calientes	TI	TF	CP	h	Temperatura Inicial del Servicio de Calentamiento: 240.00 °C
2	250.00	40.00	0.15	0.0010	Temperatura Final del Servicio de Calentamiento: 239.00 °C
4	200.00	80.00	0.25	0.0008	Coef. de Transf. Calor de Película del Servicio de Calentamiento: 0.0030 kW/m <sup>2</sup> °C
					Costo Anual del Servicio de Calentamiento: 120000 \$/Kw año
					Temperatura del Servicio de Enfriamiento Inicial: 20.00 °C
					Temperatura del Servicio Enfriamiento Final: 30.00 °C
					Coef. de Transf. Calor de Película del Servicio de Enfriamiento: 0.0010 kW/m <sup>2</sup> °C
					Costo Anual del Servicio de Enfriamiento: 10000 \$/Kw año
Corrientes Frias					Costo Capital de Intercambiadores: <b>a+bA<sup>c</sup></b> \$ año
1	20.00	180.00	0.20	0.0006	Factor a 40000.00
3	140.00	230.00	0.30	0.0008	Factor b 500.00
					Factor c 1.00
					Costo Capital de Enfriadores: <b>a+bA<sup>c</sup></b> \$ año
					Factor a 40000.00
					Factor b 500.00
					Factor c 1.00
					Costo Capital de Calentadores: <b>a+bA<sup>c</sup></b> \$ año
					Factor a 40000.00
					Factor b 500.00
					Factor c 1.00
					Periodo Vida Útil 5 Años
					Tasa de Interés 10.00 %
Selección de Servicios Auxiliares Externos					
Servicio	Descripción	ID	Temp. Inicial °C	Temp. Final °C	
Caliente	Vapor Alta Presión	VHP	240.00	239.00	
Caliente	Vapor Baja Presión	VLP	180.00	179.00	
Caliente	Circuito Aceite Calie	HO	280.00	150.00	
Frio					
Frio					
Intercambiadores de Calor Corazas 1-2					
Parámetro de Diseño Xp :		0.9			
Area Máxima por Coraza m <sup>2</sup> :		500			

Figura 1 Hoja de Alimentación Datos para el Ejemplo de Aplicación

La hoja de alimentación de datos para el problema, al igual que otras hojas de cálculo, muestra zonas coloreadas en amarillo indicando se deben suministrar datos o efectuar operaciones. En la Figura 2 se muestra el Algoritmo de la Tabla Problema donde se obtiene el requerimiento mínimo objetivo de calentamiento y sus costos.

