



Anexo X. Análisis detallado de las oportunidades de eficiencia energética en los sub-sectores seleccionados y PyMES

Este documento ha sido elaborado en cooperación con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee).

Apoyado por

European Union Energy Initiative

Partnership Dialogue Facility (EUEI PDF)



Y el Programa de Energía Sustentable en México

Implementado por Encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ)



c/o Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

P.O. Box 5180, 65726 Eschborn, Germany

info@euei-pdf.org

www.euei-pdf.org

Autores

Daniel Bouille, Claudio Carpio, Nicolás Di Sbrojavacca, Hilda Dubrovsky, Gustavo Nadal, Francisco Lallana, Raul Landaveri, Héctor Pistonesi, Jorge Plauchú, Marina Recalde, y Rafael Soria (Fundación Bariloche).

Con comentarios y contribuciones de:

Odón de Buen, Juan Ignacio Navarrete, Israel Jáuregui, Pedro Hernández, Flor Chávez, Oscar Ruiz e Ilse Ávalos (Conuee).

Ernesto Feilbogen, Ana Córdova, Daniela Méndez, Fairuz Loutfi, Veronica Gómez y Jorge Atala (GIZ México).

Coordinación editorial: Ángel Azamar y Daniela Méndez (GIZ México).

Ciudad de México, septiembre 2018

El Motor de Diálogo y Cooperación (EUEI PDF) es un instrumento de la EU Energy Initiative (EU EI). EUEI PDF actualmente recibe contribuciones de la Comisión Europea, Alemania, Austria, Finlandia, Italia, los Países Bajos y Suecia.



1. Introducción

El resultado de la actividad de la Propuesta de instrumentos para facilitar medidas de eficiencia energética en el sector industrial de México, el cual responde a la Hoja de Ruta en materia de eficiencia energética de la *Estrategia de Transición para promover el uso de Tecnologías y combustibles más Limpios* (Estrategia). En dicho marco, se fija como horizonte el año 2050, pero para los efectos de esta hoja de ruta, se considera el horizonte de mediano plazo (2030). Si bien, dicho documento fija metas especialmente concentradas en la energía eléctrica, se considera que las metas del escenario de intervención son una referencia para las reducciones de consumo energético esperadas en el sector industria¹.

Las hipótesis indicadas en el documento de referencia indican una disminución de la intensidad energética de la industria (medida como cociente entre el Consumo Final Energético y el Valor Agregado Industrial) del 1.9% anual promedio, frente a una reducción del escenario con base del 1.7% anual promedio. Estos valores implican una reducción de la intensidad energética al año horizonte (2030) del 3%, con relación al escenario de base². De acuerdo con los datos del mismo reporte, en el escenario de eficiencia el consumo final de energía del sector industria crecería el 11.1% al 2030³.

En consecuencia, las medidas que se identifiquen y las prospectivas que resulten a partir de los estudios de los sectores seleccionados permitirán determinar cómo contribuye esta propuesta a las metas planteadas en la Estrategia.

Este anexo corresponde al análisis completo de cada uno de los sub-sectores industriales analizados por el equipo consultor de Fundación Bariloche: Hierro y Acero, Cemento, Vidrio, Química, Azúcar, Papel y PyMES.⁴

1 Sin embargo, la forma de presentación de la información impide tener transparencia y claridad sobre los valores y las hipótesis subyacentes en el escenario de base y el escenario de intervención. En efecto, en diferentes partes del documento, los valores para el mismo concepto difieren o son presentados de forma tal que resulta casi imposible cuantificarlos.

2 La intensidad industrial de referencia (2014) es 337,7kJ. CEF/VAI (precios de 2008).

3 Estos datos se encuentran en la Tabla 20. Consumo energético final con acciones de eficiencia energética, 2016-2030 de la Estrategia. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/182202/20161110_1300h_Estrategia_CCTE-1.pdf

4 Dado que la información identificada de los diferentes sectores no es homogénea ni tiene el mismo alcance y profundidad, lo presentado en este Anexo sobre cada sector responde a esas restricciones.

2. Potenciales de ahorro en la industria de hierro y acero

Caracterización de los procesos industriales del sector hierro y acero, e intensidades energéticas típicas en el mundo.

La industria siderúrgica es bastante compleja, varios procesos industriales son necesarios para convertir el mineral de hierro en productos terminados de acero. Las subsecciones siguientes caracterizan a los principales procesos: preparación de materias primas, procesos de reducción del hierro, siderurgia, transformaciones físico-mecánicas y procesos adicionales presentes en plantas industriales siderúrgicas. Algunas referencias que presentan estos procesos son Do Santos (2011), EPE (2009), Worrel et al. (2008).

2.1.

Preparación de materias primas

La siguiente Tabla caracteriza los procesos industriales de preparación de materias primas en la industria siderúrgica.

Tabla 1: Procesos industriales de preparación de materias primas en la industria siderúrgica.

Etapas	Procesos	Objetivo	Entrada	Salida
Preparación de materias primas	Mezclado de mineral de hierro.	Mezclar diferentes tipos de minerales de hierro: Hematita (Fe_2O_3), Magnetita (Fe_3O_4), Goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n(\text{H}_2\text{O})$), Siderita (FeCO_3).	Mineral de hierro.	Mezcla de mineral de hierro.
	Planta de sinterización	Aglomerar/compactar finos de mineral de hierro (polvo, lodo y residuos), mediante proceso térmico de semi-fusión (a una temperatura inferior a la de fusión). Se produce sinter (finos de mineral de hierro + finos de fundente(cal)+ finos de coque o carbón + humedad). Sinter son elementos porosos de determinado tamaño y propiedades mecánicas, que alimentan al alto horno y que se acoplan bien en la carga.	Finos de mineral de hierro, finos de fundente y finos de carbón/coque.	Sinter.
	Planta peletizadora.	Aglomerar finos de mineral de hierro utilizando aglutinante y humedad. Produciendo pelotas/bolas del mineral que se acoplan bien en la carga, tienen alto contenido de hierro, y alta resistencia mecánica. Proceso alternativo a la sinterización.	Finos de mineral de hierro.	Pelotas de mineral de hierro, con alto contenido de hierro.
	Mezclado de carbón.	Mezcla de diferentes tipos de carbón.		Mezcla de carbón.
	Planta coquizadora del carbón mineral.	Ajustar el tamaño de grano, retirar la humedad, vaporizar elementos volátiles del carbón, retirar parte de la ceniza. Se concentra el contenido de carbono fijo. Se	Carbón mineral metalúrgico o carbón vegetal.	Coque de carbón mineral (coque metalúrgico) Gas de

Etapas	Procesos	Objetivo	Entrada	Salida
Preparación de materias primas		calienta el carbón mineral a 1,300°C en ausencia de aire.		coquería. Alquitrán.
	Pulverización de finos de carbón mineral.	Ajustar el tamaño de grano de los finos de carbón mineral para inyección en el alto horno.		Finos de carbón mineral.
	Preparación de carbón vegetal.	Compactar y ajustar el tamaño de grano del carbón vegetal que será cargado en el alto horno.		Finos de carbón vegetal.
	Preparación de finos de fundente.	Ajustar el tamaño de grano de los finos de fundente (cal) que será usado en la sinterización.	Fundentes.	Finos de fundente.
	Preparación de "gruesos" de fundente.	Ajustar el tamaño de grano de los "gruesos" de fundente (cal) para carga del alto horno.		Gruesos de fundente.
	Plantas de calcinación: producción dedicada de cal.	Reducir el CaCO ₃ (calcáreo) para CaO (cal).		Fundentes.
	Corte y compactación de chatarra.	Ajuste de la densidad de la chatarra que se cargará en el alto horno.	Chatarra ferrosa para acerías.	Chatarra homogénea.
	Reforma de gas natural.	El gas natural es transformado en gas reductor (<i>Reforming</i>).	Gas natural.	Gas natural reductor para reducción directa.

2.2.

Procesos de reducción del hierro.

La Tabla 2 caracteriza los procesos industriales de reducción del hierro en la industria siderúrgica.

Tabla 2: Procesos de reducción del hierro.

Etapas	Procesos	Objetivo	Entrada	Salida
Reducción del mineral de hierro ($2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{C} = 4\text{Fe} + 3\text{CO}_2$)	Alto horno/ mini alto horno	Reducción del mineral de hierro por el carbono contenido en el coque metalúrgico (a partir de carbón mineral o vegetal) usando un reactor termoquímico. Producto con aprox. 3% de carbón.	Mineral de hierro, coque metalúrgico, cal, sinter, pelotas	Arrabio, gas de alto horno
	Reducción directa	Reducción del mineral de hierro por el carbono contenido en el gas natural reductor . Producto con aprox. 1% de carbón	Mineral de hierro granulado, gas natural reductor	Fierro-esponja (<i>direct reduced iron -DRI</i>)
	Fusión reductora	Reducción del mineral de hierro por el carbono contenido en el carbón mineral usando un reactor termoquímico. Producto con aprox. 3% de carbón. Hay pocas plantas en el mundo, se la considera comercial desde 2015.	Finos o concentrados (granulados) de mineral de hierro, carbón mineral.	Fierro-esponja (<i>direct reduced iron -DRI</i>)

2.3.

Acería.

La Tabla 3 caracteriza los procesos industriales de acería en la industria siderúrgica.

Tabla 3: Procesos de acería.

Etapas	Procesos	Objetivo	Entrada	Salida
Refinación (Acería) - Metalurgia primaria	Horno de Arco Eléctrico (EAF).	Producir acero crudo. Usado en plantas semi-integradas. El horno utiliza arcos eléctricos, que se forman entre el acero y los electrodos, como fuente de calor para que la carga sea fundida. Durante la quema del material se inyecta oxígeno para fundir el material sólido, y para que el carbono, silicio y fósforo sean oxidados. Se inyecta cal (CaO) y MgO, (también llamado magnesio) para producir escoria.	Carga sólida (Fierro- esponja, arrabio y chatarra), y, eventualmente granulados para reducción directa. Cal y magnesio para formar escoria.	Acero líquido.
	Horno Básico de Oxígeno (BOF) (convertor Linz-Donawitz -LD).	Usado en plantas integradas. El fierro- esponja líquido, y algo de chatarra, se cargan; luego, se inyecta oxígeno a presión para reducir el contenido de carbono, silicio y fósforo, transformándolo a acero. Las reacciones exotérmicas producen energía térmica suficiente para mantener, o elevar, la temperatura del acero líquido. Se inyecta cal para que reaccione con los óxidos y forme escoria.	Carga mixta (fierro esponja líquido/ arrabio líquido + chatarra). Oxígeno a alta presión. Cal para formar escoria.	Acero líquido, escoria.
	Horno de energía optimizada (EOF).	El horno EOF es un convertor BOF (Horno básico a oxígeno) que basa su fusión y refino en la inyección de soplos de oxígeno en lugares estratégicos del horno. Los soplos son combinados, parte por ventoleras que están sumergidas en la colada (15%), donde todo el oxígeno inyectado es aprovechado para generar mucha oxidación, y de esta forma mucha energía. Otra forma de inyección de oxígeno es a través de lanzas supersónicas (LSS) (28%), donde el oxígeno es inyectado a la velocidad del sonido, teniendo gran penetración en la colada, provocando gran turbulencia y liberando gran cantidad de energía, en gran medida absorbida por la colada. El restante del calor proviene de la inyección en quemadores (57%), que pulverizan gas de arrastre, aceite de alta viscosidad con alto poder calórico. Esta última es la fuente que más inyecta oxígeno a la colada. Su principal atractivo es el uso de arrabio líquido en baja escala (50% de la carga), cargado exteriormente, y chatarra pre-calentada usando la energía de la corrida anterior (calor sensible de gas).	Carga mixta (arrabio líquido (50%) + arrabio sólido (5%)+chatarra precalentada 1,350°C (45%)). Oxígeno a alta presión. Cal para formar escoria.	
	Proceso Siemens- Martin (<i>Open-Hearth</i> OH).	Proceso muy poco utilizado a nivel mundial.	Carga sólida.	Acero líquido.

Etapas	Procesos	Objetivo	Entrada	Salida
Refinación (Acería) - Metalurgia secundaria	Horno panela.	Refinación del acero líquido, adición de elementos aleantes, desulfurización, desgasificación.	Acero líquido.	Acero líquido refinado. Usualmente llamado "acero"
	Horno químico.		Acero líquido	

2.4.

Transformaciones físico-mecánicas.

La Tabla 4 caracteriza los procesos de transformación físico-mecánicas en la industria siderúrgica.

Tabla 4: Transformaciones físico-mecánicas.

Etapas	Procesos	Objetivo	Entrada	Salida
Colado	Colado (placas).	Producir placas de acero refinado. Depósito de acero líquido y enfriamiento controlado en un molde (molde sin fin para el colado continuo), en el cual se solidifica con varias formas.	Acero	Placas (acero crudo o bruto).
	Colado (bloques y tarugos).	Producir bloques y tarugos de acero refinado.	Acero	Bloques y tarugos (acero crudo o bruto).
Laminación y acabados	Laminación en caliente de elementos planos y largos.	Producir en caliente varios productos laminados. Perfecciona las características del acero semi-acabado luego del colado, adecuando sus dimensiones a las de las diversas industrias. Se calienta a 1,100 – 1,150°C, para permitir la deformación físico-mecánica. Espesor hasta 1.2mm.	Placas	Placas gruesas, placas finas en caliente, varilla, barras, perfiles, alambre y tubos sin costura.
	Laminación en frío de elementos planos y cortos.	Producir en frío chapas finas. Espesores menores a 1,2 mm. Se realiza a temperatura ambiente. Mejores acabados superficiales.	Placas	Placa fina <2mm.
	Recubrimiento de elementos planos.	Recubrimiento con estaño, con cromo, con níquel.	Placas	Estañados, cromados y galvanizados, usados en industria automotriz, línea blanca, construcción.
	Trefilado de elementos largos.	Producción en frío de alambres y otros derivados.	Bloques y tarugos	Alambre, etc.

2.5.

Procesos adicionales.

La Tabla 5 caracteriza los procesos adicionales que se encuentran en plantas siderúrgicas.

Tabla 5: Procesos adicionales en plantas siderúrgicas.

Etapas	Procesos	Objetivo	Entrada	Salida
--------	----------	----------	---------	--------

Procesos adicionales	Subproductos de la planta coquizadora.	Producir químicos a partir del carbón.	Carbón	Químicos
	Central térmica.	Producir electricidad usando los gases derivados en la coquería y alto horno.	Gases de coquería y alto horno.	Electricidad
	Sistemas de utilidad y movimiento interno.			
	Planta productora de oxígeno.	Producir oxígeno para utilización en la acería. Generalmente son instalaciones sub-contratadas cerca de la planta.	Aire	Oxígeno

2.6.

Tipos de plantas siderúrgicas.

En la industria siderúrgica mundial se puede identificar varias rutas tecnológicas o tipologías de plantas de producción de acero y productos terminados. Las principales tipologías se muestran en la Tabla 6. Este estudio, para el caso mexicano, se enfocará en las plantas integradas y semi-integradas descritas a continuación.

Tabla 6: Tipos de plantas siderúrgicas

Tipo de planta	Preparación material	Reducción	Refino (Acería)	Transformaciones físico-mecánicas	Acabados
Integrada	Planta coquizadora, planta peletizadora, planta de sinter.	Alto horno.	BOF o EOF	Colado y laminación.	Recubrimientos
Integrada	Planta peletizadora, planta de sinter.	Reducción directa.	EAF	Colado y laminación.	Recubrimientos
Semi-integrada	X	X	100% chatarra --> EAF	Colado y laminación.	Recubrimientos
Transformaciones	X	X	X	Laminación (en caliente y en frío).	Recubrimientos
Semi-Integrada (productores de básicos-arrabio).	Planta coquizadora, planta peletizadora, planta de sinter.	Alto horno --> Arrabio.	X	X	X
Semi-Integrada (productores de básicos-ferro esponja).	Planta peletizadora, planta de sinter.	Reducción directa --->ferro esponja.	X	X	X
Acabados/ recubrimientos.	X	X	X	X	Cromado, etc.

2.7.

Intensidades energéticas por proceso industrial a nivel mundial.

Esta subsección considera estimaciones de World Steel Association compiladas por Worrel et al. (2008) para los consumos unitarios (o consumos específicos) de energía, correspondientes a cada ruta tecnológica, por etapa del proceso, expresadas en GJ por tonelada de acero crudo⁵.

Estos consumos energéticos unitarios representan consumos medios estimados con base en muestreos en plantas siderúrgicas representativas con altas eficiencias energéticas, de cada ruta tecnológica, en el parque siderúrgico mundial. En este sentido, los consumos energéticos unitarios también son comúnmente denominados en la literatura especializada como “intensidad energética” o “consumo específico de energía”.

2.8.

Planta integrada: alto horno + convertor a oxígeno LD (BOF o EOF) + colado continuo + laminación + acabados.

La Tabla 7 muestra valores medios de intensidad energética para plantas integradas: preparación de materiales + alto horno + convertor a oxígeno LD (BOF o EOF) + colado continuo + laminación + acabados. La Tabla 8 muestra la intensidad energética para este tipo de plantas si se aplica la técnica de “thin slab casting”, que consiste en la integración del colado continuo con la laminación en caliente. Los valores son expresados en GJ/t de acero crudo (AC).

Tabla 7: Intensidad energética de planta integrada: alto horno + convertor a oxígeno LD (BOF o EOF) + colado continuo + laminación +acabados (GJ/tAC).

Fuente de energía	Planta coquizadora	Planta de sinter	Alto horno a coque	Acería - convertor a oxígeno	Acería -refino	Colado continuo	Laminación en caliente			Laminación en frío	Acabados	Consumo unitario por energético, (basado en laminación en barras)
	Coque	Sinter	Arrabio	Acero	Acero	Lingotes	Planos (bobina)	Largos (barras)	Alambre			
Combustible	0.6	1.9	11.4	-0.7	0.0	0.05	1.3	1.6	1.7	0.1	0.7	15.7
Vapor	0.1	-0.2	0.4	-0.2	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.5
Electricidad	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.05	0.3	0.2	0.4	0.3	0.1	1.3
Oxígeno	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6
Intensidad energética total	0.8	1.9	12.1	-0.4	0.1	0.1	1.6	1.8	2.1	0.5	1.1	18.0

Tabla 8: Intensidad energética de planta integrada: alto horno + convertor a oxígeno LD (BOF o EOF) + “thin slab casting” (GJ/tAC).

⁵ El acero crudo es también llamado acero bruto. El acero líquido que es usado para el colado y producción de acero crudo eventualmente también puede ser cuantificado como acero crudo.

Fuente de energía	Planta coquizadora	Sinterización	Alto horno a coque	Acería - convertidor a oxígeno	Acería - refino	Colado continuo y laminación (thin slab casting)	Consumo por energético
	Coque	Sínter	Arrabio	Acero	Acero		
Combustible	0.6	1.9	11.4	-0.7	0.0	0.1	13.3
Vapor	0.1	-0.2	0.4	-0.2	0.0	0	0.1
Electricidad	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.8
Oxígeno	0.0	0.0	0.2	0.4	0.0	0	0.6
Intensidad energética total	0.8	1.9	12.1	-0.4	0.1	0.3	14.8

2.9.

Planta integrada: reducción directa + horno arco eléctrico (EAF) + colado continuo + laminación + acabados.

La Tabla 9 muestra valores medios de intensidad energética para plantas integradas: preparación de materiales + reducción directa + horno arco eléctrico (EAF) + colado continuo + laminación + acabados. La Tabla 10 muestra la intensidad energética para este tipo de plantas si se aplica la técnica de “thin slab casting”, que consiste en la integración del colado continuo con la laminación en caliente. Los valores son expresados en GJ/ t de acero crudo (AC).

Tabla 9: Intensidad energética de planta integrada: preparación de materiales + reducción directa + horno arco eléctrico (EAF)+ colado continuo + laminación +acabados (GJ/tAC).

Fuente de energía	Planta de sinter	Plata peletizadora	Reducción directa	Acería -horno de arco eléctrico	Colado continuo	Laminación en caliente			Laminación en frío	Acabados	Consumo por energético. basado en
	Sínter	Pelets	Fierro esponja	Acero	Lingotes	Planos (bobina)	Largos (barras)	Alambre			
Combustible	2.0	0.5	12.9	0.6	0.03	1.3	1.5	1.7	0.1	0.7	18.3
Vapor	-0.2	0.0	0.0	0.0	0.03	0.0			0.1	0.3	0.2
Electricidad	0.2	0.1	-1.2	1.6	0.00	0.3	0.3	0.4	0.2	0.1	1.3
Oxígeno	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0					0.3
Intensidad energética total	2.0	0.6	11.7	2.5	0.1	1.6	1.8	2.1	0.4	1.1	20.2

Tabla 10: Intensidad energética de planta integrada: preparación de materiales + reducción directa + horno arco eléctrico (EAF)+ “thin slab casting” (GJ/tAC).

Fuente de energía	Planta de sinter	Plata peletizadora	Reducción directa	Acería -horno de arco eléctrico	Colado continuo y laminación (<i>thin slab casting</i>)	Consumo por energético
	Sinter	Pelets	Fierro esponja	Acero		
Combustible	2.0	0.5	12.9	0.6	0.1	16.1
Vapor	-0.2	0.0	0.0	0.0	0	-0.2
Electricidad	0.2	0.1	-1.2	1.6	0.1	0.8
Oxígeno	0.0	0.0	0.0	0.3	0	0.3
Intensidad energética total	2.0	0.6	11.7	2.5	0.2	17.0

2.10.

Planta semi-integrada: producción de acero con horno arco eléctrico (EAF) a partir de chatarra, arrabio y fierro esponja.

La Tabla 11 muestra valores medios de intensidad energética para plantas semi-integradas: producción de acero con horno arco eléctrico (EAF) a partir de chatarra, arrabio y fierro esponja. La Tabla 12 muestra la intensidad energética para este tipo de plantas si se aplica la técnica de “*thin slab casting*”, que consiste en la integración del colado continuo con la laminación en caliente. Los valores son expresados en GJ/ t de acero crudo (AC)

Tabla 11: Intensidad energética de plantas semi-integradas: producción de acero con horno arco eléctrico (EAF) a partir de chatarra, arrabio y fierro esponja (GJ/tAC).

Fuente de energía	Acería -horno de arco eléctrico	Colado continuo	Laminación en caliente			Consumo por energético. basado en laminación en barras
	Acero	Lingotes	Planos (bobina)	Largos (barras)	Alambre	
Combustible	0.6	0.03	1.3	1.5	1.7	2.1
Vapor	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
Electricidad	1.5	0.03	0.3	0.3	0.4	1.8
Oxígeno	0.3	0.0	0.0	0.0		0.3
Intensidad energética total	2.4	0.1	1.6	1.8	2.1	4.3

Tabla 12: Intensidad energética de plantas semi-integradas: producción de acero con horno arco eléctrico (EAF) a partir de chatarra, arrabio y hierro esponja con “thin slab casting” (GJ/tAC).

Fuente de energía	Acería - conversor a oxígeno	Colado y Laminación (thin slab casting)	Consumo por energético (GJ/t acero)
	Acero		
Combustible	0.6	0.1	0.7
Vapor	0.0	0	0.0
Electricidad	1.5	0.1	1.6
Oxígeno	0.3	0	0.3
Intensidad energética total.	2.4	0.2	2.6

2.11.

Intensidad energética a nivel mundial.

Según World Steel Association (2016a) La intensidad energética media a nivel mundial de la industria siderúrgica en 2015 fue 20.3 GJ/t de acero crudo (AC) (véase Tabla 13).

Tabla 13: Intensidad energética media a nivel mundial de la industria siderúrgica 2009-2015

		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Consumo específico mundo	GJ/tAC	20.1	20.7	19.6	19.6	20.1	20.2	20.3

2.12.

Intensidad energética en los procesos industriales en el sector hierro y acero en México.

Se destaca que a pesar de que el sector siderúrgico es el de mayor consumo energético en el sector industrial de México sus índices de intensidad energética y su factor de emisión de CO₂ están abajo del promedio mundial reportado por World Steel Association. Únicamente se considera al CO₂ porque es el principal gas generado en esta industria; la emisión CH₄ y NO_x es mínima. El factor de emisión de CO₂ mundial medio de la industria siderúrgica mundial en 2016 fue de 1.8 t CO₂/t de acero crudo (AC) y su intensidad energética es de 20.3 GJ/t de AC (World Steel Association 2017).

Por otro lado, para México estos indicadores en el 2016 fueron de 1.38 t CO₂/t de AC y 12.38 GJ/t de AC, respectivamente (CANACERO, 2017). Por tanto, el sector siderúrgico en México ya es muy eficiente.

2.13.

Tipo de plantas de producción de acero en México.

Este estudio considera tres tipos de rutas o plantas industriales para la producción de acero crudo y productos terminados de acero en México.

1. Planta integrada: Preparación de materia prima + alto horno + convertor a oxígeno + colado + laminación + acabados.
2. Planta integrada: Preparación de materia prima + reducción directa + horno de arco eléctrico+ colado +laminación +acabados.
3. Planta semi-integrada(mini-mills): Acería horno de arco eléctrico a partir de chatarra, arrabio y fierro esponja + colado +laminación + acabados.

Los procesos de la ruta 2 y 3 usan horno de arco eléctrico, por tanto, su producción de acero es llamada “acero eléctrico”. La producción de acero en la ruta 1 recibe el nombre de “acero no eléctrico”.

2.14.

Empresas en el sector hierro y acero en México, capacidad instalada y perfil de producción.

2.14.1Productores de acero y productos terminados.

La

Tabla 14 presenta las principales empresas del sector hierro y acero en México y su perfil de producción, según CANACERO (2017).

Tabla 14: Perfil de producción de las principales empresas que producen acero crudo y productos derivados o finales.

	Productos terminados (colado y laminación)				Productos derivados	
	Colado (Semi-productos o acero crudo)	Laminación- Planos	Laminación- Largos	Tubos sin	Trefilado	Recubrimiento

Empresa	Capacidad (1,000 t AC/año)	Planchón	Palanquilla	Barra redonda para tubos	Placa	Lám. Caliente	Lám. Fría	Varilla	Alambrón	Perfil Ligero	Perfil Estructural	Barras		Alambre & Derivados	Lám. Galvanizada	Cromada & Estañada
ArcelorMittal	7,531	x	x	x				x	x				x			
AHMSA	5,500	x			x	X	x				X					x
Deacero	4,500		x					x	x	x	X	x		x		
Termium México	4,010	x	x	x	x	X	x	x	x	x	X	x	x		x	
Simec	2,878		x					x	x	x	X	x				
Gerdau Corsa	1,850		x					x		x	X					
Tyasa	1,700		x					x	x	x		x				
Tenaris TAMSA	1,200												x			
Otros	431	x	x		x	X		x	x	x	X	x			x	x
Total	29,600															

2.14.2 Laminadores

La Tabla 15 muestra las empresas laminadoras en México, según CANACERO (2017).

Tabla 15: Laminadores en México

	Capacidad (1,000 t/año)	Laminación en caliente y frío					Laminación y recubrimiento	Laminación de inox.
		Chapas & Flejes	Varilla	Lam. Desplegable	Perfil ligero	Perfil estructural	Lám, Galvanizada	Inoxidables
Posco MPPC	900						x	
Posco México	560						x	
Sigosa	400		x		x			
Outokumpu Merinox	260							x
AB Tube	120				x	X		
Zincacero- Villacero	100				x	X		
Ladesa	48						x	
Signode-México	36			x				
Trefilados Inoxidables de México	10	X						x
Total	2,434							

2.14.3 Plantas de transformación - productores de tubería (en caliente).

La Tabla 16 presenta los laminadores en caliente que producen tubo sin costura en México, según CANACERO (2017).

Tabla 16: Productores de tubo sin costura en México.

Productores de tubería		Laminadores en caliente - tubo sin costura									
		Diámetro < 115 mm					Diámetro > 115 mm				
		OCTG	Mecánico	Estructural	Conduit	Otros	OCTG	Mecánico	Estructural	Conduit	Otros
Capacidad (1,000 t)											
Tubacero	500						x	x	x	x	x
Procarsa	400	x		x	x	x	x		x	x	x
Pytco	300	x		x	x	x	x		x	x	x
Grupo Forza Steel	260	x	x	x	x		x	x	x	x	x
Tubería Laguna	250						x		x		x
Tubería Nacional -Villacero	156	x	x	x	x	x					
Conduit	100	x	x	x	x		x	x	x	x	
T-H Tubería Helicoidal -Villacero	90		x	x	x	x		x	x	x	x
Tumex	80						x		x		x
Tubesa	80								x		x
Peasa	80		x		x	x					
Fischer Mexicana	40		x			x		x			x
Precitubo	12		x			x					
Cominox	5		x	x		x		x	x		x
Idasa Internacional de Aceros	4		x	x		x		x	x		x
Total	2,357										

2.14.4 Productores de Básicos y Fundidores

La Tabla 17 indica otros productores de básicos y fundidores en México, según CANACERO (2017).

Tabla 17: Productores de básicos y fundidores en México.

Productores de Básicos y Fundidores	Productos
Autlán	Ferroaleaciones
Graftech Commercial de México	Electrodos de grafito
Fundición y Mecánica Susano Solís	Piezas fundidas
Frisa Forjados	Piezas fundidas

2.15.

Producción hierro y acero en México.

La Tabla 18 muestra la producción de productos siderúrgicos básicos (acero crudo, arrabio, fierro esponja), por proceso. La Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21 muestran la producción de productos terminados laminados (planos y largos), tubos sin costura, piezas fundidas, productos siderúrgicos derivados y ferroaleaciones. Estos datos fueron tomados de SGM (2016).

Tabla 18: Productos siderúrgicos básicos (1,000 t).

		2011	2012	2013	2014	2015	2016
Acero		18,110	18,073	18,242	18,930	18,228	18,800
	Reducción Directa + Horno Arco Eléctrico	13,044	13,084	12,879	13,251	12,814	13,160
	Alto Horno + Convertidor al Oxígeno	5,066	4,989	5,363	5,679	5,414	5,640
Arrabio (Alto Horno)		4,609	4,611	4,911	5,115	4,575	n.d.
Fierro Esponja (Reducción Directa)		5,854	5,586	6,100	5,979	5,499	n.d.
Total productos básicos		28,573	28,270	29,253	30,024	28,302	n.d.

Tabla 19: Productos terminados laminados planos y no planos, tubos sin costura y piezas (1,000t).

		2011	2012	2013	2014	2015
Planchón		2,484	2,106	2,306	2,429	1,729
Laminados		15,738	16,092	16,357	17,742	1,754
	Planos	7,546	7,440	7,627	8,594	8,596
	No planos (largos)	7,415	7,763	7,745	8,084	8,208
	Tubos sin costura	776	889	985	1,064	736

	Piezas	1	-	-	-	-
	Total laminados	15,738	16,092	16,357	17,742	17,540
	Total productos terminados	18,222	18,198	18,663	20,171	19,269

Tabla 20: Productos siderúrgicos derivados (1,000 t).

	2011	2012	2013	2014	2015
Tubo con costura	900	973	939	1,006	1,005
Alambre	2,099	2,004	1,838	1,947	1,916
Lámina Galvanizada	1,752	1,603	1,952	2,339	1,901
Estañado (hojalata)	73	58	72	73	76
Lámina cromada	44	34	40	51	57
Total productos derivados	4,868	4,672	4,841	5,416	4,955

Tabla 21: Ferroaleaciones (toneladas).

	2011	2012	2013	2014	2015
Ferromagnesio	73,683	61,845	60,675	67,507	67,919
Silicomanganeso	139,048	161,221	157,855	164,852	139,361
Total ferroaleaciones	212,731	223,066	218,530	232,359	207,280

2.16.

Consumo de energía en el sector hierro y acero en México (PJ).

Según el Balance Nacional de Energía de México (SENER 2016), el consumo de energía del sector hierro y acero, por tipo de energía final y total, se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 22: Consumo energético del sector hierro y acero en México, por energía final (PJ).

PJ	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Total	217.9	184.2	167.4	179.8	193.7	195.9	204.1	193.5	193.7	162.2	197.2	204.5	208.1	208.1	212.3	222.3	230.9
Total coque	79.48	64.92	50.60	55.57	55.15	51.07	53.44	51.45	53.66	41.88	64.58	63.58	66.81	67.39	69.59	60.35	n.d
Coque de carbón	72.41	62.40	46.70	49.96	49.99	47.50	47.63	45.44	47.72	38.30	62.82	61.75	64.34	65.13	68.70	58.64	n.d
Coque de petróleo	7.07	2.53	3.90	5.61	5.16	3.57	5.81	6.01	5.94	3.58	1.76	1.82	2.47	2.26	0.89	1.71	n.d
Total de petrolíferos	17.76	14.22	11.49	11.68	13.28	10.52	9.27	9.43	8.87	8.15	6.40	5.32	5.40	3.82	2.94	2.85	n.d
Gas licuado	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	n.d
Querosenos	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	n.d

Diesel	1.22	1.07	0.96	0.96	1.07	0.93	0.97	0.90	0.88	0.61	0.78	0.84	0.88	0.88	1.10	1.03	n.d
Combustóleo	16.54	13.14	10.52	10.71	12.21	9.58	8.30	8.53	7.98	7.53	5.62	4.46	4.51	2.93	1.83	1.81	n.d
Gas seco	93.77	83.07	84.61	93.75	100.45	109.79	115.95	106.14	103.95	86.03	104.40	113.86	112.58	115.28	119.90	139.92	n.d
Electricidad	26.9	22.0	20.7	18.9	24.8	24.5	25.4	26.5	27.4	26.1	21.8	21.8	23.3	21.6	19.9	19.2	n.d

Fuente: SENER – Balance Nacional de Energía – 2016.

2.17.

Intensidad energética del sector hierro y acero en México

La Tabla siguiente presenta la evolución de la intensidad energética del sector hierro y acero de México.

Tabla 23: Intensidad energética del sector hierro y acero de México (GJ/tAC).

Intensidad [GJ/tAC]	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Consumo total energía / Producción total acero crudo (AC)	13.9	13.8	11.9	11.9	11.6	12.1	12.4	11.0	11.3	11.5	11.7	11.3	11.5	11.4	11.2	12.2	12.3

Fuente: Elaboración propia.

Gran parte del consumo de gas natural se debe a un consumo como materia prima debido a que varias plantas usan el proceso de reducción directa. En el proceso de reducción directa se facilita la captura de CO₂, que a su vez es vendido para otras industrias, como la cervecera. Otra parte del consumo de gas natural (afectado por la volatilidad del precio global) se debe al uso en autogeneración eléctrica, para provisión en las horas pico. La autogeneración ha crecido mucho en los últimos cinco años en México, lo que ha contribuido a bajar la intensidad energética, inclusive por debajo del promedio nacional del parque generador térmico.

Es evidente que no toda la energía consumida es para proceso, también es para servicios de generación eléctrica, generación de oxígeno, producción de cal dentro de las plantas, etc.

El consumo eléctrico varía según la planta y sus procesos, y depende del alcance del proceso (si va hasta la producción de palanquilla, de planchón, de laminado, tubo sin/con costura, galvanizado y pintado, etc.). Por esta razón, la de intensidad energética reportada por este sector industrial es un valor medio para todo el sector hierro y acero en México.

En las estadísticas se contabiliza la intensidad energética en función de la producción de acero crudo –AC (también llamado acero bruto, o, entendido como el acero líquido que luego es colado para producir acero crudo). No se considera la importación de acero crudo.

No es posible comparar a todas las plantas bajo una misma métrica, cada planta es un caso. Por estas razones se usan valores medios de intensidad energética según el tipo de planta o ruta tecnológica y la variedad de sus procesos. La intensidad energética del sector, a su vez, es una media, calculado como la relación entre consumo total de energía del sector y la producción total de acero crudo nacional.

2.18

Factor de emisión del sector hierro y acero en México

El factor de emisión de CO₂ del sector hierro y acero en México en 2016 por tonelada de acero crudo producido equivale a 1.38 t CO₂ / tAC, según CANACERO (2017).

Análisis bottom-up de producción, consumo de energía y emisión de gases de efecto invernadero

La Tabla 24 muestra la reconstrucción bottom-up del consumo energético, emisión de CO₂ y producción para el sector hierro y acero en México, por empresa y por planta industrial de producción de acero crudo. Esta tabla fue elaborada considerando la capacidad productiva instalada por empresa según CANACERO (2017). Cuando hubo información específica por empresa a partir de informes anuales de gestión y sustentabilidad/responsabilidad social, como en el caso de ArcelorMittal, AHMSA, Ternium y Tenaris, se consideró valores oficiales de producción anual en 2015/2016 y factor de emisión 2015/2016. Las páginas web de todas las empresas ofrecen pocos detalles del proceso productivo, sin embargo, fue posible extraer capacidad instalada por planta, perfil de producción de la planta e información cualitativa sobre implementación de medidas de eficiencia energética. Los valores de intensidad energética, excepto para ArcelorMittal y AHMSA, corresponden a valores medios estimados por los consultores en función de valores medios de intensidad energética a nivel internacional. Justamente se verificó que los valores de intensidad energética en México, inclusive por planta, son menores a la media mundial, lo cual muestra que el sector hierro y acero en México es bastante eficiente en comparación a países como China, India y Brasil, entre otros.

Cuando no se contó con datos de producción anual, se lo estimó usando una tasa de participación en el mercado según Secretaría de Economía de México (2012) y la producción de acero crudo, por ruta tecnológica, según SGM (2016).

El factor de emisión, excepto para ArcelorMittal y AHMSA que presentaron datos propios, corresponde a un factor de emisión medio según el tipo de proceso.

La Tabla 25 resume los principales indicadores del sector hierro y acero en México, como resultado del ejercicio de reconstrucción bottom-up de consumo de energía, emisión de CO₂ y producción de acero crudo. Los resultados muestran coherencia con los valores nacionales declarados por CANACERO (2016, 2017) y SGM (2016). Los resultados están muy próximos a los datos reales, mostrando un error despreciable a nivel nacional. Sin embargo, los consultores resaltamos que los datos usados para modelar cada planta son aproximados y solo deben ser usados para el ejercicio de evaluación de potencial de eficiencia energética que esta consultoría demanda. Estos valores no deben ser usados para otro tipo de estudios (estudios de mercado, benchmark internacional, etc.).

Se resalta que, para el cálculo de consumo de energía por planta, en función del índice de intensidad energética, se considera la producción de acero crudo (planchones, placas gruesas y lingotes). Atrás de esta premisa yace el concepto de que toda la producción de acero crudo será transformada a diversos productos derivados o finales. Es evidente que una parte importante de estas transformaciones se realizan en otras plantas de laminación, alejadas de las plantas principales (reducción y acería). Sin embargo, con la información proporcionada no es posible considerar la producción de otras plantas laminadoras y de transformación secundaria y de acabados. Por esta razón, la premisa es que todo el acero crudo producido por las principales plantas integradas y semi-integradas será transformado hasta el nivel de producto final en estas mismas plantas. Por esto, el indicador es en función de la cantidad de acero crudo.

Tabla 24: Reconstrucción bottom-up del consumo energético, emisión de CO₂ y producción para el sector hierro y acero en México.

Productores de acero de México y productos terminados		Capacidad (1,000 tAC/año)	Ocupación media de la capacidad instalada (estimado para 2016)	Intensidad energética (GJ/tAC)			Factor de emisión (t CO ₂) (estimado para 2016)	Producción (1,000 tAC) (estimado para 2016)	Energía consumida (GJ) (estimado para 2016)	Emisiones (t CO ₂ e) (estimado para 2016)
				Alto horno + Convertor a oxígeno + colado + laminación + acabados	Reducción directa + horno de arco eléctrico+ colado	Acería horno de arco eléctrico a partir de chatarra (mini-mills) +colado				
ArcelorMittal	Total	7,531	n.d.					3,440	61 448,000	6 544,800
	Lázaro Cárdenas (planos)+ plantas laminadoras	4754	50%		18.7		1.89	2,000	37 400,000	3 780,000
	Lázaro Cárdenas (largos)+ plantas laminadoras	2,777	60%	16.7			1.92	1,440	24 048,000	2 764,800
AHMSA	Total	5,500	79%					4,338	85 884,250	8 757,413
	Monclova_alto horno (3,4,5)+BOF+laminación	4,300	93%	19.9			2.019	3,978	79 152,250	8 030,573
	Monclova_horno eléctrico+laminación	1,200	30%		18.7		2.019	360	6 732,000	726,840
Deacero	Total	4,500	56%					2,538	7 360,200	1 776,600
	Saltillo, Coahuila	n.d.	n.d.			2.9	0.7	846	2 453,400	592,200
	Ramos Arizpe, Coahuila	n.d.	n.d.			2.9	0.7	846	2 453,400	592,200
	Celaya, Guanajuato	n.d.	n.d.			2.9	0.7	846	2 453,400	592,200
Termium México	Total	4,010	80%					3,196	61 682,800	6 061,747
	Guerrero_Monterrey_ (planos)	n.d.	n.d.		19.9		1.91	1,065	21 200,133	2 034,787
	Largos Apodaca Norte_Monterrey_ (largos)	n.d.	n.d.		19.0		1.89	1,065	20 241,333	2 013,480
	Puebla_Puebla (largos)	n.d.	n.d.		19.0		1.89	1,065	20 241,333	2 013,480
Simec	Total	2,878	48%					1377	3 580,598	964,007
	Siderúrgica de Guadalajara, Jalisco	370	74%			2.6	0.7	275	715,000	192,500
	Mexicali, Baja California, incluyendo procesadora de chatarra	628	39%			2.6	0.7	247	642,598	173,007
	Apizaco, Tlaxcala + Cholula, Puebla	630	61%			2.6	0.7	385,0	1 001,000	269,500
	San Luis Potosí (Aceros DM y Aceros San	900	52%			2.6	0.7	470	1 222,000	329,000

				Intensidad energética (GJ/tAC)						
Productores de acero de México y productos terminados		Capacidad (1,000 tAC/año)	Ocupación media de la capacidad instalada (estimado para 2016)	Alto horno + Convertidor a oxígeno + colado + laminación + acabados	Reducción directa + horno de arco eléctrico+ colado	Acería horno de arco eléctrico a partir de chatarra (mini-mills) +colado	Factor de emisión (t CO ₂) (estimado para 2016)	Producción (1,000 tAC) (estimado para 2016)	Energía consumida (GJ) (estimado para 2016)	Emisiones (t CO ₂ e) (estimado para 2016)
	Luis)+ Abastecedora Siderúrgica de chatarra									
Gerdau Corsa	Total	1,850						1,295	3 367,000	906,500
	Sahagún, Hidalgo -largos	1,000	70%			2.6	0.7	700	1 820,000	490,000
	La Presa, Estado de México	850	70%			2.6	0.7	595	1 547,000	416,500
Tyasa	Total	1,700	70%					1190	3 094,000	833,000
	Orizaba, Veracruz (principal)	1,700	70%			2.6	0.7	1190	3 094,000	833,000
Tenaris TAMSA	Total	1,200	70%					860	2 236,000	602,000
	Veracruz	1,200	70%			2.6	0.7	860	2 236,000	602,000
Otros	Otros	431				2.6	0.7	566	1 471,600,0	396,200,0
Total		29,600	64%					18,800	230 888,848	27 048,066

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 25 muestra un resumen ejecutivo de los principales indicadores extraídos a partir de la reconstrucción sectorial.

Tabla 25: Balance general estimado 2016 a partir del análisis *bottom-up* (reconstrucción de la actividad sectorial).

Producción de acero crudo (1,000 tAC)		
Alto horno + convertidor al oxígeno (plantas integradas)	5,418	29%
Reducción directa + horno arco eléctrico (plantas integradas y semi-integradas)	13,382	71%
Total	18,800	100%
Consumo total de energía (PJ)	230.89	
Intensidad energética (GJ/tAC)	12.28	
Factor de emisión (t CO ₂ /tAC)	1.4	

Medidas de eficiencia energética (EE) aplicables al sector hierro y acero en México, potencial de ahorro de energía y costos. Escenarios alternativos.