# TABLA PROBLEMA

$\Delta T_{min} = 10.00 \text{ } ^\circ\text{C}$

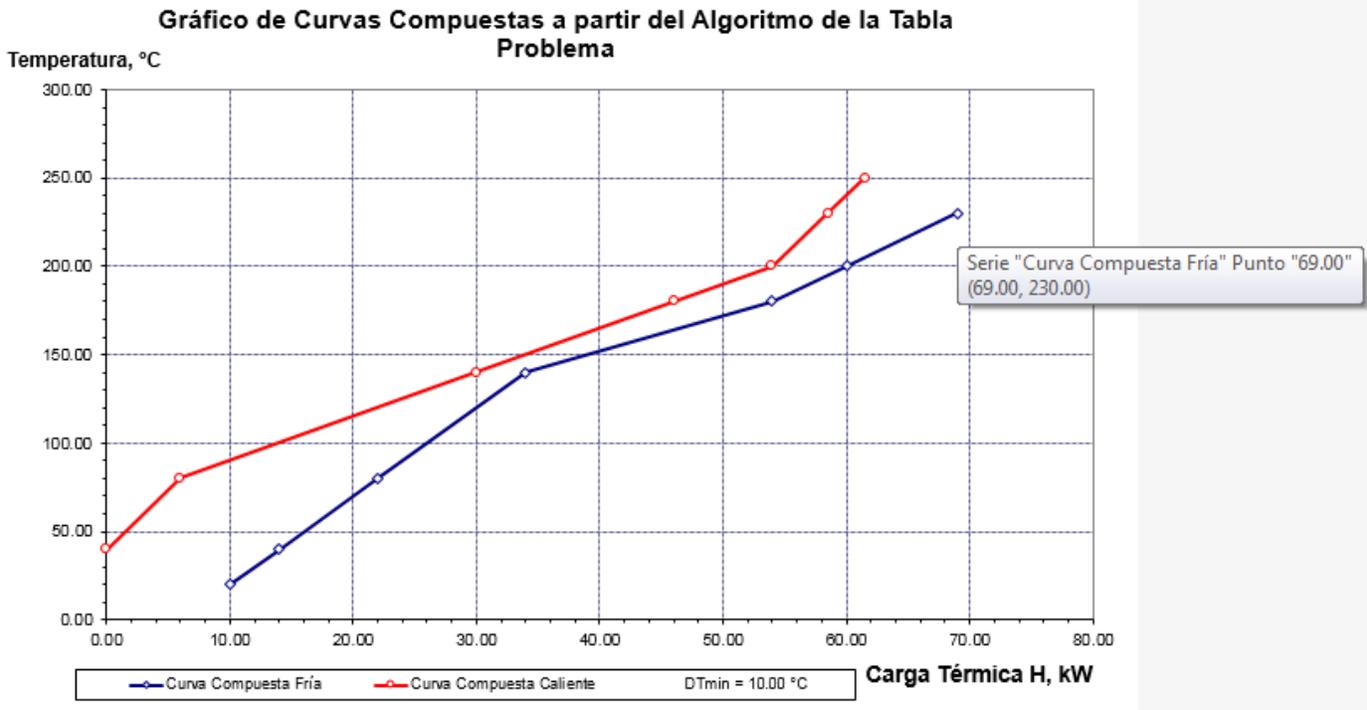
Temp. Ajustadas	Temp.	Intervalo	CP kW/°C				$\Delta T_i$	$\Sigma CPI_{CF}$	$\Sigma CPI_{CC}$	$\Sigma CPI_{CF} - \Sigma CPI_{CC}$	$\Delta H_i$	Cascada, kW	Ajuste, kW
de los Intervalos	Interv. °C	no.	0.20	0.30	0.15	0.25	°C	kW/°C	kW/°C	kW/°C	kW	0.00	7.50
245.00	245.00	1					10.00	0.00	0.15	-0.15	-1.50	1.50	9.00
235.00	235.00	2					40.00	0.30	0.15	0.15	6.00	-4.50	3.00
195.00	195.00	3					10.00	0.30	0.40	-0.10	-1.00	-3.50	4.00
185.00	185.00	4					40.00	0.50	0.40	0.10	4.00	-7.50	0.00
145.00	145.00	5					70.00	0.20	0.40	-0.20	-14.00	6.50	14.00
75.00	75.00	6					40.00	0.20	0.15	0.05	2.00	4.50	12.00
35.00	35.00	7					10.00	0.20	0.00	0.20	2.00	2.50	10.00
25.00	25.00	8					25.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
0.00	0.00	9					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
0.00	0.00	10					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
0.00	0.00	11					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
245.00	0.00	12					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
235.00	0.00	13					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
195.00	0.00	14					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
185.00	0.00	15					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
145.00	0.00	16					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
75.00	0.00	17					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
35.00	0.00	18					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
25.00	0.00	19					0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.50	10.00
		Corrientes	1	3		2	4						

Requerimiento Mínimo de Calentamiento: 7.50 kW  
 Costo Anual Servicio de Calentamiento: 900000.00 \$/Año  
 Requerimiento Mínimo de Enfriamiento: 10.00 kW  
 Costo Anual Servicio de Enfriamiento: 100000.00 \$/Año  
 Costo Total Anual Mínimo de los Servicios Aux.: 1000000.00 \$/Año  
 Temperatura Pinch en el Intervalo: 4 145.00 °C  
 Pinch Corriente Caliente : 150.00 °C  
 Pinch Corriente Fría : 140.00 °C