Según información de CANACERO provista durante una entrevista presencial, el sector siderúrgico de México ya evaluó las tecnologías, catalogadas como estado del arte, recomendadas internacionalmente por Asia Pacific Partnership para EE y reducción de emisiones. Se hizo también un sondeo para determinar la penetración de estas tecnologías en México como parte de estudios sectoriales (CANACERO, World Steel Association, etc.), y también como parte de estudios liderados por INEC sobre medidas de mitigación. Se desglosaron las tecnologías, y se verificó que la mayor parte de esas tecnologías ya han sido adoptadas en México, por ejemplo: captura de CO₂ que es vendido para procesos cerveceros, cogeneración con gases de proceso y con gas natural, precalentamiento de chatarra para ahorrar electricidad, hornos de corriente alterna eficientes, hornos de corriente directa, escoria espumosa, tapón poroso, lanzas de oxígeno en conversores a oxígeno (BOF/EOF), automatización del proceso, etc. La mayor parte de las tecnologías, unas en mayor medida que otras, ya han sido implementadas en México. Inclusive en México algunas siderúrgicas desarrollan tecnologías, las patentan y luego las venden al mundo. La mayoría de plantas en México ya han aplicado las medidas de EE económicamente viables, identificadas con benchmark internacional. De esta forma, el potencial técnico-económico para eficiencia energética es muy limitado en el sector hierro y acero mexicano.

Este estudio busca estimar el potencial remaneciente de ahorro de energía en el sector siderúrgico de México. Para esto se usa como referencia de meta de eficiencia energética a valores presentados por World Steel Association sintetizados en Worrel et al. (2008), EPE (2009) y Dos Santos (2011), que caracterizan las mejores prácticas en el sector siderúrgico a nivel mundial.

Las medidas de eficiencia energética propuestas se modelarán considerando nuevos factores de intensidad energética por tipo de planta, entendidos como metas máximas para alcanzar un nivel de mínima intensidad energética con la mejor tecnología disponible a nivel mundial. Por tanto, los factores de intensidad energética de los escenarios alternativos de eficiencia energética permiten estimar un potencial técnico de ahorro de energía en el sector siderúrgico de México. Sin embargo, probablemente no todo este potencial podría ser aprovechado debido a restricciones físicas (distancia entre plantas, espacio al interior de las plantas, etc). Por tanto, se ha estimado adicionalmente un potencial técnico factible de ahorro de energía para cada medida en función de las premisas descritas a continuación.

Finalmente, se provee referencias internacionales de costo para la aplicación de cada medida, según Worrel et al. (2008) y EPE (2009).

La priorización de las medidas de eficiencia energética propuestas (potencial técnico-económico) debe ser realizada para el conjunto del sector industrial, considerando el costo-beneficio en cada industria específica.

Según World Steel Association (2017), a nivel mundial, el sector de hierro y acero puede aún mejorar sus índices de intensidad energética, pasando a reducir su consumo de energía total entre un 15% a 20%. Considerando que México ya tiene una intensidad energética menor a la media mundial, se puede estimar que en México habría un potencial factible de aproximadamente 10%.

Medida EE_1: Thin Slab Casting.

Integración de los procesos de colado continuo y laminación en caliente (sin tener que recalentar el acero antes de laminar en caliente). El proceso de colado continuo, en comparación al colado tradicional, puede ahorrar entre 1 - 3 GJ/t de acero. Por ejemplo, en Brasil, hasta 2013 un 7% del colado aún era hecho con el método convencional. En México muchas de las plantas acereras ya usan colado continuo, sin embargo, no hay un dato preciso de la aplicación de la tecnología de integración de colado continuo y laminación en caliente (thin slab casting). La intensidad energética de las etapas de colado continuo, laminación y acabados, puede disminuir mucho integrando el colado continuo y laminación en caliente, según la tabla indicada. AHMSA, por ejemplo, ya cuenta con 4 líneas de "slab continuos casting".

La siguiente Tabla muestra los valores de intensidad energética, por tipo de planta, considerados en un escenario con aplicación de la medida 1 (EE_1). Estos valores han sido estimados por Worrel et al (2008) como meta de intensidad energética al aplicar la mejor tecnología disponible para "thin slab casting".

Tabla 26: Intensidad energética por tipo de planta en la medida 1 del sector siderúrgico.

Escenario	Intensidad energética (GJ/ tAC)		
	Planta integrada alto horno + convertor a oxígeno + colado + laminación + acabados.	Planta integrada: reducción directa + horno de arco eléctrico + colado + laminación + acabados.	Planta semi-integradas: acería horno de arco eléctrico a partir de chatarra (mini-mills) + colado + laminación+acabados.
Base	16.7 – 19.9	18.7 – 19.9	2.6 – 2.9
EE_1	14.8	17.0	2.6

Los nuevos valores de intensidad energética se aplican sobre todas las plantas, tanto integradas (alto horno + convertidor a oxígeno, reducción directa + horno a arco eléctrico), como en plantas semi-integradas (horno eléctrico).

Tabla 27: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico de la medida 1.

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_1 (potencial técnico). (GJ/tAC)	10.30
---	-------

No toda la producción de acero crudo de las plantas consideradas (integradas y semi-integradas) es procesada hasta productos finales en las mismas instalaciones. Una buena parte de productos básicos (arrabio, hierro esponja) y de acero crudo (barras, palanquilla, planchones), quizá 50%, es vendido/transportado a otras plantas laminadoras y de acabados, lejos de la planta principal, donde finalmente se consiguen los productos finales. Por tanto, probablemente hay limitaciones físicas que no permitirían integrar el colado continuo con la laminación en caliente en cada planta.

Tabla 28: Potencial técnico y factible de la medida 1 en el sector siderúrgico.

Potencial técnico de ahorro energía México, con relación al escenario base (GJ).	37 345,050	Potencial técnico ahorro energía México con relación al escenario base.	16%
Potencial técnico factible de ahorro energía en México con relación al escenario base (GJ).	50%	Potencial técnico factible de ahorro energía México con relación al escenario base.	8%
	18 672,525		

Tabla 29: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico-factible de la medida 1.

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_1 (potencial técnico-factible). (GJ/tAC)	11.29
--	-------

El costo de capital (inversión) asociado a la implementación de esta medida es:

Tabla 30: Costo asociado a la implementación de la medida 1 en el sector siderúrgico.

Costo (USD/ tAC)	150 – 200
---------------------	-----------

Medida EE_2: Altos hornos eficientes.

En altos hornos ineficientes se puede usar oxígeno en lugar de aire enriquecido (lanzas de oxígeno), también se pueden reciclar los gases formados en la parte superior del alto horno para usos energéticos al interior de la planta. Esto tiene un potencial de ahorro de energía de 20 -25% en comparación al escenario base caracterizado por la presencia de altos hornos con oportunidades de implementación de medidas de eficiencia energética. Las nuevas intensidades energéticas del escenario EE_2 se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 31: Intensidad energética por tipo de planta en la medida 2 del sector siderúrgico.

Escenario	Intensidad energética (GJ/ tAC)		
	Planta integrada alto horno + convertor a oxígeno + colado + laminación + acabados.	Planta integrada: reducción directa + horno de arco eléctrico + colado + laminación + acabados.	Planta semi-integrada: acería horno de arco eléctrico a partir de chatarra (mini-mills) + colado + laminación+acabados.
Base	16.7 – 19.9	18.7 – 19.9	2.6 – 2.9
EE_2	13.5	No aplica	No aplica

Los nuevos valores de intensidad energética se aplican únicamente sobre plantas integradas del proceso alto horno + convertor a oxígeno.

Tabla 32: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico de la medida 2.

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_2 (potencial técnico). (GJ/tAC)	10.68
--	-------

Los altos hornos de AHMSA tienen una alta intensidad energética según los reportes anuales de sostenibilidad y gestión ambiental encontrados. La producción en alto horno de AHMSA representa el 70% de producción de acero con altos hornos en México. Por tanto, se ha estimado un potencial técnico factible igual al 50% del potencial técnico.

Tabla 33: Potencial técnico y factible de la medida 2 en el sector siderúrgico

Potencial técnico de ahorro energía México, con relación al escenario base (GJ).	30 064,000	Potencial técnico ahorro energía México con relación al escenario base	13%
Potencial técnico factible de ahorro energía en México con relación al escenario base (GJ).	50%	Potencial técnico factible de ahorro energía México con relación al escenario base	7%
	15 032,000		

Tabla 34: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico factible de la medida 2

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_2 (potencial técnico-factible) (GJ/tAC)	11.48
--	-------

El costo de capital (inversión) asociado a la implementación de esta medida es:

Tabla 35: Costo asociado a la implementación de la medida 2 en el sector siderúrgico

Costo (USD/ tAC)	200 – 250
------------------	-----------

Medida EE_3: Moldeado y conformación directa de acero.

Integra el colado y conformado en una etapa, eliminando el recalentamiento antes del conformado del producto final. Permite producir directamente placas finas de 1 -10 mm de espesor. El potencial de ahorro es de 1 a 3 GJ/t de acero. Esta medida se puede aplicar sobre las plantas con producción de "lámina caliente fina". Las nuevas intensidades energéticas del escenario EE_3 se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 36: Intensidad energética por tipo de planta en la medida 3 del sector siderúrgico

Escenario	Intensidad energética (GJ/ tAC)		
	Planta integrada alto horno + convertor a oxígeno + colado + laminación + acabados.	Planta integrada: reducción directa + horno de arco eléctrico + colado + laminación + acabados.	Planta semi-integrada: acería horno de arco eléctrico a partir de chatarra (mini-mills) + colado + laminación+acabados.
Base	16.7 – 19.9	18.7 – 19.9	2.6 – 2.9
EE_3	16.0	17.3	No aplica

Los nuevos valores de intensidad energética se aplican sobre todas las plantas que producen laminados finos en caliente: AHMSA (plantas en Monclova), Ternium (plantas en Monterrey y Puebla).

Tabla 37: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico de la medida 3

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_3 (potencial técnico). (GJ/tAC)	11.09
--	-------

No toda la producción de acero crudo de las plantas consideradas (integradas y semi-integradas) es procesada hasta productos finales en las mismas instalaciones. Una buena parte de productos básicos (arrabio, hierro esponja) y de acero crudo (barras, palanquilla, planchones), quizá 50%, es vendido/transportado a otras plantas laminadoras y de acabados. Por tanto, probablemente hay limitaciones físicas que no permitirían integrar el moldeado con la conformación directa de acero en cada planta que produce placa fina laminada en caliente.

Tabla 38: Potencial técnico y factible de la medida 3 en el sector siderúrgico

Potencial técnico de ahorro energía México, con relación al escenario base (GJ).	22 408,250	Potencial técnico ahorro energía México con relación al escenario base.	10%
Potencial técnico factible de ahorro energía en México con relación al escenario base (GJ).	50%	Potencial técnico factible de ahorro energía México con relación al escenario base.	5%
	11 204,125		

Tabla 39: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico factible de la medida 3

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_3 (potencial técnico - factible). (GJ/tAC)	11.69
---	-------

El costo de capital (inversión) asociado a la implementación de esta medida es:

Tabla 40: Costo asociado a la implementación de la medida 3 en el sector siderúrgico

Costo (USD/ tAC)	150 – 200
------------------	-----------

Medida EE_4: Hornos de arco eléctrico eficientes.

Medidas de eficiencia energética en hornos de arco eléctrico que permitan bajar la intensidad del proceso en aproximadamente 12%.

Tabla 41: Intensidad energética por tipo de planta en la medida 4 del sector siderúrgico

Escenario	Intensidad energética (GJ/ tAC)		
	Planta integrada alto horno + convertor a oxígeno + colado + laminación + acabados.	Planta integrada: reducción directa + horno de arco eléctrico + colado + laminación + acabados.	Planta semi-integrada: acería horno de arco eléctrico a partir de chatarra (mini-mills) + colado + laminación+acabados.
Base	16.7 – 19.9	18.7 – 19.9	2.6 – 2.9
EE_4	No aplica	18.3 – 19.5	2.3 – 2.6

Los nuevos valores de intensidad energética se aplican sobre todas las plantas que usan horno eléctrico, tanto integradas (reducción directa + horno a arco eléctrico), como en plantas semi-integradas (horno eléctrico).

Tabla 42: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico de la medida 4

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_4 (potencial técnico). (GJ/tAC)	12.14
--	-------

Muchos de los hornos de arco eléctrico en plantas integradas y semi-integradas son modernos, en muchas de las plantas ya se ha aplicado medidas de eficiencia energética. Por tanto, se ha estimado un potencial técnico factible igual al 50% del potencial técnico.

Tabla 43: Potencial técnico y factible de la medida 4 en el sector siderúrgico

Potencial técnico de ahorro de energía México, con relación al escenario base (GJ).	2 740,846	Potencial técnico ahorro energía México con relación al escenario base.	1.2%
Potencial técnico factible de ahorro energía en México con relación al escenario base (GJ).	50%	Potencial técnico factible de ahorro energía México con relación al escenario base.	0.6%
	1370,423		

Tabla 44: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico factible de la medida 4

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_4 (potencial técnico -factible). (GJ/tAC)	12.21
--	-------

El costo de capital (inversión) asociado a la implementación de esta medida es:

Tabla 45: Costo asociado a la implementación de la medida 4 en el sector siderúrgico

Costo (USD/ tAC)	150 – 200
------------------	-----------

Medida EE_5: Sistemas de gestión de la energía y otras medidas de eficiencia energética.

Muchas de las empresas del sector siderúrgico en México ya han implementado sistemas de gestión de la energía y varias medidas de eficiencia energética. Por ejemplo, ArcelorMittal AHMSA y TERNIUM tienen experiencia con las siguientes medidas:

- Instalación de variadores de velocidad en ventiladores de las calderas.
- Optimización del uso de consumo de electricidad en bombas de agua.
- Control automático del sistema de alumbrado usando PLCs.
- Reciclaje de los productos generados dentro del proceso siderúrgico (gas coque y gas alto horno) en las estufas de los altos hornos, en turbinas generadoras de energía eléctrica, hornos de recalentamiento de planchones, calderas para generar vapor, hornos de coquización, de peletización y sinterizado. Usando estos productos energéticos se puede implementar generación eléctrica y cogeneración de electricidad y calor de proceso.
- Sustitución de combustibles fósiles, como el gas natural y otros petrolíferos, por recursos y subproductos que anteriormente se desperdiciaban.
- Incorporación de equipos con mayor eficiencia a lo largo de toda la línea de producción de acero.
- Producción de biocombustibles en la planta, para substituir combustibles fósiles.
- Control de emisiones, participación en iniciativas internacionales para medición y mitigación de gases de efecto invernadero.
- Iluminación usando energía solar y eólica.
- Eliminación de fugas de combustibles como gas natural, iniciando en procesos de hornos de laminación.
- Instalar capacitores para ahorro de energía eléctrica, por ejemplo, en sistema de bombeo en planta de tratamiento de aguas negras.
- Sistema de gestión ambiental ISO 14,001, gestión de calidad ISSO 9,000, gestión de la energía 50,001.

Complementando las acciones ya implementadas, se estima que ampliando los SGEN e implementando medidas de eficiencia energética, vinculadas a renovación de equipos, con un retorno económico menor a dos años, es posible lograr un ahorro de hasta 10% sobre el total del consumo energético del sector (CONUEE, 2017).

Tabla 46: Potencial técnico y factible de la medida 5 en el sector siderúrgico

Potencial técnico de ahorro de energía en México, con relación al escenario base (GJ)	23 088,885	Potencial técnico de ahorro de energía en México	10%
Potencial técnico factible de ahorro energía en México con relación al escenario base (GJ)	50%	Potencial técnico factible de ahorro de energía en México con relación al escenario base	5%
	11 544,442		

Tabla 47: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico de la medida 5

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_5 (potencial técnico) (GJ/tAC)	10.92
---	-------

Tabla 48: Intensidad energética del sector siderúrgico con potencial técnico factible de la medida 5

Intensidad energética del sector siderúrgico en escenario EE_5 (potencial técnico-factible) (GJ/tAC)	11.53
--	-------

El costo de capital (inversión) asociado a la implementación de esta medida es:

Tabla 49: Costo asociado a la implementación de la medida 4 en el sector siderúrgico

Costo (USD/ tAC)	50 – 100
------------------	----------

3. Potenciales de ahorro en la industria de cemento

3.1.

Caracterización general del sector.⁶

En México existe un alto grado de concentración del mercado del cemento, habiendo seis empresas registradas ante la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM):

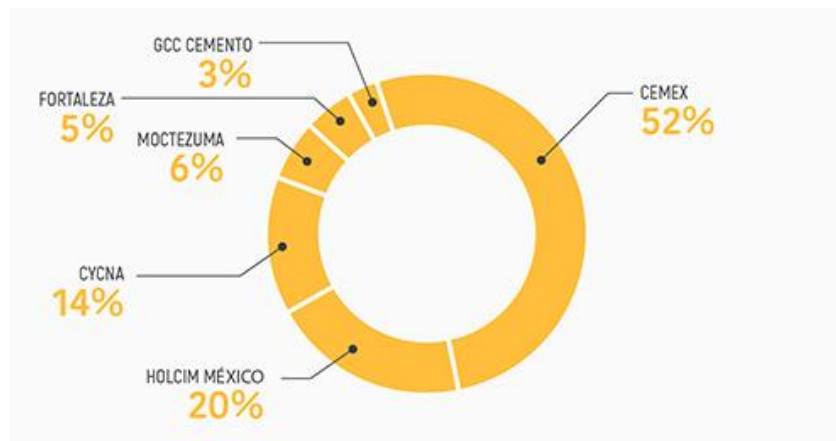
⁶ Datos obtenidos de la página Web de la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM). Disponible en: <http://canacem.org.mx/produccion-y-consumo/>

1. Cementos Mexicanos (CEMEX).
2. Holcim México.
3. Cementos y Concretos Nacionales (CYCNA).
4. Cementos Moctezuma.
5. Grupo Cementos de Chihuahua (GCC Cemento).
6. Cementos Fortaleza.

Estas seis empresas concentran la gran mayoría de las 34 plantas cementeras distribuidas a lo largo del territorio nacional. La producción total dichas empresas en el 2015 se ubicó en 44,900,000 toneladas anuales, dando empleo en forma directa a 20,000 personas y en forma indirecta a 110,000 personas, de acuerdo con Canacem. El 86% del mercado se concentra en tres empresas, las que en conjunto poseen 26 plantas: Cemex, Holcim y CYCNA.

La capacidad productiva en 2015 se ubicaba en 53,000,000 toneladas al año y el factor de utilización promedio de dicho año se ubicó en el 84,3%. Ver: Industria del Cemento en México. Análisis de sus Determinantes. (Belem Vásquez y Salvador Corrales, octubre 2016.). De acuerdo con ese mismo informe en el año 2015, el 85.8% del cemento producido ha sido tipo Portland⁷, el 9% tipo Mortero y el 2.7% tipo Blanco 2%, otros 2.5%. De acuerdo con datos de la CANACEM en 2016 la producción nacional de cemento ascendió a 40,600,000 toneladas.

Figura 1: Participación de las empresas en el mercado de Cemento en México.



Fuente: Cámara Nacional del Cemento (2015), Aguilar (2015)

⁷ En cuanto a las características del producto, la mayor parte de la producción de cemento es el portland que se elabora con material clinker pulverizado. En orden de importancia le sigue el cemento blanco, que es la mezcla de piedra caliza, arcilla de caolín con bajo contenido de hierro y yeso y el mortero que es la mezcla de cemento con arena y agua. Ver: Industria del Cemento en México. Análisis de sus Determinantes.

La empresa CEMEX posee 15 plantas, siendo la más importante a nivel nacional y la segunda cementera más grande del mundo.

De acuerdo con Vásquez y Corrales⁸, “Existen pocos trabajos formales que hayan analizado a detalle el comportamiento de la industria cementera en México. Los más relevantes se han centrado en analizar las características generales de la industria (Avalos y Schatan, 2003; Kumakan y Martínez, 2008), en analizar la utilización eficiente de energía en la producción (Sterner, 1990), la estructura de mercado bajo la cual operan (De la Garza y Arteaga, 2012) y la relación de aglomeración y precios de las seis multinacionales (Ghemawat y Thomas, 2005). En otros trabajos se da énfasis al análisis solo de Cemex, dado su papel como empresa dominante y global (Barragán y Cerutti, 2003) y también al grupo integrado por Cemex, Holcim-Apasco y Lafarge (Vera, 2013)”.

Los mismos autores concluyen que la tasa de crecimiento de la producción de cemento en México responde positivamente a la demanda de exportaciones y negativamente a la participación de competidores extranjeros. La competencia extranjera, sin embargo, estaría limitada, considerando que se trata de una estructura de mercado oligopólica y, de manera indirecta, que la industria cementera tiene mayores posibilidades de mantener acuerdos de precios o cantidades a fin de evitar la entrada de competidores y aumentar los beneficios.

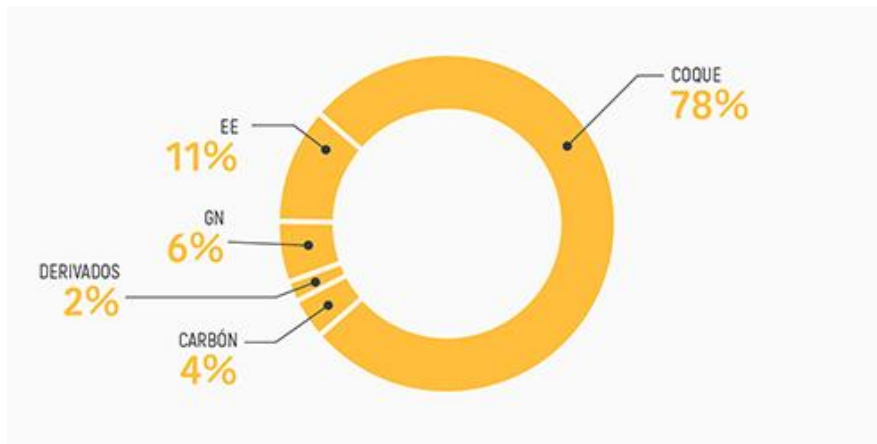
La consideración de la variable que mida el efecto de la actividad económica nacional, se encuentra una fuerte relación causa-efecto entre la producción física de la economía y la tasa de cambio de la producción cementera, lo cual demuestra que el nivel de actividad de esta industria está determinado por la evolución de la economía nacional.

El consumo energético de la industria cementera representó en el 2014 el 10,1% del consumo total de la industria mexicana, constituyéndose luego de la industria básica del hierro y el acero en la rama industrial individual que más consumo de energía presentó. En el año 2014 la industria del Cemento consumió 159,33 PJ.

Se detalla a continuación las fuentes energéticas utilizadas en este sector, donde se destaca la presencia del coque con el 78% (año 2014).

⁸ “Industria del cemento en México: análisis de sus determinantes” – Vásquez y Corrales - Revista Problemas del Desarrollo – marzo 2017.

Figura 2: Participación de las fuentes energéticas en el consumo de la industria del Cemento.

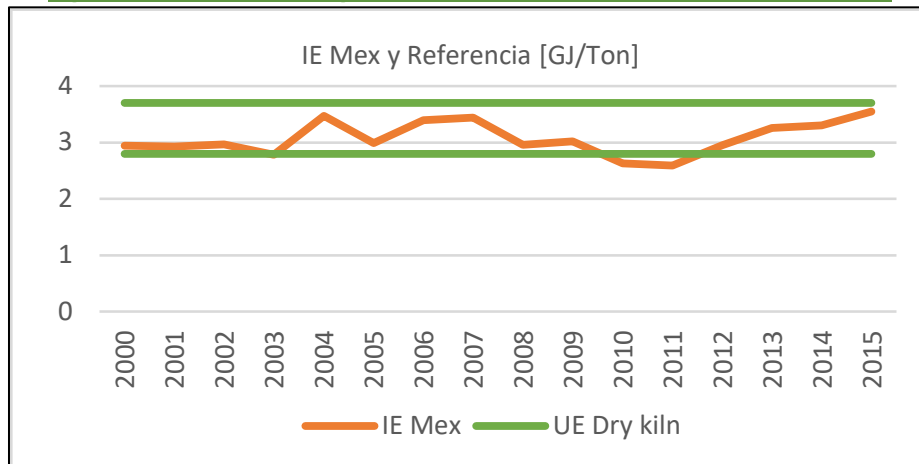


Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

Al observar el comportamiento histórico que ha tenido la participación de las diversas fuentes energéticas en el consumo de esta industria, se aprecia que ha habido una disminución del uso de derivados del petróleo siendo estos reemplazados por el coque. Las demás fuentes presentan una participación estable en el tiempo.

En cuanto a la intensidad energética de la industria del cemento en México (expresada en GJ/t), se aprecia en el siguiente gráfico, que ésta se ubica en el rango de los valores que presenta la industria del cemento en Europa, considerando la tecnología seca en sus variantes: Dry Klin de 6 etapas de pre-heater y 4 etapas (entre 2,8 y 3,7 GJ/t respectivamente). Esto demuestra que en el caso de México la industria del cemento posee valores de alta eficiencia, con intensidades por debajo de otras tecnologías como Wet klins las que presentan intensidades del orden de 5,8 a 6,7 GJ/t⁹.

Figura 3: Intensidad energética de la Industria del Cemento. GJ/tonelada.



Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

⁹ Ver: 151201 DG ENER Industrial EE study - final report_clean_stc.

Sin embargo, se aprecia que entre los años 2011 y 2015 la intensidad energética (IE) ha aumentado (de 2,59 a 3,55 GJ/tonelada, incremento del 37%). En tal sentido, se observa en dicho período un cambio en la matriz de fuentes energéticas, donde la electricidad disminuyó su participación del 15% en 2011 al 11% en el 2015, mientras que por otra parte aumentó en un 4% la participación del coque. Se debería analizar junto a la Conuee si este cambio se debe a una cuestión vinculada a modificaciones en el balance energético, debido a la corrección en la información de base o a motivos relacionados a la disminución de los factores de ocupación de planta (los que generan pérdidas en la eficiencia productiva).

Adicionalmente cabe destacar que es una práctica usual adoptada internacionalmente¹⁰ por parte de la industria del cemento la de incinerar diversos residuos, tanto líquidos como sólidos, en sus diversos hornos. En el caso de México se utilizan principalmente neumáticos (llantas usadas) y/o una fracción inorgánica del residuo sólido urbano (FIRSU). La inclusión de estos combustibles alternos disminuye las emisiones específicas de GEI y podría aumentar los consumos específicos, en caso de tener que acondicionarlos previamente utilizando para ello otros procesos que también requieren el uso de energía (esto debería ser consultado con las empresas del sector). De todas maneras, se duda que el uso de combustibles alternos pueda explicar el aumento del 37% observado en la IE.

Si se calcula la diferencia de intensidad energética entre dichos años (0,96 GJ/t), eso significa que para una producción de cemento del orden de 40,6 millones de toneladas (dato del año 2016), si la intensidad hubiera sido de 2,59 GJ/t, el ahorro se hubiera ubicado en torno a los 39 GJ (alrededor de un 24%).

Por ello resulta importante analizar junto a las empresas del sector y Conuee el motivo por el cual se produjo dicho aumento en la IE y si se sostendrá en el tiempo.

Por último y con respecto a los usos de energía, de acuerdo con estimaciones propias del presente estudio, el 82% corresponde a calor directo, 9% a fuerza motriz, 7% vapor y 2% a otros usos productivos/no productivos, compatible con lo relevado en bibliografía internacional.

Adicionalmente, en base a información presentada en el documento “Ahorro de Energía en la Industria del Cemento” - Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente y UPME-COLCIENCIAS, Colombia; el 99,5% del consumo en calor directo se realiza en hornos, mientras que el 0,5% restante en secado y molienda, calderas y servicios auxiliares.

¹⁰ Ver: Mejora del rendimiento de una cementera mediante el empleo de combustibles Alternativos. LOPEZ, A.; BLANCO, F.; GUTIERREZ, M.A.

El uso de la electricidad en la industria del cemento representa en el caso de México un 11% del consumo final de energía (de acuerdo al balance energético). En base a la bibliografía mencionada¹¹, los principales usos eléctricos se llevan a cabo en la molienda de cemento y acabado (41%), en la preparación y molienda de la materia prima (32%) y en la homogenización y conjunto del horno (21%).

3.2.

Oportunidades de Eficiencia Energética en la Industria del Cemento.

En lo que se refiere a la cogeneración, de acuerdo con la Conuee¹², en México, prácticamente todas las plantas de cemento (unas 31 sobre un total de 34) operan en proceso “seco”, con tecnología de punta, con 4 a 6 etapas de aprovechamiento de calor residual de los gases y la mayoría con pre-calcinador con lo que los gases de escape salen a menos de 200 °C¹³.

Es relevante destacar que cuando estos procesos no están optimizados en la recuperación de calor de los gases de escape (con temperaturas del orden de 380 a 450 °C), es posible aprovechar esta energía para generar electricidad (cogeneración). En tal sentido la Conuee concluye: “En esta industria los gases de escape de los procesos salen a menos de 200 °C, por lo que no existiría posibilidad de aprovecharlos para generar energía eléctrica”.

Hay empresas, caso Cementera Cruz Azul, que debido a su antigüedad y la falta de mantenimiento de la planta¹⁴, se estima que a partir de la introducción de mejoras y mantenimiento preventivo se podría reducir en un 5% el consumo de energía¹⁵. Cómo ya se ha explicado, este potencial no se podría extrapolar al resto de la industria cementera pues, dado que el conjunto de las cementeras del país presenta valores de IE compatibles con los observados en empresas europeas¹⁶.

En cuanto a la implementación de Sistemas de Gestión de la Energía (SGEn – ISO 50001) en cementeras, hay estudios que estiman que a partir de su implementación los ahorros energéticos serían del orden del 3%¹⁷ al 8%¹⁸ sobre el período de implementación de los SGEn.

¹¹ Ver: Ahorro de Energía en la Industria del Cemento. Universidad del Atlántico, Universidad Autónoma de Occidente y UPME-COLCIENCIAS, Colombia.

¹² Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México, 2009. Conuee.

¹³ Analizar si con gases a 200°C se puede implementar recuperación de calor residual con ciclo Rankine orgánico (ORC) para producción de electricidad.

¹⁴ Información relevada a partir de la visita del consultor Ulla Blatt en mayo 2017

¹⁵ Note on visits to Cruz Azul and AHMSA. Prepared by Ulla Blatt, energy adviser. May 2017.

¹⁶ Ver capítulo de Benchmarking elaborado en el marco del presente estudio.

¹⁷ Ver: Study on Energy Efficiency and Energy Saving Potential in Industry and on Possible Policy Mechanisms. ICF International. 1^o December 2015.

¹⁸ Ver: Global Energy Management System Implementation: Case Study. Arabian Cement Company. ACC is 1st cement plant at Egypt certified with ISO 50001. 2017.

Con relación a este último valor cabe destacar el caso de la empresa Arabian Cement Company (ACC), compañía que informa haber estado continuamente implementando medidas para mejorar el consumo de energía y el desempeño ambiental respaldado por un fuerte compromiso de la alta gerencia. En 2015, la empresa participó en un estudio de benchmarking de energía para el sector cementero egipcio donde se evaluó el ACC como la de mejor desempeño dentro de las organizaciones muestreadas. Esta ha motivado aún más a la alta gerencia para continuar los esfuerzos hacia una producción más sostenible. A partir de allí se decide ir por la certificación de las normas ISO 9001, 14001, 18001 y 50001¹⁹. En cuanto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero las reducciones logradas por ACC fueron del 15%.

Se sugiere en consecuencia realizar un escenario (con la asistencia del LEAP) que considere la aplicación de SGEs en la industria del cemento de México. Se debe averiguar con certificadoras locales una estimación del costo de su implementación en la industria cementera mexicana.

Con relación a los principales tipos de combustible utilizados con fines térmicos en la industria del cemento, se aprecia que un 78% corresponde al coque y un 4% al carbón mineral. Se debería analizar la pertinencia de elaborar un segundo escenario que plantee la penetración del gas natural en los equipos existentes (actualmente con una participación del 6%), a fin de analizar el sobrecosto que tendría dicha medida y los impactos en términos energéticos y de emisiones evitadas.

Al respecto cabe recordar que en el marco del Estudio de medidas y acciones para la mitigación de gases de efecto invernadero en la industria de la construcción y sus subsectores en México, realizado en 2013, se plantean como medidas de mitigación dentro de la industria del cemento, el uso de combustibles alternos (llantas y residuos urbanos inorgánicos). En tal sentido cabe destacar que el uso de estos combustibles alternos reduce las emisiones específicas de GEI debido al menor contenido de CO₂ que poseen frente al coque o al carbón mineral.

Tabla 50: Emisiones de gases contaminantes derivados de los combustibles utilizados en la industria cementera.

Gases	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq.
Combustible				
Coque de Petróleo	97,500	3.0	0.6	97,749
Carbón	98,300	10.0	1.5	98,998
Combustóleo	74,100	3.0	0.6	74,349
Gas Seco	56,100	5.0	0.1	56,277
Residuos Sólidos Urbanos	91,700	30.0	4.0	93,660
Llantas	81,500	30.3	4.0	83,469

Fuente: Elaboración propia en base a Análisis de Creara Internacional con información del IPCC y de la US-EPA.

¹⁹ Arabian Cement Company, 2017.

De acuerdo con las metas mencionadas en la Carta de Intención del proyecto NAMA del sector cementero de México²⁰, las siguientes son las metas interpretadas por el equipo consultor que elaboró dicho documento:

- Al 2020, lograr un uso de combustibles alternativos de 8% del total, en donde:
 - 3% serán llantas²¹ y 5% serán FIRSU²²
- Al 2030, lograr un uso de combustibles alternativos de 21% del total, en donde:
 - 6% serán llantas
 - 15% serán FIRSU

Cabe destacar que el promedio de consumo energético por tonelada de clínker utilizado para las estimaciones es del orden de 3.4 GJ/t ck²³. Se sugiere realizar un tercer escenario con la asistencia del LEAP que considere estas hipótesis de penetración de combustibles alternos.

En términos de emisiones de CO₂, tal como lo destaca el documento: “Estudio de medidas y acciones para la mitigación de gases de efecto invernadero en la industria de la construcción y sus subsectores en México: “En la industria del cemento encontramos evidencia que las diferentes empresas han hecho grandes esfuerzos por disminuir sus consumos energéticos, y que el nivel tecnológico que han alcanzado las pone en el pelotón de avanzada a nivel mundial. Uno de los grandes consorcios mexicanos, CEMEX, ha sido reconocido por el Carbon Disclosure Project (CDP) como una de las mejores empresas latinoamericanas en revelación de datos relacionados al cambio climático y una de las diez mejores en gestión de emisiones de CO₂, (Notimex, 2012)”.

El factor de emisión de la producción de cemento en México se sitúa en 0.715 tCO₂ (emisiones totales específicas) por tonelada de cemento en el año 2010 (Carta de intención de convenio para NAMA CANACEM-SEMARNAT, 2012). En el mundo, en el año 2007, este indicador varía entre 0.65 y 0.92 tCO₂ por tonelada de cemento, con una media ponderada de 0.83 tCO₂ por tonelada de cemento (IEA, 2007). Se aprecia entonces que el factor de emisiones de producción de cemento en México, dada su alta eficiencia, se encuentra por debajo de la media internacional²⁴.

²⁰ Estudio de medidas y acciones para la mitigación de gases de efecto invernadero en la industria de la construcción y sus subsectores en México. INECC. PNUD. Marzo 2013.

²¹ Poder calorífico llantas: 7471 Kcal/kg. INECC. PNUD. Marzo 2013.

²² Poder calorífico FIRSU (Fracción inorgánica del residuo sólido Urbano): 2765 Kcal/kg. INECC. PNUD. Marzo 2013.

²³ INECC. PNUD. Marzo 2013.

²⁴ INECC. PNUD. Marzo 2013.

3.3.

Potencial de ahorros en la industria del Vidrio.

3.3.1. Consideraciones generales.

La actividad de fabricación de envases de vidrio, botellas, frascos y tarros tiene la característica diferenciadora respecto a cualquier otra actividad industrial de que requiere elaborar su propia materia prima, el vidrio.

Así, esta actividad está constituida por dos etapas: la obtención de vidrio y la elaboración de envases a partir de este material. Es importante mencionar, que la etapa de mayor repercusión económica, energética y ambiental es la de fusión del vidrio, que representa más del 75% del consumo total de energía y el 90% de la emisión de gases de efecto invernadero de la actualidad.

La industria de fabricación del vidrio mediante el proceso de fusión se caracteriza por un empleo intensivo de energía; en consecuencia, la técnica de calentamiento y el método de recuperación de calor utilizado son cruciales en el diseño del horno, equipamiento principal del proceso en cuanto a consumo energético.

Un horno eficiente puede ser de tipo bucle regenerativo, puesto que representa las mejores características para lograr el mayor aprovechamiento energético, debido a la mayor eficacia de su sistema de precalentamiento del aire de combustión.

Como consecuencia, su bajo consumo energético por tonelada de vidrio fundido produce reducción de los contaminantes asociados a la combustión. No obstante, las elevadas temperaturas de precalentamiento favorecen la formación de NOx. El empleo de medidas primarias de control de emisiones resulta beneficioso para la reducción en las emisiones de este contaminante.

El horno de fusión en esta industria es el de mayor capacidad de cada planta, suele representar alrededor del 40% de la producción de vidrio fundido. De esta manera, todas las medidas adoptadas para la reducir el impacto energético y ambiental asociado al mismo, afectan de manera muy positiva al conjunto productivo.

Los avances técnicos y tecnológicos introducidos en la industria son medidas denominadas primarias o de producción limpia, que, al actuar sobre el proceso industrial son las que realmente aportan soluciones, minimizando la contaminación e impidiendo que se produzcan impactos en el entorno más cercano.

Los principales beneficios de estos avances tecnológicos son:

- Reducción de emisiones de NOx por chimenea, lo que supone una mejora del importante del indicador [Kg NOx/tonelada vidrio fundido].

- Reducción de emisiones de CO₂.
- Reducción en al menos un 10% de consumo de energía por año para el indicador [MWh/tonelada vidrio fundido].
- Aumento del casco de vidrio introducido al horno, cantidad que se valoriza y no se deposita en vertederos.
- Reducción de materias primas a consumir anualmente debido al incremento en el uso de casco de vidrio.

3.3.2. Aspectos ambientales.

Es en la fase de diseño y desarrollo donde se estudian las medidas relacionadas con:

- Diseño de hornos y técnicas de fusión.
- Elección de combustible y control del proceso de combustión.
- Empleo de casco de vidrio en las composiciones.
- Técnicas de aprovechamiento del calor residual a partir de los gases generados en el proceso.

Por otra parte, el esfuerzo realizado en la reducción del consumo energético ha contribuido de manera positiva a la reducción de las emisiones de CO₂, dada la relación directa entre estas dos variables. El proceso de fusión de vidrio genera el 90% de las emisiones totales de CO₂, asociadas a la fabricación de vidrio hueco, por lo que todas las actuaciones efectuadas sobre los hornos para reducir la emisión de este contaminante se traducirán en efectos muy favorables.

Los valores asociados para el indicador de emisiones de CO₂, con respecto a la cantidad de vidrio fundido se han ido reduciendo progresivamente con respecto al valor de referencia solicitado por el Ministerio de Medio Ambiente de México para la industria vidriera en el año 2010.

El empleo de casco de vidrio como materia prima, además de reducir el consumo de materias primas, supone importantes ahorros energéticos ya que rebaja la temperatura de fusión y, por tanto, el consumo de combustibles. El casco de vidrio de origen interno generado “en casa” es, prácticamente reutilizado de nuevo en su totalidad, siempre que no contamine. La utilización de vidrio reciclado externo alcanza valores muy significativos, llegando a valores próximos al 80% de promedio de sustitución de materias primas.

El costo de la energía es uno de los factores determinantes a la hora de considerar los costos de inversión y de operación de un horno de fusión. Se debe tener en cuenta que el consumo energético representa entre el 20 y el 30% del costo total del producto final.

De hecho, este aspecto es uno de los que justifica en mayor medida el desarrollo e implementación de nuevos diseños de hornos y técnicas que conlleven mejoras de la eficiencia energética, además de las consideraciones medio ambientales que en los últimos años han resultado ser un factor determinante.

3.3.3. La Industria del vidrio ante sus retos competitivos y tecnológicos²⁵

- Presiones competitivas a que se enfrenta esta industria

En general, la industria del vidrio se enfrenta a dos retos preponderantes: la competencia de los materiales y la de los productores alternativos, en particular aquellos de las naciones en crecimiento.

Dada la naturaleza cambiante de la industria, cada uno de los productos recibe diferentes presiones y retos que, se asume, son bien conocidos por los actores del sector. Sin embargo, se hará especial hincapié en los retos tecnológicos dada su importancia con relación a la eficiencia energética.

- Retos tecnológicos

Para crear una base sólida para el futuro del vidrio, la industria debe orientar los avances tecnológicos a las siguientes áreas:

- Eficiencia productiva, incluidos los procesos mejorados de manufactura y técnicas nuevas que maximicen la resistencia y la calidad del vidrio.
- Eficiencia y conservación de la energía.
- Reciclaje.
- Protecciones ambientales, incluido el control de óxidos de nitrógeno, óxidos y partículas de azufre; reducción de residuos sólidos, y reúso de aguas residuales.
- Usos innovadores.
- Eficiencia productiva

La industria del vidrio intensificará sus esfuerzos para mejorar los procesos de fundición y refinamiento que ahorrarán energía y generarán más producto a menor costo. Esto puede incluir combustibles nuevos, inyección de oxígeno o nuevos usos para los combustibles existentes a fin de reducir los costos energéticos, así como el desarrollo de técnicas para fundir con rapidez el vidrio y eliminar impurezas para asegurar una mejor calidad del producto.

Los costos de transporte también disminuirán si los fabricantes se mudan cerca de sus clientes e inventan productos de vidrio nuevos y más ligeros. El desarrollo de modelos de computadoras que simulan condiciones de manufactura reales otorgará un método eficaz en términos de costo para probar ideas y procesos nuevos sin una inversión de capital grande.

La eficiencia productiva también se apoyará en la automatización en aumento, mejores prácticas de manejo de residuos, el reúso de aguas residuales y residuos sólidos vinculados con la hechura de vidrio y el creciente uso de vidrio reciclado en el proceso de fabricación.

En específico, se debe enfocar la atención en el desarrollo de:

- Sensores de temperatura de vidrio por contacto y sin contacto; sensores de temperatura y de espesor refractarios; sensores que detectan y evalúan las propiedades físicas del vidrio,

²⁵ Disponible en: <http://revistas.bancomext.gob.mx/rce/magazines/54/6/RCE.pdf>

como la viscosidad, durante la manufactura, y sensores y controles que integren y consoliden la fabricación de vidrio.

- Recubrimientos de vidrio que maximicen la resistencia.
- Compuestos alternativos de vidrio que minimicen o eliminen el uso de materiales potencialmente peligrosos.
- El manejo de equipo que elimine los daños de las superficies vítreas.
- Hornos de gas y eléctricos mejorados.
- Modelos de computadoras que simulen los procesos de fundición y refinamiento, el desempeño de los hornos, la formación de botellas (sector de envases de vidrio) y la caracterización del baño de estaño para mejorar el aplanado (sector de vidrio plano).
- Procesos que alcancen calidad “six sigma”²⁶.
- Eficiencia energética

La industria del vidrio debe encontrar medios económicos para disminuir el uso de combustible y rebajar los costos energéticos.