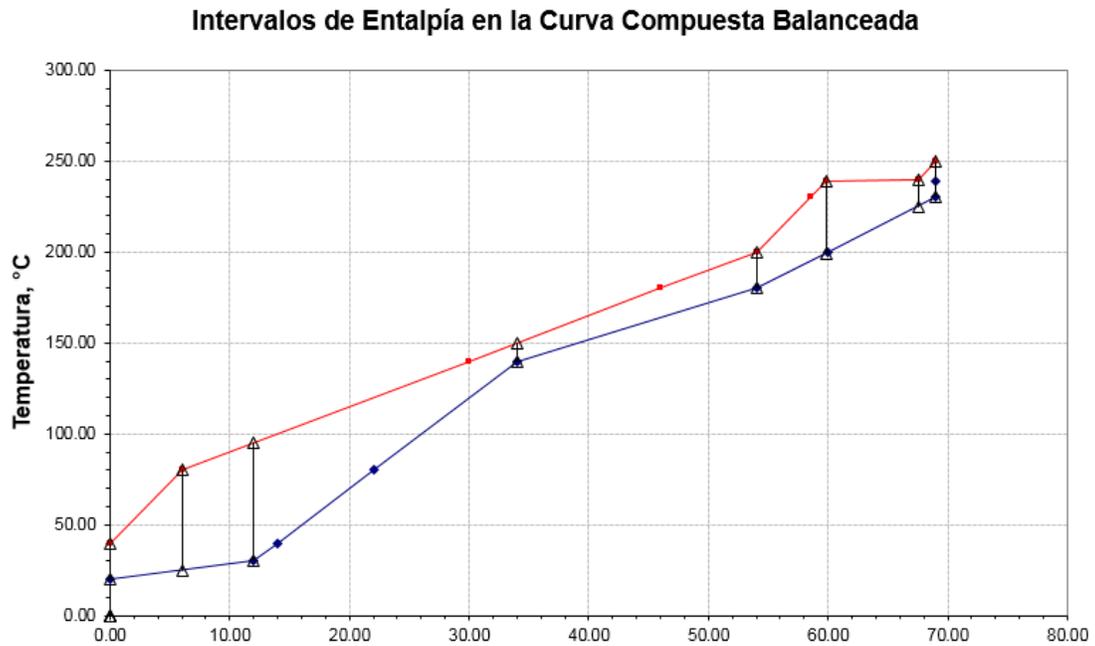
Figura 2 Algoritmo de la Tabla Problema Ejemplo de Aplicación

La Figura 3 muestra el gráfico de las curvas compuestas donde pasando el cursor sobre puntos de las curvas, visualiza los valores de temperatura y carga térmica.

Esta característica de Excel para los gráficos se aprovecha para leer y trazar valores en la determinación de intervalos de entalpía (Figura 4).



*Figura 3. Curvas Compuesta Ejemplo de Aplicación*



*Figura 4. Intervalos de Entalpía en Curvas Compuestas Balanceadas Ejemplo de Aplicación*

Los valores que se lean de la gráfica de intervalos de entalpía, se utilizan para calcular el área y costo mínimo objetivo tanto de cambiadores 1-1 y 1-2 (Figs. 5a y 5b).





$$W = \left( \frac{R+1+\sqrt{R^2+1-2RX_P}}{R+1+\sqrt{R^2+1-2X_P}} \right)$$

X<sub>p</sub> es una constante definida por el diseñador y en este ejemplo se asignó el valor de 0.9 (Tjoe, 1986). El cálculo del área mínimo objetivo para la RIC considerando cambiadores de calor 1-2 se muestra en las Figuras 6a, 6b y 6c.

CÁLCULO DE LA ΔT <sub>LMTD</sub> Y ΔT <sub>L</sub> CALIENTE Y FRÍA PARA EL CÁLCULO DEL ÁREA MINIMA OBJETIVO DE LA RED.										CÁLCULO DEL FACTOR FT, DETERMINACIÓN DEL NÚMERO MÍNIMO DE CORAZAS E IDENTIFICACIÓN DE LAS CORRIENTES Y CORAZAS EN LOS INTERVALOS DE INTERCAMBIO DE CALOR									
CÁLCULO TEMPERATURA MEDIA LOGARÍTMICA INTERVALOS DE CALOR										CÁLCULO TEMPERATURA ΔT <sub>L</sub>									
Intervalo de Calor (K)										Determinación del Número Mínimo de Corazas en el Intervalo k y Factor de corrección Ft									
Temperaturas Intervalos Curva Compuesta Balanceada Fría										Temperaturas Intervalos Curva Compuesta Balanceada Caliente									
Temp. Pinch Corriente Caliente, °C										Temp. Pinch Corriente Fría, °C									
Número de Corrientes Arriba del Pinch										Número de Corrientes Abajo del Pinch									
Número Mínimo Objetivo de Unidades en la Red										Red de Intercambio de Calor, U <sub>total</sub> =									