Las mejoras se dirigen a:

- Optimizar el impulso eléctrico para reducir el consumo total de energía.
 - Mejorar el diseño y la operación de hornos para maximizar la eficiencia de combustión.
 - Recuperar y reusar el calor residual de los hornos de calefacción a oxígeno.
 - Producir oxígeno con mayor eficiencia para la cocción por combustión de oxígeno.
-
- Reciclado

Una mayor conciencia en el uso racional de los recursos naturales y en las reducciones de residuos sólidos incentivará ganancias adicionales en el reciclado de la industria del vidrio.

Algunas mejoras específicas incluirán:

- Desarrollo de tecnología para reciclar el aislante de fibra de vidrio posterior al consumo.
 - Separación de vidrio reciclado por color.
 - Progresos en la preparación de desechos o residuos de vidrio.
 - Eliminación de contaminantes no vítreos que puedan dañar el equipo por el flujo de residuos del reciclado.
-
- Protección ambiental

²⁶ Six sigma es una filosofía (estrategia y disciplina) que ajusta los procesos con la mínima tolerancia posible como una forma de reducir los desperdicios, los defectos y las irregularidades tanto en los productos como en los servicios. Fuente: Ingeniería Industrial on line.

La inversión en tecnología para mantenerse a la par de las nuevas y más estrictas normas de control de contaminantes logrará progresos. Los beneficios incluyen operaciones con menos personal y menores costos de disposición de residuos.

Las iniciativas incluirán:

- Desarrollo de procesos de combustión que reduzcan las emisiones atmosféricas.
 - Uso extendido de la combustión 100% de oxígeno.
 - Elaboración de materiales alternativos o diseños de hornos que reduzcan o eliminen partículas.
 - Nuevos procesos de manufactura que generen menos residuos sólidos.
 - Reúso de aguas residuales o el uso de residuos sólidos como materia prima para otras industrias.
 - Creación de refractarios que no generen materiales peligrosos.
 - Eliminación de emisiones de haluros asociadas con algunos tipos de producción de vidrio especializado.
- Usos innovadores

Para el futuro de la industria del vidrio es esencial crear nuevos usos para él y aumentar el número de materiales existentes.

Las mejorías necesarias incluyen:

- Diseñar "ventanas inteligentes" que reaccionen a las condiciones naturales de luz y temperatura (sector de vidrio especializado).
- Elaborar contenedores y vidrio plano más ligeros y resistentes a impactos (sectores de envases y de vidrio plano).
- Desarrollar fibra de vidrio que se compacte y recupere su forma fácilmente (sector de fibra de vidrio).
- Crear diseños y componentes de fibra óptica capaces de transmitir mayores cantidades de información (sector de vidrio especializado).

3.3.4. Mercado del Vidrio en México²⁷

Pese a la aparición del PET (polietileno-tereftalato), el vidrio es uno de los materiales más utilizados para envasar bebidas y alimentos; la producción de este material en México posee un valor de alrededor de 3.000 millones de dólares, de acuerdo con la Asociación Mexicana de Envase y Embalaje (AMEE).

²⁷ Entrevista al presidente de la Asociación Mexicana de Envase y Embalaje (AMEE): http://www.milenio.com/negocios/Vidrio-solido-Mexico-produccion-crecera_0_611938833.html.

La industria del vidrio, que integra principalmente a ocho compañías, entre ellas, Vitro, Owens-Illinois, Vidrio Formas, Pavis, además de otras de menor tamaño, generó durante 2014 alrededor de 13.500 empleos directos.

El 80 % de la producción se destina a las necesidades del mercado nacional debido al tema de logística y distribución en los cuales interviene el peso, en tanto que el restante 20 % se exporta principalmente hacia Estados Unidos debido a la cercanía, y hacia algunos países de Centroamérica.

El crecimiento de esta industria va de la mano con otros sectores productivos: alimentos, bebidas alcohólicas, productos cosméticos y perfumería, principalmente. Más del 50% de los envases de vidrio, se destinan al mercado de bebidas espirituosas, principalmente para vino y cerveza.

La demanda que genera la industria ha hecho incorporarse al mercado de México a compañías foráneas, como el fabricante estadounidense de envases de vidrio Owens-Illinois, que en septiembre de 2014 anunció la adquisición del negocio de envases para alimentos y bebidas de la empresa mexicana Vitro, cuya operación tuvo un monto de 2.150 millones de dólares. La transacción, incluyó cinco plantas de envases situadas en México, una planta en Bolivia y la distribución de estos productos en Estados Unidos.

A continuación, se presentan las últimas novedades sobre inversiones en nuevas plantas y/o remodelación / ampliación de existentes en la industria del vidrio en México.²⁸ El listado indica estar ante la presencia de un sector dinámico de la industria manufacturera del país, en constante crecimiento, con un impacto positivo en incremento del PBI y generación de empleo genuino. Se trata de un sector de gran dinamismo, cuyas inversiones recientes implican una mejora de competitividad y productividad, acompañadas de mayor eficiencia energética y menores emisiones de GEI.

3.3.5. Consumo energético total en la industria del vidrio²⁹.

Evolución entre 2013 y 2016 (inclusive): + 16,2%³⁰.

Tabla 51: Consumo energético total en la industria del vidrio.

	2013	2014	2015	2016	2017
Industria	1,599.003	1,553.171	1,601.839	1,680.789	N/D
Siderurgia	208.077	212.275	222.344	242.744	N/D
Química	93.726	103.013	96.752	105.602	N/D
Azúcar	67.153	38.639	37.235	38.210	N/D
Petroquímica de PEMEX	116.428	103.823	74.410	66.120	N/D
Cemento	149.169	154.992	176.765	183.557	N/D
Minería	61.482	55.971	62.808	66.404	N/D

²⁸ Disponible en: <https://www.quiminet.com/noticias/industria/vidrio-626/>

²⁹ Fuente: Balance Nacional de Energía – Consumo final de energía por sectores – SENER.

³⁰ Se atribuye a la PEM de nuevas plantas de producción.

Celulosa y papel	49.818	44.357	49.937	59.412	N/D
Vidrio	55.366	59.099	59.293	64.327	N/D
Cerveza y malta	21.973	19.870	21.091	23.036	N/D
Fertilizantes	1.154	1.374	1.275	1.296	N/D
Automotriz	13.984	15.668	16.569	17.390	N/D
Aguas envasadas	9.531	9.728	10.211	10.872	N/D
Construcción	12.720	11.889	13.833	13.962	N/D
Hule	9.577	10.024	10.724	11.249	N/D
Aluminio	0.000	0.000	0.000	0.000	N/D
Tabaco	0.524	0.485	0.573	0.611	N/D
Otras ramas	728.320	711.964	748.020	775.995	N/D

Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

Tabla 52: Evolución de la Intensidad Energética (consumo de energía / unidades físicas de producción – toneladas).

Variable Año	Producción (miles de toneladas) (a) (b)	Consumo de energía (Petajoules, PJ) (c)	Intensidad energética (PJ/M toneladas)	Evolución interanual de la IE (%)
2013	4.433	55.366	12,49	-----
2014	4.759	59.099	12,42	-0,5
2015	5.113	59.293	11,60	-6,6 (d)

Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

- a. Global, toda clase de vidrios.
- b. Fuente: Base de Indicadores de Eficiencia Energética de la Conuee, con información de la Encuesta Mensual de la Industria Manufacturera (EMIM) del INEGI.
- c. Fuente: Balance Nacional de Energía (SENER).
- d. Podría indicar: 1) incorporación o adecuación con cambio tecnológico en el proceso en alguna (s) industria (s); 2) Una fuerte campaña sectorial de EE (improbable).

Puede concluirse que, en forma autónoma, la industria muestra una tendencia positiva en la evolución de su intensidad que podría reforzarse e impulsarse mediante políticas y estrategias orientadas hacia tal sector.

3.3.6. Referencias internacionales.

- Documentos BREF

Los Documentos BREF son los Documentos de Referencia Europeos sobre las Mejores Técnicas Disponibles en sectores industriales con relación a temas energéticos y ambientales, donde se establecen las conclusiones sobre estas técnicas, su descripción, la información para evaluar su aplicabilidad, los niveles de emisión asociados a ellas, las monitorizaciones asociadas, los niveles

de consumo asociados y, si procede, las medidas de rehabilitación de la instalación industrial de que se trate.

- Eficiencia energética para industria del vidrio en Unión Europea – Mejores Técnicas Disponibles

La MTD consiste en reducir el consumo específico de energía aplicando una de las técnicas siguientes o una combinación de las mismas:

Tabla 53: Técnicas y su aplicabilidad e la fabricación de vidrio.

Técnica	Aplicabilidad
I. Proceso de optimización mediante el control de los parámetros operativos	Las técnicas son de aplicación general
II. Mantenimiento periódico del horno de fusión	Las técnicas son de aplicación general
III. Optimización del diseño del horno y selección de la técnica de fusión	Aplicable en plantas nuevas. En el caso de las plantas existentes, la aplicación exige la reconstrucción completa del horno
IV. Aplicación de técnicas de control de la combustión	Aplicable a hornos de combustión de combustible-aire y oxicomustión
V. Utilización de niveles crecientes de casco de vidrio, cuando proceda y sea viable tanto técnica como económicamente	No es aplicable a los sectores de fibra de vidrio de filamento continuo, lana de aislamiento de alta temperatura y fibras
VI. Utilización de una caldera de calor residual para la recuperación de energía, cuando sea técnica y económicamente viable	Aplicable a hornos de combustión de combustible-aire y oxicomustión. La aplicabilidad y la viabilidad económica de la técnica dependerán de la eficiencia global que pueda obtenerse, incluyendo la utilización eficaz del vapor generado
VII. Precalentamiento de la mezcla y del casco de vidrio, cuando sea técnica y económicamente viable	Aplicable a hornos de combustión de combustible-aire y oxicomustión. La aplicabilidad suele limitarse a unas composiciones de la mezcla que contengan más del 50 % de casco de vidrio

Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

3.3.7. Oportunidades de eficiencia energética en la industria del vidrio.

A continuación, se presentan enlaces a una serie de tecnologías y medidas de ahorro energético para la industria del vidrio:

- Dosificación selectiva³¹

Técnica que puede utilizarse para disminuir la reacción química del álcali con los carbonatos alcalinotérreos, a manera de eliminar la formación de líquidos eutécticos de baja viscosidad en las

³¹ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/selective-batching>.

primeras etapas de la fusión, los que conducen a mayores tiempos de reacción y fusión. Esta tecnología puede reducir los tiempos de fusión y así optimizar el consumo energético.

El desarrollo con base en esta tecnología se ha centrado en el secado vía spray para la mezcla previa de las distintas materias primas. Para secar mediante spray el material, éste debe estar molido muy finamente, lo que ya se realiza para la producción de fibra de vidrio. Por lo tanto, las primeras aplicaciones de esta tecnología se centran en la producción de fibra de vidrio. La tecnología está siendo sometida a pruebas adicionales a una escala mayor y aún no está comercialmente disponible (Worrel et al., 2008. p.54).

- Combustión Oscilante³²

Es una nueva tecnología, que obliga a la oscilación del combustible en el quemador y con ello crear zonas sucesivas, una rica en combustible y, otra pobre en combustible dentro de la llama. Esto aumenta la transferencia de calor mediante la mejora de la luminosidad de la llama y su turbulencia.

También reduce las emisiones de NOx, evitando condiciones de combustión estequiométrica, las que crean temperaturas de llama máxima, ideales para la generación de NOx. La combustión oscilante se puede adaptar a quemadores existentes mediante la instalación de una válvula oscilante en la línea de alimentación de combustible para cada quemador y un controlador electrónico que maneje varias válvulas en simultáneo.

Puede ser adaptado en sistemas de encendido con aire a temperatura ambiente, aire precalentado, aire enriquecido y oxígeno. Se han completado varias demostraciones en campo hasta la fecha, incluyendo, hornos de fusión para fibra de vidrio (Ídem).

- Motores de velocidad variable o ajustable³³

Para aquellas situaciones donde la demanda de aire del horno presenta variaciones en el tiempo en tanto que el aire de enfriamiento y los ventiladores de chimenea funcionan continuamente, el uso de motores de velocidad ajustable (ASD) para los ventiladores de aire de combustión puede ofrecer una oportunidad de ahorro de electricidad.

Para hornos con altas variaciones en la demanda de calor (por ejemplo, en hornos de pequeña escala usados de manera intermitente) también puede ayudar a reducir el consumo de combustible mediante la reducción del exceso de aire (Worrel et al., 2008. p.60).³⁴

- Hornos “end-fired”³⁵

³² Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/oscilating-combustion-glass-production>

³³ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/adjustable-speed-drives-combustion-air-fans>

³⁴ Más información sobre la aplicación de velocidad ajustable en sistemas accionados por motores está disponible en <http://ietd.iipnetwork.org/content/variable-frequency-drives>

³⁵ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/end-fired-furnaces>

Los hornos con tecnología “end-fired” ofrecen mayor eficiencia y menores costos de inversión comparados con hornos “cross-fired”. Sin embargo, su capacidad está limitada a capacidades del orden de las 150 t/día (Worrel et al., 2008. p.63).

- Quemadores “oxyfuel”³⁶

Los quemadores de tecnología “oxyfuel” tienen baja luminosidad de llama y tienden a incrementar las emisiones de NOx en caso de ingresos de aire no deseados debido a altas temperaturas de llama. Los quemadores de alta luminosidad apuntan a tratar con estos inconvenientes. El quemador de alta luminosidad y baja emisión de NOx combina una zona de precalentamiento con dos zonas de combustión.

En primer lugar, se quema una pequeña fracción del gas natural. Los productos de esta combustión se mezclan con el suministro principal de gas natural, dando por resultado precursores de hollín de hidrocarburo, generados en un ambiente de calentamiento libre de oxígeno. El gas natural precalentado luego entra en la primera zona de combustión, rica en combustible, en la que se forma hollín en la llama.

La mayor parte de la combustión, sin embargo, se produce en la segunda zona de combustión, pobre en combustible. Las partículas de hollín crean una llama muy luminosa que es térmicamente más eficiente y más fría que una llama de oxyfuel típica (US DOE, 2007). La temperatura de llama más baja conduce a la reducción de las emisiones y extiende la vida útil del horno (Worrell et al., 2008. p.66).

- Uso de residuos de vidrio³⁷

El uso de residuos de vidrio en un horno de fusión puede reducir significativamente el consumo de energía porque el desecho tiene requerimientos menores en cuanto a consumo de energía en la fusión que las materias primas constituyentes – desde el momento que las reacciones químicas endotérmicas asociadas con la formación de vidrio ya se han completado y su masa es aproximadamente un 20% menor que los materiales del batch equivalente.

Sin embargo, algunos de los ahorros de energía logrados pueden compensarse debido a los consumos energéticos en la trituración, limpieza, clasificación y transporte de los residuos de vidrio. Además de ahorrar energía, el uso de residuos de vidrio reduce la cantidad de materia prima utilizada, disminuye el uso de la energía en la producción de las materias primas y aumenta la vida del horno hasta un 30% debido a la menor temperatura de fusión y a un lote de carga menos corrosivo (Worrell et al. 2008. p. 67).

- Control del sistema de enfriamiento³⁸

Debido al hecho de que las propiedades del vidrio son una función de la temperatura, se dificulta el control del sistema de enfriamiento a la salida del horno de fusión (“forehearth”). Este control

³⁶ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/high-luminosity-burners-oxyfuel-furnaces>

³⁷ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/increased-cullet-use>

³⁸ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/forehearths-process-control-infrared-analysis-system>

es particularmente importante en la industria de envases de vidrio, donde es crítico el control, no sólo de la temperatura sino también del peso constante para formar una botella. Un control adecuado reduce el número de rechazos, lo que a su vez aumenta la productividad y ahorra energía (Worrell et al., 2008. p. 70).

Foreheart eléctrico³⁹

El rendimiento del sistema de enfriamiento a la salida del horno de fusión (“forehearth”) está determinado por la tasa de extracción del horno de fusión, por las temperaturas de la masa de vidrio dentro de las cuales el sistema es capaz de mantener un grado aceptable de homogeneidad, por la velocidad de respuesta del sistema “forehearth” y su capacidad para mantener la estabilidad de la temperatura. Su formato de “roofblock”, el número, la posición y el tamaño de los tubos de escape, el grado de controlabilidad de la combustión y de los escapes de enfriamiento y la uniformidad en la distribución de la temperatura y la viscosidad son parámetros importantes en el diseño de un “forehearth” eficiente.

Un diseño eficiente es un “forehearth” eléctrico con refrigeración indirecta. El calor es generado por los electrodos en el vidrio fundido mientras que el enfriamiento se proporciona mediante radiación indirecta por alimentación de aire fresco en conductos a través del “forehearth”. Sistemas de control regulan tanto el calentamiento como el enfriamiento (Worrell et al., 2008. p.71).

Quemadores de premezcla⁴⁰

Quemadores individuales de gas y aire generalmente operan con un 10% de exceso de aire y son a menudo difíciles de controlar. Los quemadores de premezcla son una manera de reducir la infiltración de aire en exceso y así disminuir el consumo de energía. Se han aplicado exitosamente por muchos años en “forehearths”, alimentadores, hornos de fusión y en hornos tipo “lehrs”, en la industria del vidrio.

Variadores de velocidad (ASD)⁴¹

Los variadores de velocidad (ASD) ofrecen una estrategia eficiente y efectiva en respuesta a la demanda, en comparación con otros sistemas. Para más información, ver: <http://ietd.iipnetwork.org/content/variable-frequency-drives>

Hornos regenerativos⁴²

Los hornos regenerativos tienen dos cámaras, cada una conteniendo material refractario llamado “checker”. Mientras que en una cámara los gases de combustión pasan por el “checker” y entran en el horno, en la otra cámara el “checker” se calienta, o es regenerado con el gas de escape caliente.

³⁹ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/more-efficient-forehearts>

⁴⁰ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/premix-burners>

⁴¹ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/adjustable-speed-drives-compressor-motors>

⁴² Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/regenerative-furnaces>

El horno funciona en dos ciclos, donde, aproximadamente cada 20 minutos el flujo se invierte para que el nuevo aire de combustión puede ser calentado por el “checker”. Las temperaturas típicas de aire precalentado (según el número de puertos) están normalmente en el rango de 1200-1350 ° C, a veces hasta 1400 C (IPTS/CE 2012. p.47). Los hornos regenerativos son muy comunes en esta industria.

Horno de corona alta⁴³

En algunos hornos con tecnología oxy-fuel, la corrosión por sílice puede disminuir la duración del ciclo de producción y puede incluso tener un efecto adverso sobre la calidad del producto. El llamado “horno de corona alta” no ha presentado casi corrosión por sílice, incluso después de una campaña de 9 años. La vida del horno se estima en 10 a 11 años.

Pre calentamiento de residuos⁴⁴

El lote o batch y el residuo de vidrio se introducen normalmente fríos al horno. Utilizando el calor residual de éste – aplicable sólo para hornos que utilicen combustible fósil – se puede lograr un importante ahorro de energía. Además del ahorro, esta técnica puede brindar un aumento en la capacidad del horno de 10-15% sin comprometer la vida de éste. Se requerirán inversiones en equipamiento e infraestructura aguas abajo del horno para poder utilizar cualquier aumento en la capacidad de extracción de vidrio. Los costos, en particular los relacionados con las máquinas de mayor capacidad, podrían ser significativos. (IPTS/CE 2013. p. 319-320)

Control de enfriamiento⁴⁵

El control del proceso de enfriamiento del vidrio fundido es particularmente importante en la fabricación de envases, donde resulta crítico el control no sólo de la temperatura sino también del peso constante de la masa vítrea. Un control adecuado reduce el número de rechazos, lo que a su vez aumenta la productividad y ahorra energía.

Sistemas de control de procesos⁴⁶

Los sistemas computarizados de control de proceso se aplican en diversas industrias con el fin de mejorar la productividad, la calidad del producto y la eficiencia de una línea de producción. También ayudan a reducir el consumo de energía de manera directa (por ejemplo, reduciendo el tiempo de residencia) o indirecta (mediante la reducción de defectos).

Mientras que el control del proceso orientado a eficiencia energética en un tanque de fusión de vidrio es muy importante, también es difícil de lograr, ya que los sensores necesarios deben ser resistentes a los ambientes agresivos y a las altas temperaturas que imperan en el tanque de fusión (Worrell et al., 2008. p.57).

⁴³ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/tall-crown-oxyfuel-furnaces>

⁴⁴ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/batch-and-cullet-preheating>

⁴⁵ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/forehearths-process-control-continuous-gob-monitoring-system>

⁴⁶ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/computerized-process-control>

El uso de sistemas de control modernos y computarizados en la industria del vidrio es relativamente escaso, pero está aumentando con la colocación en el mercado de nuevos productos y sistemas. Más información en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/computerized-process-control>.

Captura de calor⁴⁷

La temperatura de los gases de combustión que salen del regenerador está generalmente entre 300 y 600 °C y puede ser utilizada para generar vapor. La captura del calor desaprovechado se puede hacer antes del lavado de los humos o después de la limpieza del gas (Worrell et al., 2008. p.60). La cantidad de calor que puede recuperarse depende de las temperaturas de salida de los gases, la que se limita a alrededor de 200° C para evitar la condensación en los tubos de la caldera (IPTS/CE, de 2013, p. 316). El vapor producido puede utilizarse para generar energía (mediante turbinas de vapor), accionar sopladores y/o compresores y/o precalentar y/o secar el residuo de vidrio en la carga (Worrell et al., 2008. p.60).

Hornos de llama vertical⁴⁸

En lugar de disponer los quemadores de manera horizontal, estos hornos dirigen las llamas casi verticalmente hacia la superficie del lote o batch. Este sistema de fusión puede suministrar más energía por unidad de superficie de lote sin aumentar la temperatura de los refractarios más allá de los límites de su funcionamiento normal.

Por lo tanto, el horno puede fundir más vidrio o generar un vidrio de calidad superior para un horno de tamaño determinado (Worrell et al., 2008. p.62). La conversión a hornos de fuego vertical, combinado con un aumento de oxígeno, han demostrado lograr un aumento de la tasa de pureza superior al 50%, sin afectar las emisiones o la química del vidrio, sino por el contrario, reducir defectos.