Figura 6a. Cálculo Temperatura media logarítmica y diferencia de temperaturas en los intervalos e Identificación de las Corrientes en los Intervalos de Intercambio de Calor 1-2

DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CORAZAS 1-2 ARRIBA Y ABAJO DEL PINCH EN LOS INTERVALOS DE INTERCAMBIO DE CALOR.										AJUSTE DEL NUMERO DE CORAZAS ARRIBA Y ABAJO DEL PINCH									
Intervalo de Calor (K)										Intervalo de Calor (K)									
Número de Corrientes Arriba del Pinch										Número de Corrientes Abajo del Pinch									
Sumatoria =										Sumatoria =									
Área Prom. Corazas m <sup>2</sup> =										Área Prom. Corazas m <sup>2</sup> =									
El Área Promedio de las Corazas Excede el Valor Mínimo Establecido										El Número de Corazas Determinado no Cambia									
NÚMERO MÍNIMO DE CORAZAS EN LA RED :										19									

Figura 6b. Determinación del Número de Corazas Arriba y Abajo del Punto Pinch

AJUSTE DEL NUMERO DE CORAZAS ARRIBA Y ABAJO DEL PINCH										DETERMINACIÓN DEL AREA MINIMA OBJETIVO DE LA RED DE INTERCAMBIO DE CALOR 1-2									
Intervalo de Calor (K)										Intervalo de Calor (K)									
Sumatoria =										Sumatoria =									
Área Prom. Corazas m <sup>2</sup> =										Área Prom. Corazas m <sup>2</sup> =									
El Área Promedio de las Corazas Excede el Valor Mínimo Establecido										El Número de Corazas Determinado no Cambia									
NÚMERO MÍNIMO DE CORAZAS EN LA RED :										19									
Factor para Analizar:										0.2039									

Figura 6c. Determinación del Área Mínimo Objetivo de la RIC 1-2

En la Figura 7 se muestra el Diagrama de Rejas para iniciar así el diseño Arriba (Figura 8) y debajo del Punto Pinch (Figura 9) por separado. Cabe hacer notar en la Figura 7, que solo se muestran todas las corrientes que están involucradas en el problema, y que no denota, que corriente, por las condiciones del problema, cruza o no el punto Pinch. Este detalle si se muestra en el momento del diseño de las zonas arriba y abajo del Pinch tal y como lo muestran las Figuras 8 y 9.

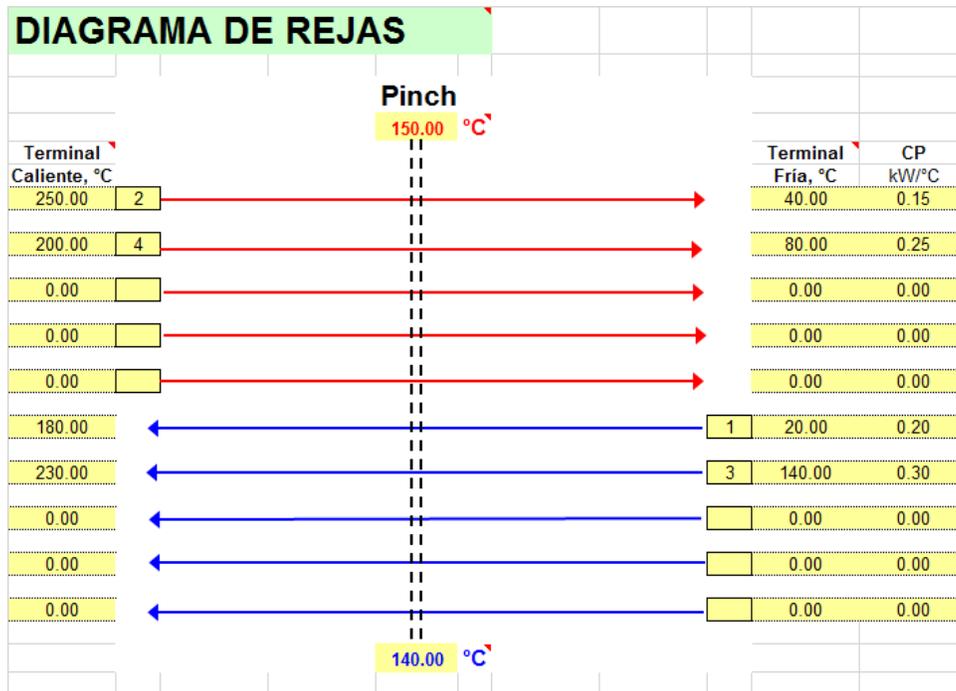


Figura 7. Diagrama de Rejas para el diseño arriba y debajo del Punto Pinch

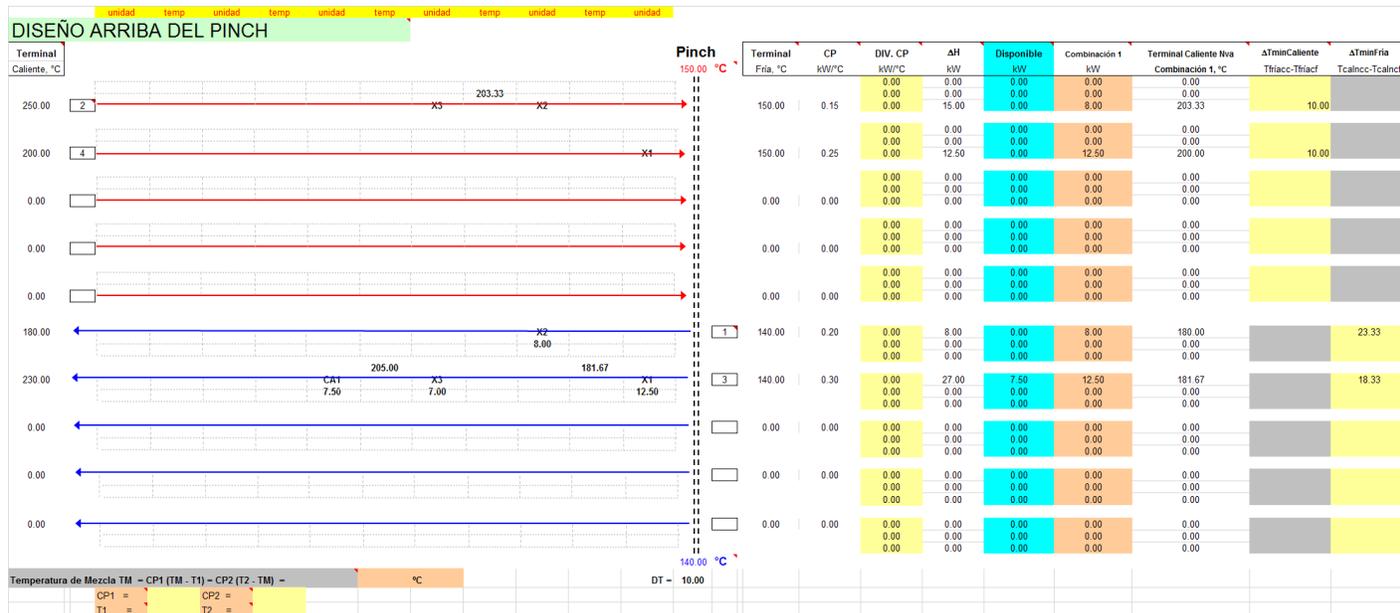


Figura 8. Diseño de la Red arriba del Punto Pinch

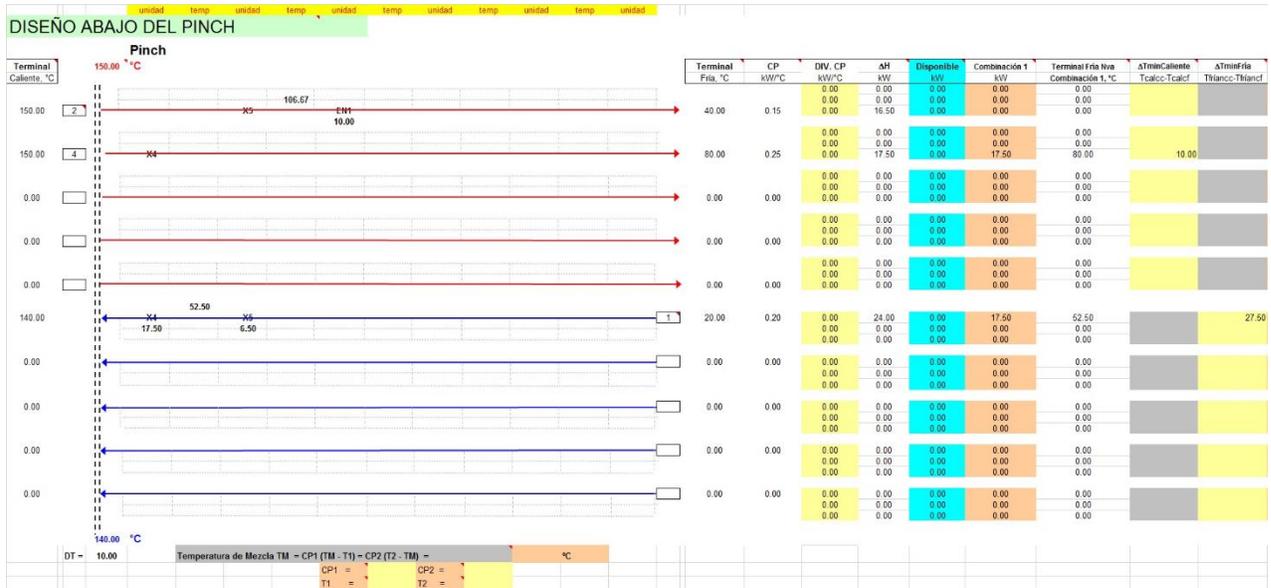


Figura 9. Diseño de la Red debajo del Punto Pinch

Para poder realizar los diseños, se requiere efectuar un análisis de los CP de las corrientes y establecer las mejores combinaciones que eviten la violación de la ΔT min; en la Figura 10 se muestra tal análisis para el diseño arriba del Pinch y en la Figura 11 para la zona debajo del Pinch.

**TABLA CP ARRIBA DEL PINCH**

**Tabla CP Arriba del Pinch**

$N_{CORRIENTES SALEN DEL PINCH} \geq N_{CORRIENTES ENTRAN AL PINCH}$

$2 \geq 2$