Fusión mediante tecnología Oxy-fuel⁴⁹

La fusión de vidrio mediante tecnología Oxy-fuel implica la sustitución del aire de combustión por oxígeno (> a 90% de pureza). La técnica puede utilizarse con gas natural o derivados del petróleo como combustibles, aunque es más común el uso de gas.

La técnica potencialmente implica ahorros de energía inmediatos, ya que no es necesario calentar el nitrógeno contenido en el aire atmosférico a la temperatura de la llama. Se calienta menos aire de combustión y, por tanto, se pierde menos energía con los gases residuales del horno (IPTS/CE 2013, p. 226). El ahorro de energía de convertir un horno clásico a uno con Oxy-fuel depende de la cantidad de energía consumida por el horno actual, uso de aporte eléctrico, entradas de aire, tipo de vidrio y del uso de vidrio de desecho en la carga (Worrell et al., 2008. p. 64).

Fusión eléctrica⁵⁰

⁴⁷ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/waste-heat-boilers>

⁴⁸ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/vertically-fired-furnaces>

⁴⁹ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/oxy-fuel-furnaces>

⁵⁰ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/electric-melting>

El uso de fusión eléctrica en tanques para producción de vidrio se aplica típicamente para la fabricación de productos especiales o para capacidades más pequeñas, generalmente inferior a 75 t/día (Worrel et al., 2008. p.69). La fusión eléctrica ofrece una mayor eficiencia térmica en comparación con los hornos que queman combustibles fósiles. La sustitución total de combustibles fósiles en el horno elimina la formación de productos de combustión en el mismo. El rendimiento energético global y la cantidad de emisiones dependen, sin embargo, de la naturaleza de la producción y de la distribución de la energía eléctrica utilizada (IPTS/CE 2013. p. 171-172).

Principales ventajas y desventajas de la fusión eléctrica:

Ventajas

- Muy bajas emisiones directas;
- Potencialmente, mayor tasa de fusión por m² de superficie de horno;
- Mejor eficiencia energética directa;
- En algunos casos, se reducen los costos de materia prima;
- En algunos casos, la fusión eléctrica brinda una calidad mejor y más homogénea del vidrio;
- Reducción de costo de capital y menores requerimientos de espacio para el horno;
- Operación potencialmente más sencilla.

Desventajas

-
- Alto costo operativo;
- Duración menor de la campaña;
- En la actualidad, no es técnica ni económicamente viable para la producción de vidrio a gran escala;
- Tecnología menos flexible y no adaptada a las variaciones de extracción en la producción de vidrios de alta calidad;
- Implicaciones ambientales asociadas por la generación de energía eléctrica (off-site) (IPTS/CE 2013. p. 173)

Control de enfriamiento⁵¹

Las propiedades físicas del vidrio en función de la temperatura dificultan el control del sistema de enfriamiento a la salida del horno de fusión (“forehearth”). Este control es particularmente importante en la industria del envase de vidrio donde no sólo es crítico el control de la temperatura sino también del peso constante de la masa vítrea. Un control adecuado reduce el número de rechazos, lo que a su vez aumenta la productividad y ahorra energía.

BrainWave™ es un controlador de proceso avanzado y adaptativo (APC) para “forehearths”. Según sus desarrolladores, el sistema reduce el tiempo requerido por los sistemas de control típicos para disminuir la temperatura del vidrio en un 50%, con incrementos en la producción desde 3,75 hasta 20% (para los envases comunes) y a 40% (envases especiales). Esto reduce la cantidad de vidrio

⁵¹ Disponible en: <http://ietd.iipnetwork.org/content/forehearths-process-control-advanced-adaptive-process-control>

desechado y así disminuye el consumo específico de energía. Las necesidades de mantenimiento también se reducen. A diferencia del sistema de control proporcional, integral, derivativo (PID), no es necesario el reajuste para el sistema APC (Worrel et al., 2008. p.70).

3.4.

Potencial de ahorro de energía (según medidas recomendadas, mejores prácticas y cambios de tecnologías)

A continuación, se presenta una selección de medidas de ahorro recomendadas y sus respectivos potenciales de ahorro energético, inversiones y periodos de repago simple y lugares donde se aplicó la medida (cuando existe esta información), para la etapa de proceso correspondiente a “Melting and refining” (fusión y refinado)⁵².

Tabla 54: Medidas recomendadas de ahorro para la industria del vidrio y sus características.

Medida recomendada	Potencial de ahorro (%)	Beneficio colateral	Inversión estimada	Periodo de repago simple	Lugar donde se aplicó
Control computarizado del proceso mediante la aplicación Expert System™ (Glass Max)	2 a 3% -	Incremento en la producción de hasta 8%	150.000 US\$	< a un año	Planta de vidrio en Canadá
Incremento de la cantidad de vidrio reciclado (cullet)	Como regla general, cada 10% de aumento en la cantidad de vidrio reciclado resulta en un 2,5 a 3 % de ahorro de energía. De estudios en Alemania/Austria, se estima que cada 1 % de aumento en peso de vidrio reciclado genera 8 MJ de ahorro de energía	Depende de disponibilidad y costos de vidrio residual	S/D	S/D	Estatus: comercial, generalizado a la industria
Mejora en recubrimiento refractario y aislaciones	Según un proveedor de ladrillos refractarios, su producto reduce entre 1 y 1,5 % la factura energética de la planta. Se podrían conseguir ahorros de hasta 7% sustituyendo los ladrillos refractarios en la sección de regeneración con materiales especiales (Worrell et al, 2008, pág.61)	S/D	S/D	S/D	Estatus: comercial

⁵² Las descripciones correspondientes a medidas de eficiencia energética en los siguientes procesos de la industria del vidrio: a) Batch preparation; b) Conditioning and forming; c) Finishing; d) Compressed air systems in glass industry y e) Motor systems in glass industry se encuentran en Anexos; en ellos se agrega “Melting and Refining” completo.

Medida recomendada	Potencial de ahorro (%)	Beneficio colateral	Inversión estimada	Periodo de repago simple	Lugar donde se aplicó
Selección de combustible	El uso de fuel-oil se considera un 7-8 % más eficiente en términos de energía que el uso de gas natural (hasta el momento).	En términos ambientales (emisiones) el uso de gas natural provoca menos impacto.	S/D	S/D	Estatus: comercial
Uso de hornos con tecnología "end-fired"	Comparado con hornos con tecnología "cross-fired" la eficiencia térmica "end-fired" es 10% superior. (1) Planta en Reino Unido: cambio de tecnología en el horno más otras medidas adicionales produjeron ahorros energéticos del 12,2 % (Worrell et al, 2008)		Comparado con hornos "cross-fired", el ahorro en inversiones se estima en un 20% (Worrell et al, 2008, pág. 63) (1) 305.000 US\$	1 año (1): 7 meses	Planta en Croacia (1): Planta en Reino Unido
Sustitución de horno 100% eléctrico por una combinación de horno de fusión eléctrico y precalentador batch a gas natural	9 GWh/año de energía eléctrica. Consumo de gas: 3,5 Gwh/año		208.000 US\$ (precios de 2003)	1, 2 años	Planta de vidrios especiales en USA. Estatus: comercial.
Utilización de quemadores con premezcla aire/combustible	Hasta 11 % de ahorro (Worrell et al, 2008)	S/D	S/D	S/D	Estatus: comercial
Hornos recuperativos (precalentamiento de aire)	Hasta un 30% de ahorro energético en relación a hornos con aire frío		Caso India: 0,3 millones de rupias. Ahorros: 0,88 millones rupias /año	Entre 7 y 14 meses (en general, dependiendo del precio de la energía). En India, 5 meses	Planta en India
Electrodos de fusión en tope	Ahorro neto: 4 %	Mejora de calidad de producto		1,3 años	Planta en Suecia
Optimización del exceso de aire de combustión	10%				Práctica generalizada
Utilización de quemadores sellados al ingreso de aire frío	Reducir un 5% el ingreso de aire frío provoca un ahorro del orden del 2 a 3%.		Caso en Reino Unido: instalación de anillos de cierre a la entrada de aire frío a	4meses	Planta en Reino Unido

Medida recomendada	Potencial de ahorro (%)	Beneficio colateral	Inversión estimada	Periodo de repago simple	Lugar donde se aplicó
			quemadores generó 1% de ahorro de combustible		
Pre calentamiento de la carga (batch) y del vidrio reciclado	Reducción de 90 kWh/t de electricidad y 8% de gas natural.	Incremento de la producción de 450 a 500 ton/día	Para una planta de 450 t/día: 3,4 millones de euros	3 años	Planta en Holanda
Uso de hornos con tecnología oxy-fuel y pre calentamiento	20 a 50% en general. Caso en Alemania, 35 % de ahorro energético.		Costos de instalación elevados		Fabricante de envases en Alemania
Uso de burbujeo de oxígeno	El burbujeo de oxígeno puede aumentar la eficiencia del intercambio de calor en un 10-15%.				Con la introducción de burbujeo de oxígeno (en la etapa de diseño) una planta en Holanda ahorró 4 millones de kWh al año, equivalente a 170 kWh/t-productos
Uso de variadores de velocidad ajustables en ventiladores de aire para combustión	Ahorro de 800.000 kWh/año			1,7 años	Planta en USA

Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

Tabla 55: Síntesis de potencial de ahorro de energía

(En función del consumo energético señalado en página anterior)

Tipo de medida	Porcentaje estimado de ahorro	Potencial de ahorro de energía anual (en Petajoules) (1)	
Por el sólo hecho de comenzar a medir los consumos	5	3.200	
Por "housekeeping"	Hasta 10	Hasta 6.400	
Por auditorías, mejores prácticas, otros estudios, incluidos SGE	10 - 25	Entre 6.400 y 16.000	
Por cambio tecnológico	25 -40	Entre 16.000 y 25.700	

Estimado en base a cifras del Balance Nacional de Energía de México 2016, sector industrial, vidrio.

3.5.

Benchmarking por tipo de vidrio producido

Valores típicos de consumo específico de energía, aplicando medidas / técnicas de eficiencia de energía.

Tabla 56: Valores típicos de consumo específico de energía en la producción de vidrio.

Clase de vidrio	Tipo de horno y capacidad	Consumo energético del horno (GJ / tonelada de vidrio fundido)	Consumo energético total (GJ por tonelada de producto terminado)
Vidrio para envases			
Botellas y recipientes	< a 100 ton/día	5,5 – 7,0	< a 7,7
	> a 100 ton/día	3,3 – 4,6	
	Hornos eléctricos	2,9 – 3,6	
Vidrio para envases de productos valiosos ("Flacconage")	< a 100 ton/día	7,0 -9,0	< a 16
	> a 100 t/día	4,8 – 6,0	
Vidrio plano			
	Todas las capacidades	5 -7	< a 8
Fibra de vidrio (filamento continuo)			
	Todas las capacidades	7 - 14	< a 20
Vidrio de uso doméstico			
	Hornos convencionales		< a 24 para capacidades menores a 100 t/día; < a 18 para capacidades mayores a 100 t/día
	< a 100 t/día	6,7 – 9,5	
	> a 100 t/día	5,0 – 6,0	
	Hornos eléctricos	3,4 – 4,3	
Vidrios especiales			
Todos los productos (como materia prima)	Hornos eléctricos	3,9 – 4,5	< a 20
Dióxido de silicio SiO ₂ – Óxido de Calcio OCa - Óxido de Sodio ONa ₂ - Cal	Hornos convencionales	5 - 10	
Vidrio boro silicato		10 - 15	
Lana mineral			
Lana de vidrio	Todas las capacidades	2,7 – 5,5	< a 14
Lana de roca volcánica (Stone wool)	Todas las capacidades	4,2 – 10	< a 12
Lana aislante para alta temperatura			
	Todas las capacidades	6,5 – 16,5	< a 20
Composición cerámica (frits)			
	Hornos con tecnología "oxy-fired"	< ó = a 9	
	Hornos aire/combustible u hornos aire/combustible enriquecido	< ó = a 13	

Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

3.6.

Datos clave: información general de tipo de producción de vidrio, distribución regional, entre otros.

La industria del vidrio se divide en cuatro segmentos principales. Estos segmentos y su cuota de mercado aproximada son los siguientes:

- a. Vidrio para botellas y otros recipientes: 45%
- b. Vidrios especiales: 33%
- c. Vidrio plano: 16%
- d. Fibra de vidrio: 6 %

A pesar de que el vidrio plano representa sólo el 16% de la industria mundial del vidrio, la mayoría de la información sobre la estructura del mercado se centra en este segmento.

El mercado mundial de vidrio plano en 2010 fue de aproximadamente 56 millones de toneladas, dominado por Europa, China y América del Norte, los que en conjunto representan alrededor de 3/4 partes de la demanda mundial de vidrio plano. De la demanda total del mercado global en 2010 se estima que 33 millones de toneladas fue de vidrio flotado de alta calidad (vidrio para construcción), 1 millón de toneladas para vidrio en placas (para puertas, ventanas, etc.) y 2 millones de toneladas de vidrio laminado.

Los restantes 20 millones de toneladas reflejan la demanda de vidrio construcción de inferior calidad, producido principalmente en China. La importancia de China como un mercado productor de vidrio se ha incrementado rápidamente desde la década de 1990, cuando este país se abrió a la inversión extranjera y la economía se expandió. En la década de 1990, China representaba aproximadamente un 20% de la demanda mundial de vidrio, pero en 2010 ya representaba el 51%.

La industria del vidrio está dominada por un conjunto de grandes fabricantes, activos principalmente en los sectores del vidrio plano y envases.

Desde la década de 1960, la industria del vidrio en su conjunto ha reducido el consumo específico de energía a razón de 1.5% por año, aproximadamente. Al presente, esta cifra es menor, ya que se están alcanzando los límites termodinámicos.

4. Potenciales de ahorro en la industria de Papel

La producción de papel proviene de dos vías principales: la transformación de fibras vegetales vírgenes a partir de la producción de pulpa de celulosa y la confección pulpa de celulosa de fibra secundaria proveniente del reciclado de papeles y cartones. Aunque con una tendencia declinante, la proporción de papel producido a partir de fibra virgen respecto a fibra secundaria reciclada sigue siendo superior, no bajando por lo general de la relación 55-45%, tanto en Europa como en los Estados Unidos [ICF 2015, PERL 2015]. El caso mexicano es diametralmente opuesto, donde casi el 90% de la materia prima es fibra secundaria.

Internacionalmente, el proceso de producción de pulpa a partir de fibra virgen más utilizado es el proceso químico de sulfatos, conocido como proceso Kraft. En México es el proceso Kraft el que posee mayor importancia para el tratamiento de la fibra virgen. El proceso de fabricación de pulpa originado en el acondicionamiento de fibra secundaria a veces es considerado un proceso equivalente a la obtención de pulpa mecánica, ya que es necesaria una importante acción mecánica para separar las fibras. Adicionalmente, es un proceso que requiere mucha menor cantidad de energía que el proceso químico (menos de la mitad), como se verá a continuación. Sin embargo, la intensidad energética de este proceso varía de manera muy importante con el tipo de insumo a reciclar, con el grado de contaminación a remover, así como con el rendimiento de pulpa esperado y su destino.

En términos de consumo de energía y análisis de los potenciales de eficiencia energética, se proponen dos matrices de fuentes y usos para el caso bajo análisis de complejo productivo de pulpa y papel mexicano. La primera refleja la producción de papel a partir de fibra virgen trabajada con el proceso Kraft, la segunda considera el proceso a partir de fibra secundaria proveniente del reciclado.

4.1.

Matrices de fuentes y usos para el proceso KRAFT y para la elaboración de papel a partir de fibra secundaria reciclada.

Desagregando los procesos requeridos para la producción de papel a partir de las dos vías mencionadas, se obtiene una estimación de consumo específico como la indicada en la tabla siguiente.

Tabla 57: Estimación de los usos y requerimientos energéticos por proceso agregado

Proceso (GJ/Tonelada pulpa)	Combustible	Electricidad	Vapor	Total de Energía
Descortezado y Chipecado		0.47		0.5
Pulpado Kraft		0.53	2.22	3.3
Recuperación Kraft	3.09	0.33	5.06	9.7
Pulpado fibra reciclada		0.53	0.84	1.6
Blanqueado		0.42	0.5	1.0
Producción de papel		2.5	4	7.5
Total proceso Kraft	3.09	4.25	11.78	22.1
Total proceso RFC (reciclado)		3.4495	5.344	10.1
Total con pulpa importada		2.922	4.5	8.5

Fuente: Elaboración propia en el marco del presente estudio.

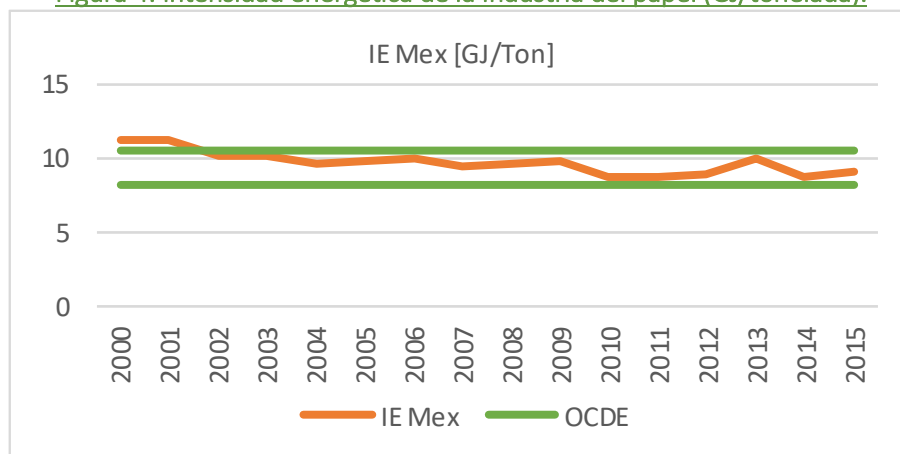
La matriz que se asociará a la producción Kraft partiendo del insumo virgen corresponderá a la tabla completa (excluyendo la fila en celeste de pupado de fibra reciclada). La matriz estimada para la producción de papel reciclado es aquella que comienza en la cuarta fila (en color celeste). Para el proceso de producción de papel partiendo de la pulpa importada se adoptará una matriz únicamente con los dos últimos procesos, coloreados en gris. La columna de total de energía por tonelada de papel asume para el vapor una eficiencia de producción del 80%.

4.2.

Consumo energético asociado en la industria mexicana

La elevada utilización de fibra secundaria y la baja producción de celulosa nacional permiten explicar en términos generales la baja intensidad energética observada para esta rama industrial respecto de los valores internacionales. Se muestra a continuación la evolución del consumo para MX con una comparación del promedio europeo ponderando los procesos 90% con insumo reciclado y 10% de fibra virgen.

Figura 4: Intensidad energética de la Industria del papel (GJ/tonelada).



Fuente: Elaboración propia a partir del estadísticas nacionales y bibliografía (EC 2001).

De la comparación internacional puede notarse que el potencial de eficiencia, por la mera adopción de tecnologías usadas internacionalmente es bajo, no superando el 5-10%. La adopción las mejores tecnologías disponibles, equivalentemente al caso del promedio de las industrias en OCDE, podría sin embargo ampliar dicho potencial, como se verá.

Para el caso mexicano se puede reconstruir el consumo energético térmico y eléctrico de la industria de la pulpa y el papel y aproximarla al Balance Nacional de Energía 2015 a partir de las matrices presentadas. Los resultados obtenidos aproximan muy bien los valores de demanda de combustibles consignados en el Balance Nacional 2015 del sector papel y pulpa⁵³. La energía eléctrica estimada, sin embargo, sobrepasa de manera importante el valor del BNE que se encuentra en 10.9 PJ, indicando posiblemente la existencia de energía cogenerada no registrada. Ya que utilizando los valores registrados por CRE pueden explicarse 1.9 PJ de energía de eléctrica cogenerada, restando aún unos 8 PJ estimados, pero no presentes en la estadística. Tal como se muestra en la matriz siguiente.

Tabla 58: Estimación Consumo de energía térmica y eléctrica por proceso de producción de pulpa y papel en México – Año 2015

Requerimientos estimados	Tonelada fibra (mil Tonelada)	EE (GJ/t)	Comb (Gj/t)	EE (PJ)	Comb(PJ)
Kraft (GJ/Tt pulpa)	0.136	4.3	16.9	0.6	2.3
Reciclado (GJ/t pulpa)	5.45	3.4	6.3	18.8	34.3
Con pulpa importada (GJ/t)	0.588	2.9	5.3	1.7	3.1
Total:				21.1	39.7

Fuente: elaboración propia en base a [Cámara, 2017], [IETD, 2017], [EC, 2001], [Cámara, 2011]

Nota: intensidades energéticas por tonelada de fibra, no de papel

4.3.

Potencial de eficiencia energética en la industria de papel y celulosa

Dado el peso que posee el proceso de fabricación de papel en base a fibra secundaria en el total del consumo energético de esta rama industrial (84%), se considera que los mayores esfuerzos de eficiencia energética deberían centrarse en este subsector.

⁵³ Según el BNE 2015 el consumo de combustibles del sector se encontró en 39.04 PJ mientras que el de electricidad fue de 10.9 PJ.

Debido al importante peso de la fuerza motriz en la vía de producción a partir de fibra secundaria, será importante el efecto de sistemas de control y variadores de frecuencia para los motores involucrados. La instalación de estos sistemas de control puede conducir a ahorros estimados en 0.6 GJ/tonelada de papel con inversiones rondando los 6 USD/t [Martin, 2000].

Adicionalmente se evaluará el impacto de aumentar la cogeneración. Las industrias papeleras poseen un balance de consumo térmico-eléctrico que las hace muy aptas para cogenerar la electricidad necesaria al tiempo que se produce vapor, generando incluso excedentes exportables. Esta situación incluso aplica a las configuraciones que usan fibra secundaria a reciclar como materia prima [EC, 2001]. Muchas veces el costo de compra a la red o las barreras de venta de excedentes impiden su desarrollo. Se evaluará el potencial remanente suponiendo el caso de llegar a una cogeneración de auto abasto completo. Se estima que la cogeneración en las operaciones de fabricación de papel en base a fibra secundaria puede reducir la compra de electricidad prácticamente a cero (3 kWh/t [EC, 2001]).