ΔT <sub>SALE</sub>	ΔH <sub>SALE</sub>	Corriente ID	CP <sub>SALE</sub>	CP <sub>ENTRA</sub>	Corriente ID	ΔH <sub>ENTRA</sub>	ΔT <sub>ENTRA</sub>
40.00	8.00	1	0.20	0.15	2	15.00	100.00
90.00	27.00	3	0.30	0.25	4	12.50	50.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
<b>SUMATORIAS</b>	<b>130.00</b>		<b>0.50</b>	<b>0.40</b>		<b>27.50</b>	<b>150.00</b>

**Tabla Combinación de Corrientes y Relación CP para Aproximación al Área Mínima**

$N_{CORRIENTES SALEN DEL PINCH} \geq N_{CORRIENTES ENTRAN AL PINCH}$

$2 \geq 2$

Corriente ID	CP <sub>SALE</sub>	CP <sub>ENTRA</sub>	Corriente ID	CP <sub>ENTRA</sub> /CP <sub>SALE</sub>	ΣCP <sub>ENTRA</sub> / ΣCP <sub>SALE</sub> =
3	0.30	0.25	4	0.83	0.80
1	0.20	0.15	2	0.75	
					No ajustar Carga Térmica en la Combinación para Aproximación Área Mínima
					Ajustar Carga Térmica en la Combinación para Aproximación Área Mínima

Figura 10. Tabla CP para el Diseño de la Red arriba del Punto Pinch

NUMERO MÍNIMO DE UNIDADES OBJETIVO ABAJO DEL PINCH							
Número Mínimo de Unidades Abajo del Pinch ( $U_{\min \text{ abajo Pinch}}$ )							
$U_{\min \text{ abajo Pinch}} = N - 1$							
N = Número de Servicios Auxiliares de Enfriamiento + Numero de Corrientes Abajo del Pinch							
N = 1 + 3 = 4							
$U_{\min \text{ abajo Pinch}} = 3 \text{ Unidades}$							
TABLA CP ABAJO DEL PINCH							
Tabla CP Abajo del Pinch							
N <sub>CORRIENTES SALEN DEL PINCH</sub> ≥ 2				N <sub>CORRIENTES ENTRAN AL PINCH</sub> ≥ 1			
$\Delta T_{\text{SALE}}$	$\Delta H_{\text{SALE}}$	Corriente ID	CP <sub>SALE</sub>	CP <sub>ENTRA</sub>	Corriente ID	$\Delta H_{\text{ENTRA}}$	$\Delta T_{\text{ENTRA}}$
110.00	16.50	2	0.15	0.20	1	24.00	120.00
70.00	17.50	4	0.25	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
0.00	0.00		0.00	0.00		0.00	0.00
SUMATORIAS	180.00	34.00	0.40	0.20		24.00	120.00
Tabla Combinación de Corrientes y Relación CP para Aproximación al Área Mínima							
N <sub>CORRIENTES SALEN DEL PINCH</sub> ≥ 2				N <sub>CORRIENTES ENTRAN AL PINCH</sub> ≥ 1			
Corriente ID	CP <sub>SALE</sub>	CP <sub>ENTRA</sub>	Corriente ID	CP <sub>ENTRA</sub> /CP <sub>SALE</sub>	$\Sigma \text{CP}_{\text{ENTRA}} / \Sigma \text{CP}_{\text{SALE}} = 0.50$		
4	0.25	0.20	1	0.80	Ajustar Carga Térmica en la Combinación para Aproximación Area Mínima		
2	0.15						

Figura 11. Tabla CP para el Diseño de la Red debajo del Punto Pinch

La hoja de cálculo, también determina el número mínimo de unidades arriba y debajo del punto Pinch (Figura 12). El diseño completo de la Red para el problema propuesto se muestra en la Figura 13; se hace notar que en la figura se encuentran incluidas columnas en donde se especifica el CP que la corriente utiliza en caso de que se divida esta para otro tipo de problemas.

La hoja con el diseño completo de la red muestra además las temperaturas a la entrada y salida de la unidad de intercambio de calor, carga térmica y denota las unidades que se encuentran abajo y debajo del punto Pinch.

Esta información es posteriormente utilizada para determinar el costo de la red diseñada tal y como se muestra en la Figura 14. En la Figura 14 se efectúa la comparación del costo capital obtenido en el diseño de la RIC contra los costos mínimos objetivos.



Tabla Problema o del Gráfico de las Curvas Compuestas, Determinar una Curva en donde se determine la  $\Delta T_{min}$  adecuada para la Red (Gráfico de Energía), Gráficos Energía vs Costo Capital – Costo Total, determinación y uso del Gráfico de las Fuerzas Impulsoras (DFP), Análisis de Energía Remanente Arriba y debajo del Pinch, determinar si las combinaciones de cambiadores de calor, durante el proceso de diseño arriba y debajo del Pinch, están alineadas mediante el uso de del gráfico  $\Delta T$  vs  $T_c$ , y principalmente, determinar el Número de Lazos en la red diseñada y eliminarlos sin provocar una violación de la  $\Delta T_{min}$  requerida así como dividir corrientes en caso de que no se pueda cumplir la regla del CP o del Número de Corrientes entrando o saliendo arriba o debajo del Pinch.

Mejoras que pueden adicionarse a SEDRIC son, incluir hojas de cálculo que incluyan el cálculo del coeficiente de transferencia de calor de película,  $h$ , considerando la caída de presión de la corriente  $\Delta P$  (Serna 2003a, Serna 2003b), (Serna 2011) que es importante en el diseño final del proceso; manejar el diseño con múltiples puntos Pinch (Trivedi, 1989) y considerar el cambio de fase de las corrientes (Westphalen 1999).