Se analizará el uso de los residuos del proceso para desplazar combustible fósil en calderas. El residuo generado representó en el año 2015 el 12.8% de la fibra procesada.

En el proceso de fabricación de papel adicionalmente a la cogeneración para reducir las compras eléctricas y mejorar la utilización global de la energía, existen otras medidas relevantes.

A continuación, se presenta un listado de medidas de las que se seleccionaron aquellas con mejores indicadores económicos para su implementación, así como aquellas con mayores reducciones posibles. Las que resultaron convalidadas por los actores del sector fueron evaluadas en el modelo energético global LEAP para estimar su impacto y conveniencia a nivel nacional.

Tabla 59: Medidas a implementar en la industria del papel

Measure	Production	Fuel Savings	Electricity Savings	Primary Energy Savings	Carbon Savings	Retrofit Cost of Measure	Annual Operating Cost Change	Applicable Share of Production
	(Mt)	(GJ/t)	(GJ/t)	(GJ/t)	(kgC/t)	(US\$/t)	(US\$/t)	(%)
Papermaking								
Grap forming	82.5	0.00	0.15	0.30	4.7	70.0	0.7	35%
High consistency forming	70.6	1.50	0.15	2.43	18.2	70.0	0.7	20%
Extended nip press (shoe press)	82.5	1.60	0.00	2.28	14.4	37.6	2.2	40%
Hot pressing	82.5	0.61	0.00	0.87	5.5	25.7	0.0	10%
Direct drying cylinder firing	82.5	1.05	0.00	1.50	9.5	111.2	1.4	50%
Reduced air requirements	82.5	0.76	0.02	1.12	7.5	9.5	0.1	40%
Waste heat recovery	82.5	0.50	0.00	0.71	4.5	17.6	1.6	30%
Condebelt drying	82.5	1.60	0.07	2.43	16.7	28.2	0.0	50%
Infrared profiling	82.5	0.07	-0.08	0.84	3.8	1.2	0.0	15%
Dry sheet forming	82.5	5.00	-0.75	5.59	21.2	1504.0	0.0	15%
General Measures								
Optimization of regular equipment	82.5	0.00	0.10	0.20	3.4	N/A	1.0	30%
Energy-efficient lighting	82.5	0.00	0.05	0.10	1.6	1.20	-0.01	20%
Efficient motors systems	82.5	0.00	0.62	1.25	19.6	6.00	0.0	100%
Pinch analysis	82.5	1.79	0.00	2.54	16.1	8.00	0.0	20%
Efficient Stream Production and Distribution								
Boiler maintenance	82.5	1.26	0.00	1.79	11.3	0.0	0.06	20%
Improved process control	82.5	0.54	0.00	0.76	4.8	0.4	0.08	50%
Flue has heat recovery	82.5	0.25	0.00	0.36	2.3	0.7	0.09	50%
Blowdown steam recovery	82.5	0.23	0.00	0.33	2.1	0.8	0.11	41%
Steam trap maintenance	82.5	1.79	0.00	2.54	16.1	1.2	0.09	50%
Automatic steam trap monitoring	82.5	0.89	0.00	1.27	8.0	1.2	0.16	50%
Leak repair	82.5	0.54	0.00	0.76	4.8	0.3	0.03	12%
Condensate return	82.5	2.68	0.00	3.81	24.1	3.8	0.54	2%
Fiber Substitution								
Increase use of recycled paper	60	13.4	2.1	22.4	186	485	-73.9	15%

5. Potencial de ahorros en la industria Química

5.1.

Caracterización económica y productiva de la Industria Química

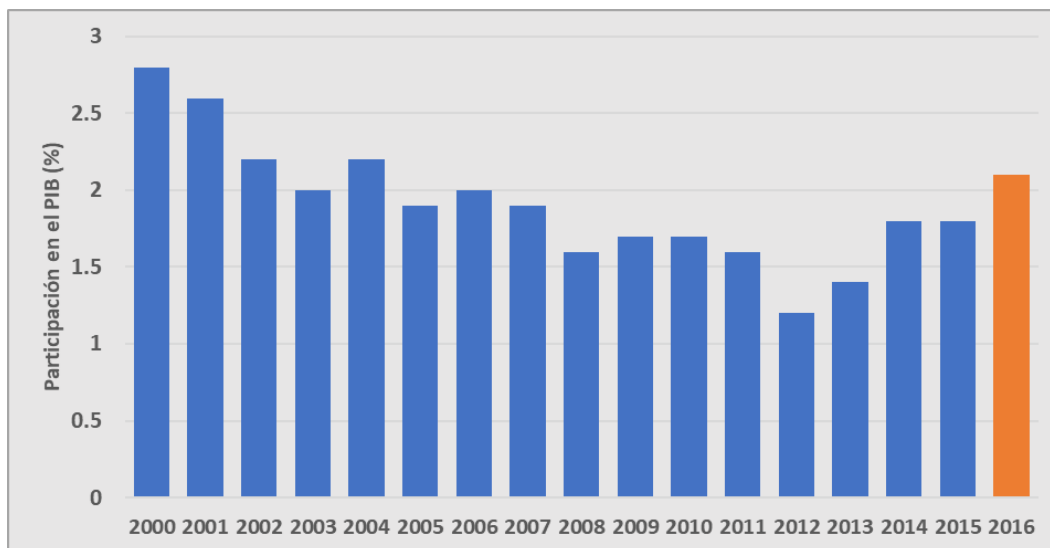
5.1.1. Aspectos económicos

La industria química es uno de los subsectores más importantes en el contexto del sector industrial en México. Es fundamental por la articulación que tiene con una gran parte de las cadenas productivas existentes en México, en las que incide tanto como productor de bienes intermedios cuanto como productor de bienes para consumo final.

Por sus características, la industria química presenta una gran diversidad de procesos productivos dependiendo de los bienes que produce cada instalación, así como tiene unidades productivas en todos los rangos de clasificación de empresas por su tamaño, desde PyME hasta gran industria.

En 2016, la aportación de la industria química en su conjunto al PIB fue de 2.1%, siguiendo una tendencia de recuperación desde 2012, cuando alcanzó un mínimo de 1.2%, período en el cual ha crecido dicha participación a un ritmo mayor al 18% promedio anual, a pesar de haberse presentado un moderado decrecimiento de actividad entre 2014 y 2015. Lo anterior representa en 2016 un valor de la producción nacional de poco más de USD \$ 15.2 mil millones⁵⁴.

Figura 5: Participación porcentual de la industria química en el PIB (2000 – 2016)



Fuente: Elaboración propia, con datos de ANIQ. – 2016 – Estimado.

⁵⁴ Disponible en sitio web ANIQ: <http://webpublico.aniq.org.mx/nosotros/Paginas/EstadisticasIQ.aspx>.

A pesar de este incremento en participación del PIB, la producción total nacional de la industria química registra una caída considerable, lo cual puede deberse entre otras cosas a situaciones financieras, a aspectos estructurales (reserva de petroquímica básica como actividad exclusiva del estado), a la coyuntura en el momento de realizarse las reformas energéticas, en donde una caída de la producción de gas impide la utilización de la capacidad existente, particularmente en la elaboración de etileno, a la insuficiencia de financiamiento adecuado a largo plazo, rezagos en infraestructura física y de transporte y como consecuencia del panorama anterior, una muy baja inversión en investigación y desarrollo ⁵⁵.

Así, mientras que el valor de la producción nacional fue de USD \$16 mil millones⁵⁶, éste sufrió una caída del 1.9% en comparación con 2015, cuando fue de USD \$16.3 mil millones, después de un repunte en 2014, cuando alcanzó los USD \$18.3 mil millones.

Diversos expertos⁵⁷ coinciden en que no obstante la situación anterior, el tamaño del mercado en México y la existencia de capacidad de producción disponible principalmente, representan oportunidades reales de crecimiento en la actividad productiva del sector, para lo cual se requiere mejorar la disponibilidad de materias primas, reducir la dependencia del exterior, en particular de productos importados bajo prácticas comerciales desleales, el tratamiento diferenciado entre petroquímica básica e industria química de especialidades, con rangos de inversión mayores y menores o iguales a USD \$500, respectivamente, la vinculación más cercana entre la industria y la academia, y el aprovechamiento de la capacidad existente y la ociosa de petroquímica básica principalmente, para su reactivación. Se identificó también la necesidad de programas de apoyo financiero nacional con este fin.

Cabe señalar la importancia de la industria química con relación a su participación en el PIB manufacturero, la cual representa el 8.8% en 2015.

Como puede apreciarse, aun con el escenario actual, en donde la producción ha disminuido de manera significativa, la industria química es uno de los subsectores que en mayor medida contribuyen al efecto positivo que sobre la economía tiene la aportación de la industria manufacturera en general.

Por otra parte, derivado de la reforma energética, y en concordancia con las opiniones de los expertos en el tema, se espera un crecimiento de la producción nacional en las siguientes décadas,

⁵⁵ De María y Campos, M. (2017); *Auge, caída y oportunidades en la industria química*; El Financiero, 08/08/2017.

⁵⁶ Disponible en sitio web ANIQ: <http://webpublico.aniq.org.mx/nosotros/Paginas/EstadisticasIQ.aspx>.

⁵⁷ De María y Campos, M. (2017); *Auge, caída y oportunidades en la industria química*; El Financiero, 08/08/2017.

en buena parte debido a la sustitución de importaciones y al crecimiento de la economía nacional⁵⁸.

Estas oportunidades de crecimiento implican que a su vez se incrementen las necesidades energéticas aplicables, además de una necesaria optimización operativa de las instalaciones actualmente operando con baja capacidad o en desuso, por lo que la inclusión y el análisis del sector en esta consultoría son relevantes.

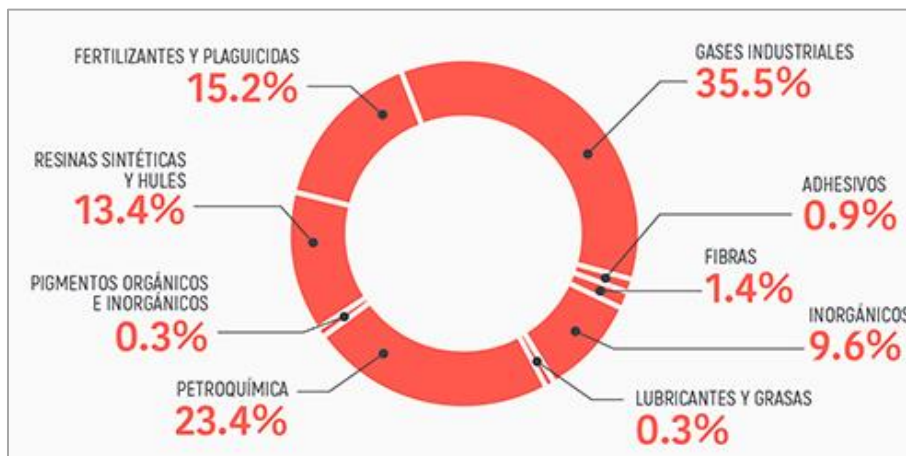
5.1.2. Aspectos relacionados con la producción

La contabilidad de producción total de este subsector se reporta en toneladas de producto sin identificar sus tipos, ya que la gran diversidad de estos hace difícil un parámetro universal que tome en cuenta las diferencias entre ellos.

Lo anterior representa un reto al analizar a la industria química en general desde el punto de vista energético, pues incluye muy diversos perfiles de energía, tipos de procesos y valor final de productos.

Para ejemplificar lo anterior, en la siguiente Figura se muestra la aportación de cada uno de los ramos industriales del subsector a la producción total del mismo en julio de 2017⁵⁹, lo cual también sirve como un esquema de la clasificación por tipo de productos o procesos de producción empleado por la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), para agrupar diferentes ramos de actividad de las empresas establecidas en México.

Figura 6: Distribución de la producción de la industria química, julio 2017



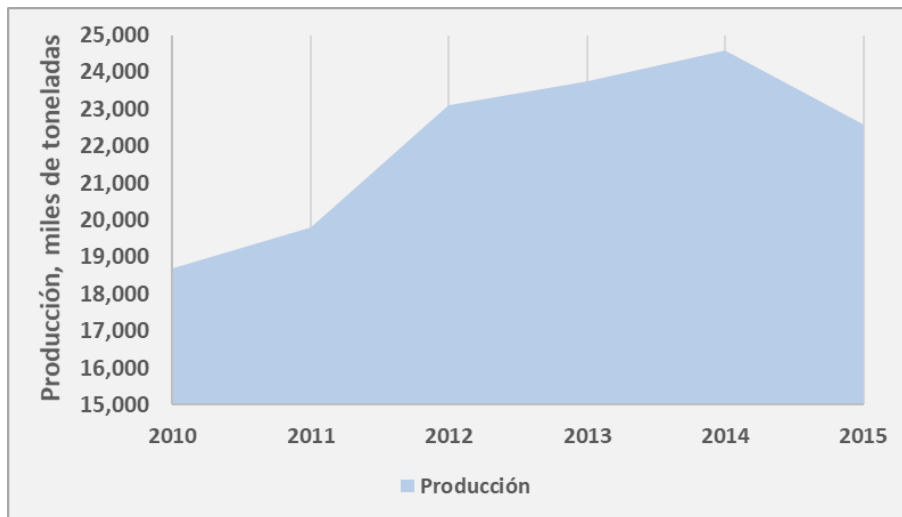
Fuente: ANIQ, 2017.

⁵⁸ Fuente: “Elementos hacia una estrategia de desarrollo bajo en emisiones para la industria química en México, PNUD – ANIQ”, 2017.

⁵⁹ ANIQ, Análisis mensual de la industria química, octubre 2017.

En cuanto al volumen de producción nacional de la industria química, en la siguiente Figura se muestra el desarrollo de la misma entre 2010 y 2016.

Figura 7: Producción total nacional de la industria química



Fuente: Elaboración propia con información de ANIQ.

La información actualizada acerca de las unidades económicas actualizada no está disponible públicamente, pero se ha observado una disminución en el número de las mismas, desde un total de unidades censadas en 1998 de 10,374, a 7,434 en 2003 y 4,084 en 2008 (4,232, 3,672 y 1,622 descontando microempresas, respectivamente), mientras el personal empleado disminuyó de 429,000 a 233,000 en ese mismo periodo⁶⁰. Para 2017, la estimación del total de personal empleado en promedio en la industria química fue de 48,635 personas⁶¹, es decir un 88.6% de reducción de personal ocupado por esta industria en el lapso de 30 años.

En cuanto a su participación por clasificación de tamaño de empresas, la reducción indicada en el número de empresas entre 1998 y 2008 corresponde en un 58.5% de los cierres netos corresponden a microempresas, mientras un 30.3% correspondieron a PyME. Lo anterior es consistente con las cifras de reducción de puestos de trabajo señalada, pues a medida que la empresa es más pequeña, es mayor la mano de obra requerida para elaboración de cada unidad de producto, pero también indica que existe una alta vulnerabilidad de la PyME a las situaciones de mercado, entre otros factores por sus costos de producción, relacionados directamente con la energía. Esto hace aparente la necesidad de una atención prioritaria a ese estrato de empresas del subsector.

⁶⁰ INEGI, La industria química en México 2014.

⁶¹ ANIQ, Análisis mensual de la industria química, octubre 2017.

5.1.3. Escenario de desarrollo de la industria química

En 2017, y producto de una colaboración con el Low Emission Capacity Building Programme (Programa de creación de capacidades para bajas emisiones) que el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) ha llevado a cabo con el sector industrial en México, la ANIQ con apoyo de expertos del Instituto de Energías Renovables y del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), estableció dos escenarios de crecimiento a 2050, con base en las previsiones de la demanda internacional de productos químicos, el comercio internacional anticipado para los mismos, y un análisis de barreras e incentivos que deben eliminarse y establecerse, respectivamente, para permitir un adecuado desarrollo de las actividades de la industria y su crecimiento sostenible:

- ▶ Escenario tendencial: En este escenario se toman en cuenta aspectos históricos de decrecimiento de la actividad, así como se reconoce que la industria química experimenta permanentemente ciclos de incremento y caída de demanda con base en la incorporación de nueva capacidad que incrementa la oferta súbitamente mientras la demanda lo hace de manera paulatina, incidiendo en los precios y por tanto en la producción de productos químicos. Así mismo, se toman en cuenta pronósticos de crecimiento de diversos estudios internacionales, en donde se habla de un buen potencial de crecimiento para los próximos años.

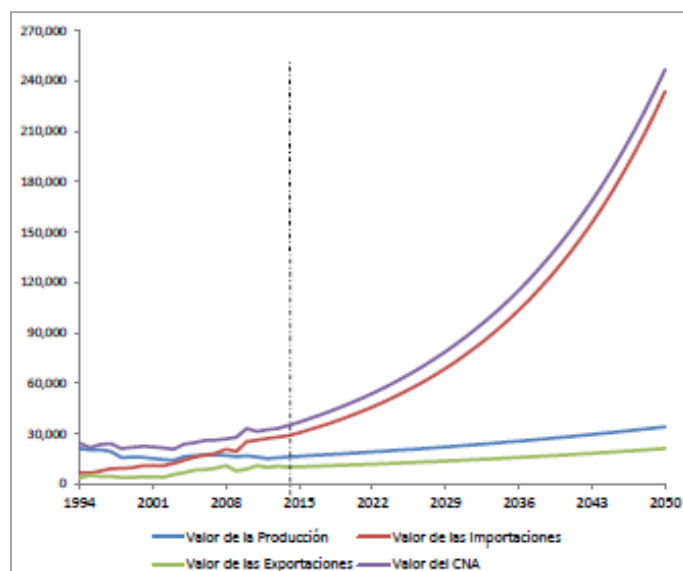
Este escenario considera un crecimiento anual del valor de la producción de la industria para el período 2015 – 2050 de 2.1%, con un crecimiento promedio del PIB de 3.6% durante el mismo lapso. En este escenario, no se prevé una actividad agresiva de sustitución de importaciones, sino se siguen las prácticas y condiciones que históricamente se han observado, influenciadas por los aspectos estructurales ya señalados. Con base en lo anterior, se considera que las importaciones representarían hasta un 88% del consumo nacional aparente (CNA).

- ▶ Escenario alternativo: En este escenario, se consideran varios aspectos, entre ellos el impacto de la reforma energética, aplicados al escenario tendencial anterior para modelar su influencia en el mismo. Otros aspectos considerados en la construcción de este escenario incluyen un incremento en producción de acuerdo con la disponibilidad máxima de materia prima prevista en México, con lo cual parte de las importaciones serían sustituidas, el crecimiento consecuente del valor de la producción de la industria a un ritmo mayor que en el escenario tendencial (3.9% anual vs. 2.1%), apoyado por el crecimiento tendencial observado de 3.03% en las exportaciones.

El crecimiento del PIB en este escenario se mantiene en 3.6%. Se considera que en este escenario se reducen las importaciones a una tasa de 2.4% anual promedio, por lo que la previsión del valor de la producción nacional respecto del consumo total nacional pasaría de 18% a 34%.

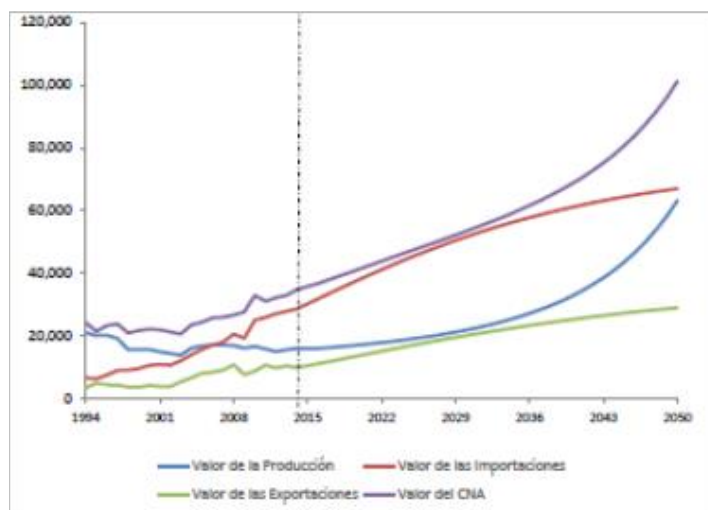
En las Figuras 8 y 9 se muestran los gráficos contruidos a partir de los escenarios antes descritos.

Figura 8: Escenario tendencial de desarrollo de la industria química (valores en millones de USD)



Fuente: PNUD-ANIQ.

Figura 9: Escenario alternativo de desarrollo de la industria química (valores en millones de USD)



Fuente: PNUD-ANIQ.

Es interesante observar en las figuras anteriores cómo el valor total del consumo nacional aparente disminuye en cerca de 59% entre ambos escenarios. Lo anterior obedece al diferencial de precios entre bienes y productos importados y aquellos producidos nacionalmente, por lo que el efecto en la balanza comercial del país también sería muy benéfico en este último escenario.

En ambos escenarios, se prevé un crecimiento apreciable de la actividad, por lo que el establecimiento de acciones para hacer más eficiente su operación redundará en una reducción

de consumo energético que, dada la importancia de la actividad económica que se ha descrito para esta industria, impactará favorablemente al cumplimiento de la NDC de México.

5.2.