La siguiente versión se contempla el efectuar cálculos para Rediseño de redes de intercambiadores de calor (Tjoe, 1986).

## CONCLUSIONES

La hoja de cálculo presenta utilidad a los estudiantes para realizar diversos cálculos al mismo tiempo que se optimiza el aprendizaje de la Tecnología Pinch de calor en la solución de problemas que se encuentren en libros y artículos técnicos. Las distintas hojas de cálculo de SEDRIC permiten resolver problemas específicos sin necesidad de utilizar todas las hojas de cálculo.

Esta hoja de cálculo para el Diseño de Redes de Intercambiadores de Calor está basada en la literatura abierta de la Tecnología Pinch y permite la obtención de los objetivos mínimos de área, calentamiento y enfriamiento en redes de intercambio de calor y costo capital para compararlos posteriormente con los que se obtengan en la fase de diseño.

Se espera que esta hoja de cálculo llene el vacío que se encuentra entre la enseñanza de los fundamentos de la Tecnología Pinch de calor y su práctica a nivel industrial.

Se pone a disposición del lector, sin costo alguno, la hoja de cálculo SEDRIC en la página de la Academia Mexicana de Energía, A.C. en la liga <http://www.amexen.org> o enviando un correo electrónico al autor. Así mismo, se ofrece asesoría sobre el uso de la integración térmica de procesos utilizando la Tecnología Pinch de Calor.

## REFERENCIAS.

- Ahmad, S. and Linnhoff. B., "Overall Cost Targets for Heat Exchanger Networks", IChemE Annual Research Mtg, Bath, April, (1984).
- Hohmann, E.C. "Optimum Networks for Heat Exchange", PhD Thesis, Univ. of Southern California, June, (1971).
- Linnhoff, B. and Ahmad, S., "Cost Optimum Heat Exchanger Networks: I. Minimum Energy and Capital Using Simple Models for Capital Cost", Comp. and Chem. Eng., Vol. 14, No.7, pp 729-750, (1990).
- Linnhoff, B. and Flower J.R., "Synthesis of Heat Exchanger Networks", AIChE J., Vol. 24, No. 4, pp 633-642, July (1978).

- Linnhoff, B., and Hindmarsh, E., "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Network", Chem. Eng. Sci., Vol.38, No.5, pp 745-763. (1983).
- Linnhoff, B., et al., "User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy", Institution of Chemical Engineering, Rugby, U.K., (1982).
- Linnhoff, B., Vredeveld, D.R., "Pinch Technology has come of Age", Chem. Eng. Progr., Vol. 80, No. 7, pp 33-40, (1984).
- Serna-González, M. y Jiménez-Gutiérrez, A. "Área mínima de redes de intercambio de calor basada en las caídas de presión de las corrientes. I. Especificaciones uniformes de intercambiadores". Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol. 2, No. 3, 143-152 (2003)
- M. Serna-González y A. Jiménez-Gutiérrez. "Área mínima de redes de intercambio de calor basada en las caídas de presión de las corrientes. II. Especificaciones no-uniformes de intercambiadores". Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol. 2, No.3, 153-165 (2003)
- Smith, R. Chemical Process Design and Integration, Wiley, 2005.
- Tjoe, T.N., "Retrofit of Heat Exchanger Networks", PhD Thesis, University Manchester Inst. Sci. and Tech., U.K. (1986).
- Townsend, D.W. and Linnhoff, B.D., "Heat and Power Networks in Process Design", AIChE J., Vol. 29, No. 5, pp. 742-748, (1983).
- Townsend, D.W. and Linnhoff, B.D., "Surface Area Targets for Heat Exchanger Networks", IChemE Annual Research Mtg, Bath, April (1984).
- Trivedi, K.K., O'Neill, B.K., Roach, J.R., "Synthesis of heat exchanger networks featuring multiple pinch points", Vol. 13, Issue 3, March 1989, Pages 291-294, (1989)
- Westphalen, D.L., y Maciel, M.R. "Pinch analysis based on rigorous physical properties". Brazilian Journal of Chemical Engineering, 16(3), 279-284 (1999)