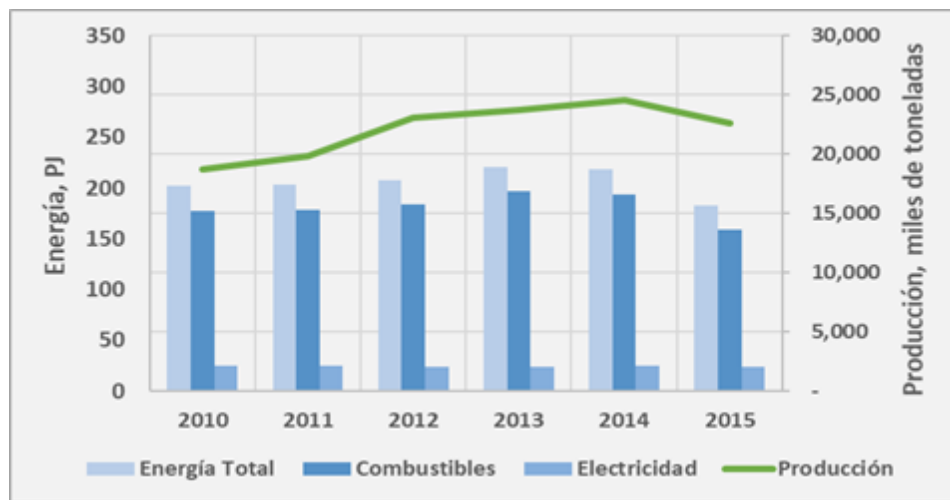
Caracterización energética de la Industria Química

5.2.1. Consumo y matriz energética

Como se mencionó en la sección anterior, la profusión de líneas de producto y de procesos de producción representa también diferentes mercados y precios, así como costos de producción y consumo energético en cada caso.

La industria química tuvo en 2015 un consumo energético total de 183.15 PJ⁶², lo que representó un descenso de 16.7% respecto a 2014, siendo la mayor parte de esta disminución atribuible a una reducción de operaciones de la Petroquímica de PEMEX.

Figura 10: Consumo de energía y producción agregada de la industria química (2010-2015)



Fuente: Elaboración propia con base en datos de ANIQ y el BNE 2015.

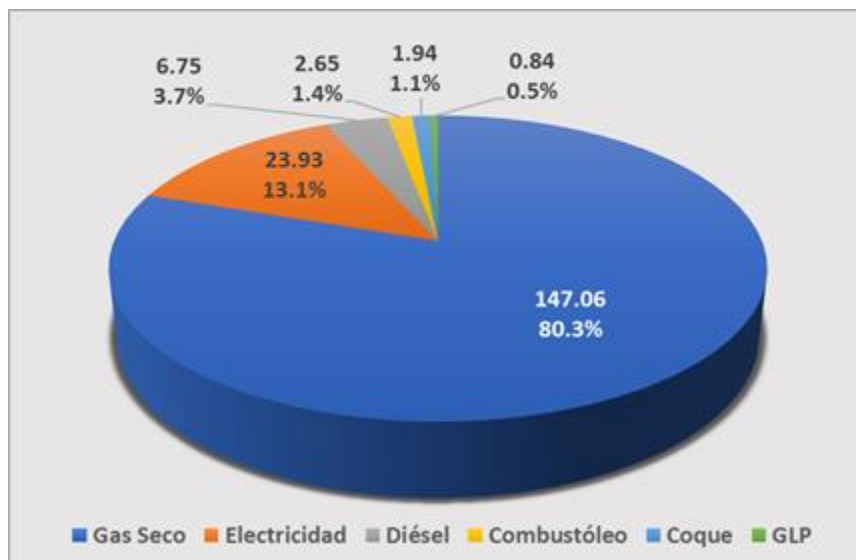
La industria química, excluyendo de la misma a la Petroquímica de PEMEX, tuvo un consumo de energía de 108.76 PJ.

Los energéticos utilizados en la industria química en 2015 fueron por orden de importancia el gas natural seco, la electricidad, el diésel, el combustóleo, el coque de petróleo y el gas licuado.

La matriz energética utilizada en la industria química incluyendo la petroquímica de Pemex se representa gráficamente, incluyendo su participación porcentual.

⁶² Balance Nacional de Energía 2015, incluye consumo de combustible en Petroquímica de Pemex, Industria Química, Fabricación de Productos de Hule y Fabricación de Fertilizantes.

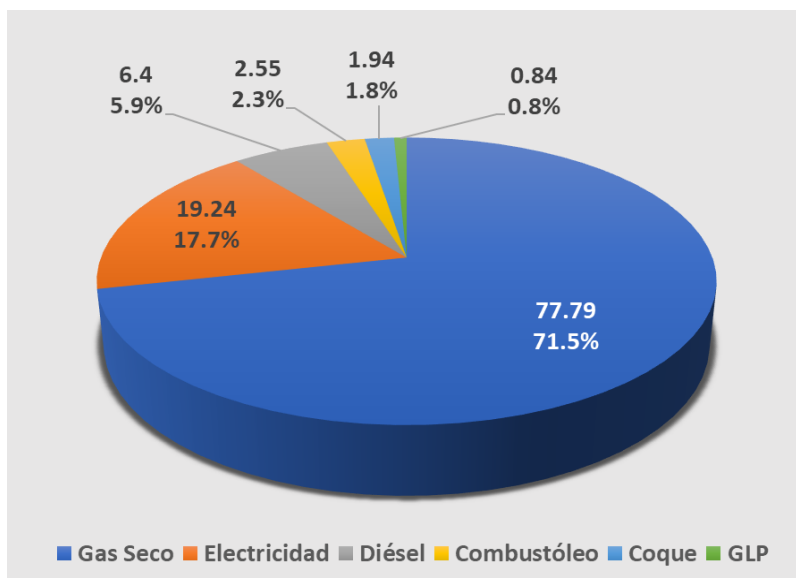
Figura 11: Matriz de consumo energético para la industria química (2015) cifras en PJ



Fuente: Elaboración propia con datos del BNE 2015.

Al considerar la industria química sin contabilizar a la Petroquímica de PEMEX, se conservan tanto los energéticos utilizados como el orden de importancia de estos, aunque su aportación cambia.

Figura 12: Matriz de consumo energético (sin Petroquímica PEMEX) para la industria química (2015) cifras en PJ



Fuente: Elaboración propia con datos del BNE 2015.

5.2.2. Usos finales de la energía

Como se ha reiterado en el presente capítulo, existe una gran diversidad de procesos y formas de producción de los productos químicos. Existe también una oferta muy variada de productos fabricados en México. La interrelación entre procesos para fabricar cada uno de ellos también se lleva a cabo de diferentes modos, de acuerdo con la naturaleza de las materias primas, de las reacciones involucradas y de las líneas de productos que se desean obtener. La capacidad de obtener diferentes productos a través de las mismas materias primas, o bien de obtener los mismos productos partiendo de diferentes materias primas, hace de la industria química una de las más interesantes desde el punto de vista de análisis energético. Así, se realizan operaciones de transporte y manejo de materiales, transformación física y química de los mismos, operaciones de reducción de tamaño y empaque y finalmente de distribución de productos, todas ellas con el concurso de diversos sistemas de conversión de la energía de naturaleza eléctrica, térmica y mecánica.

Es común el empleo de cantidades significativas de energía en forma de vapor para calentamiento, alimentación a proceso, depuración de corrientes, desodorización, limpieza y otros usos, así como hornos, calentadores de proceso y túneles de secado.

Los motores y sistemas eléctricos son empleados en la mayoría de los sistemas de refrigeración, compresión de aire, bombeo, ventilación y maquinaria y equipo de proceso. Una pequeña fracción de la energía eléctrica se utiliza para alumbrado y calentamiento.

La única referencia de usos finales de la energía en la industria química en general en México proviene de un estudio realizado en el marco de la colaboración entre la CONAE (hoy CONUEE), y la Unión Europea⁶³. En dicho estudio, se analizaron tanto usos finales de energía primaria como eléctrica en diferentes empresas representativas del sector, lo cual permitió elaborar un perfil de usos finales. Puesto que el estudio tomó como parámetro de reporte el grado de utilización en industrias individuales de cada tipo de energético asociado a un uso final, y no el consumo total de la industria, es de esperar que los resultados del mismo puedan tener algunas imprecisiones, haciéndose las consideraciones expuestas en los párrafos siguientes en atención a ello.

Se considera que, en el renglón de energía primaria para generación de energía térmica, los porcentajes asignados a los tres usos finales descritos podrían considerarse cercanos a la realidad en cuanto a conceptos, en donde la generación de vapor, los hornos de proceso, calentadores de fluido térmico y secadores combinados, junto con otros usos de consumos marginales, consumen prácticamente la totalidad de la energía primaria transformada en la industria química. No obstante, la participación de los hornos de proceso parecería subestimada en gran medida,

⁶³ Uso Final de la Energía dentro de la Industria Química, CONAE-UE.

particularmente en la industria petroquímica, en donde pueden consumir hasta el 30% del total de energía de una instalación mayor, y dicho número puede incrementarse hasta 50% o más, considerando únicamente la energía requerida para proceso.

Dado que el enfoque de este estudio no contempla la Petroquímica de PEMEX como uno de sus objetivos, la distribución mostrada se considera adecuada. Además, y puesto que los hornos de proceso en la mayoría de los casos presentan potenciales de mejora en eficiencia mucho más altos que los que podrían encontrarse en calderas de similares capacidades de liberación de calor, la consideración de los porcentajes reportados para determinar oportunidades de eficiencia energética será conservadora.

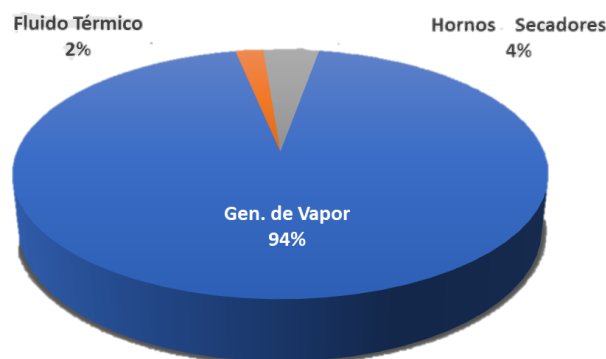
En el estudio no se consideró como uso final la autogeneración de energía, lo cual requiere que se analice este tema de manera separada.

En el caso de la energía eléctrica, las dimensiones relativas de equipamiento eléctrico entre PyME, y gran industria hacen que dichos resultados presenten una mayor incertidumbre, pues existen sistemas de ciertos tipos en grandes industrias que podrían consumir lo mismo que cientos de PyME combinadas. En este caso, se considera que la importancia de sistemas de bombeo y compresión está subestimada, si bien como en el caso de la energía térmica, la utilización de los valores considerados colocaría a los ahorros estimados del lado conservador.

Con base en lo anterior, se establece que se pueden utilizar para fines de estimación de potenciales o de diseño de políticas los datos anteriores, particularmente al no considerar la Petroquímica de PEMEX.

Estos resultados se presentan en las figuras 7.1.10 y 7.1.11 a continuación.

Figura 13: Usos finales de energía primaria en la industria química en México



Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por consultores que participaron en el estudio CONAE-UE.

Figura 14: Usos finales de energía eléctrica en la industria química en México



Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por consultores que participaron en el estudio CONAE-UE.

El otro uso final de la energía térmica es el de autogeneración, ya sea mediante esquemas de cogeneración o a través de generación termoeléctrica convencional en ciclos con turbina a vapor, turbina a gas o motor de combustión interna.

A diciembre de 2016, la industria química operaba una capacidad instalada para autogeneración de 1,451 MW, mientras que se encontraba en construcción una capacidad instalada de 2 MW y otros 1,018 MW se encontraban autorizados, pero aún no iniciaban la fase de construcción. Estas cifras están sujetas a revisión, puesto que algunos de los permisos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) consultados para realizar esta contabilización indican como combustible al bagazo de caña, el cual no se emplea en la industria química para fines de generación de energía eléctrica o térmica⁶⁴.

Considerando un factor de utilización de capacidad de un 85% con un factor de disponibilidad de 94%. Lo anterior significaría una generación máxima cercana a 10,155 GWh/año. Dado que los permisos vigentes para las plantas operadas sólo autorizan una generación de 8,248 GWh/año, se utiliza este valor para hacer las consideraciones siguientes:

Al no conocerse con precisión las características de cada una de las plantas que intervienen en la matriz tecnológica de autogeneración, y a efectos de ser conservadores al determinar un potencial de ahorro energético por medidas de uso racional y mejora en la eficiencia energética, se utilizará una eficiencia media – alta de un ciclo de generación Rankine, de 35%.

⁶⁴ Anuario estadístico 2016, ANIQ.

Lo anterior, al saberse que existen algunas plantas de tecnologías más eficientes, asegura que de ningún modo se sobrestimaré el potencial de reducción de consumo energético, pues significa que en el mejor de los casos se estaría utilizando un valor de consumo real para este uso, aunque seguramente será sobrestimado.

De este modo, la energía que se considera se utiliza en autogeneración será:

$$8,248Gwh \cdot 3,600 \frac{GJ}{GWh} \cdot \frac{1PJ}{1 \times 10^6GJ} = 29.69PJ$$

Por lo que la energía térmica dedicada a usos finales diferentes de generación eléctrica en 2015 en toda la industria química sería de 129.6 PJ.

Considerando conservadoramente que el 50% de la autogeneración ocurre en la Petroquímica de PEMEX y el 50% restante en otras ramas de actividad de la industria química, entonces se consideraría que la energía térmica dedicada a usos finales diferentes de generación eléctrica, sin considerar la Petroquímica de PEMEX, sería de 74.7 PJ, cifra que podría utilizarse para establecer una línea base de acuerdo con las ramas de actividad consideradas en el presente estudio.

5.2.3. Medidas para el uso eficiente de la energía en la industria química

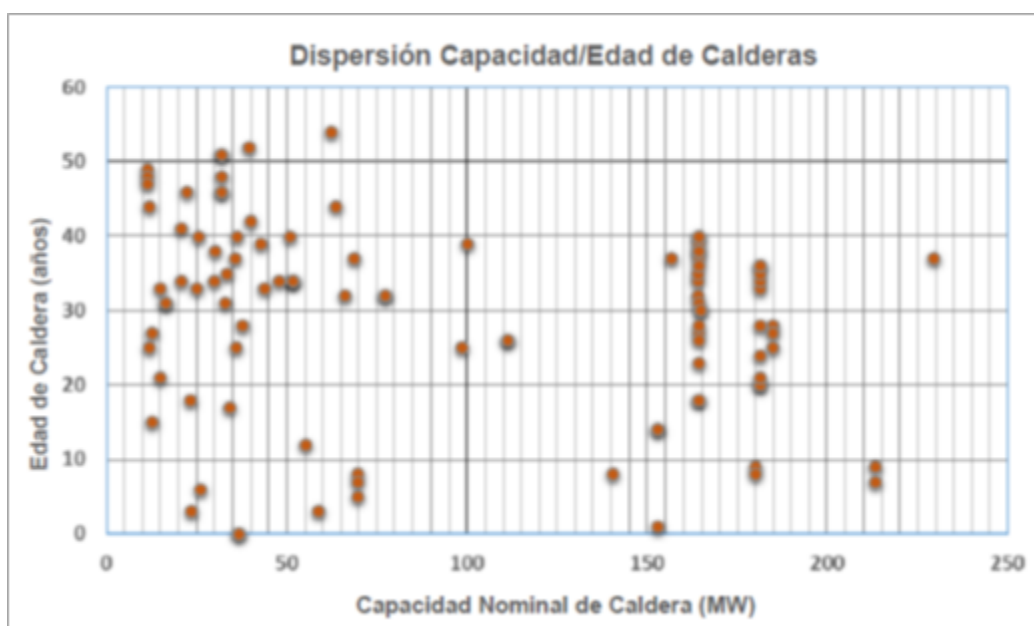
De los datos utilizados para la construcción de la gráfica de consumo energético y producción de la industria química, se observa una disminución en el índice aparente de intensidad energética global del subsector de un 24.9%, pasando de 10.80 GJ/t en 2010 a 8.12 GJ/t en 2015.

No obstante, debido a que los cambios en niveles de actividad han sido fuertemente influenciados por la reducción del volumen de producción de la petroquímica básica, así como a la variabilidad de productos y procesos involucrados, no deben hacerse inferencias acerca de una mejora en el índice de las operaciones que actualmente prevalecen, si bien se reconoce que ha habido avances y que la ANIQ, a través de la comisión de energía promueve activamente la adopción de tecnologías eficientes en esta industria, para lo cual tiene diversos frentes de acción, entre ellos la colaboración con CONUEE.

Al analizar los usos finales de la energía y considerando que una buena parte de los equipos térmicos y la infraestructura relacionada tiene más de 20 años de antigüedad⁶⁵, así como con base en la experiencia del equipo de consultoría en auditorías energéticas en instalaciones industriales, entre ellas de producción de químicos, puede establecerse un listado preliminar de medidas que podrían tener un impacto relevante en el consumo de energía, y por tanto en las emisiones de GEI de la industria química, por lo cual ayudarían al cumplimiento del NDC de México.

⁶⁵ Apuntes de taller de grupo de trabajo del Protocolo de Eficiencia en Calderas de México, Climate Action Reserve (CAR) 2016.

Figura 15: Dispersión capacidad – edad del parque de calderas en México



Fuente: Protocolo de Eficiencia en Calderas (CAR, 2016).

El listado de medidas que incluyen una explicación breve, el potencial relativo estimado de ahorro y un potencial de reducción de consumo de energía estimado, se presenta en los listados siguientes, dedicados uno a energía primaria y el otro a energía eléctrica. Ambos listados, en cuanto a su potencial absoluto, se refieren a los datos de 2015 y a la energía de base estimada para la industria química sin considerar la rama de Petroquímica de PEMEX, es decir:

En el caso de la energía térmica, 74.7 PJ, multiplicada por la contribución porcentual del tipo de dispositivo al que se aplica la medida a la energía total.

En el caso de energía eléctrica, 19.24 PJ, multiplicada por la contribución porcentual del tipo de dispositivo al que se aplica la medida a la energía total.

A continuación, se incluye un listado de las medidas que se consideran de mayor impacto y penetración que podrían aplicarse a sistemas térmicos de mayor importancia desde el punto de vista energético en la industria química (sin considerar la Petroquímica de PEMEX).

Este listado no pretende ser exhaustivo, por lo que existen cuando menos varias decenas de oportunidades con menor potencial ya sea de aplicación extendida o de reducción de consumo de energía.

Es importante señalar que se ha considerado un porcentaje de aplicabilidad basado en la experiencia del equipo de consultoría en el mercado mexicano, si bien los programas y políticas generalmente utilizarán la dimensión total del potencial como meta aspiracional. Por ello se dan

elementos para cuantificar ambos escenarios. Así mismo, se utilizan los potenciales de reducción relativos del lado bajo para ser conservadores en la estimación.

Se ha considerado como potencial para reducción de combustible el potencial de reducción de consumo de vapor o de pérdidas, en los casos de medidas que no son aplicables directamente en la caldera. En realidad, la estimación debe hacerse dividiendo a dichas pérdidas o reducción de consumo de vapor por la eficiencia de la caldera, por lo que los ahorros reales serían mayores a los descritos. Nuevamente, lo anterior se hace en pro de ser conservadores en la estimación.

Lo mismo aplica para energía eléctrica, en donde un ahorro en consumo redundará en un ahorro mayor en los casos en que la electricidad es transformada dentro de la instalación, así como en todos los casos debido a las pérdidas de conducción, y en los casos en que se genera electricidad, los ahorros se traducirán en ahorros en combustible, de magnitud mayor en cuanto a energía pues estará involucrada la eficiencia de generación evitada.

Por último, existen algunas opciones de mejora que se han manejado incluso en programas nacionales como de gran impacto o potencial de reproducción, las cuales en realidad no lo son. Dado que no es el objetivo de este estudio evaluar la aplicabilidad de todas las medidas de los programas involucrados, se considera conveniente revisar las bases sobre las que se plantean dichas medidas, para establecer su potencial real y hacer consistente el direccionamiento de recursos hacia aquéllas con el mayor potencial real. Tal es el caso de medidas que recomiendan el cambio de caldera u horno, en donde se indican potenciales de mejora de hasta 20%, situación que en la realidad únicamente se da en equipos prácticamente destruidos, o bien midiendo la eficiencia antes de implementar otras medidas de eficiencia, algunas sin costo. El resultado real de implementar esta medida es similar a la del cambio de algunos elementos en una caldera de baja eficiencia (5% – 7% en la mayoría de los casos), lo cual puede hacerse a un costo significativamente menor y haría la inversión anterior no rentable.

5.2.4. Medidas para el uso eficiente de energía primaria (combustible) en la industria química

- **Sistemas de vapor – Mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos:** La temperatura a la que se maneja el vapor en sistemas industriales, hace necesario que los sistemas de distribución de vapor, compuestos por tuberías, válvulas y accesorios, así como algunos equipos de intercambio de calor o proceso en que se emplea vapor o calor proveniente del mismo, se aíslen térmicamente tanto por seguridad del personal, como para evitar disipación de calor desde la superficie de los elementos implicados, lo cual se traduce en pérdidas de energía.

Dada la fragilidad de los elementos que recubren al aislamiento, el envejecimiento del mismo y la intromisión de agua de lluvia principalmente, así como la mala práctica de no

aislar ciertos elementos con una superficie de disipación considerable (válvulas), así como prácticas de instalación deficiente, es frecuente encontrar oportunidades para mejorar las condiciones de los sistemas de aislamiento.

No es inusual conseguir con estas reparaciones mejoras energéticas que implican una reducción de entre 2 y 5% de la energía de combustible requerido, si bien en casos extremos pueden darse reducciones mayores a 10%.

El PSRI⁶⁶ para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 3 y 18 meses generalmente.

Se estima que al menos el 80% de los sistemas de vapor en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 2% en el 50% de los sistemas, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en 0.70 PJ.

- **Sistemas de vapor – Mejora en sistemas de evacuación y recuperación de condensado:** En instalaciones que trabajan con vapor saturado, frecuentemente empleadas para el calentamiento de equipo de proceso en la industria química, se alimenta el vapor a un intercambiador de calor, en donde cede su calor latente, condensándose. El condensado formado tiene una muy reducida capacidad para ceder calor comparado con el vapor, por lo que debe evacuarse de los equipos para permitir la mayor superficie de intercambio posible siempre en contacto con vapor. Cuando lo anterior no se verifica de una manera eficiente, se incrementan los tiempos de proceso ocasionando cuellos de botella en la producción por acumulación de condensado, o bien en el caso contrario, en que no hay control de evacuación, se escapa vapor vivo sin trabajar, perdiéndose también la energía contenida en él. Un sistema adecuado de evacuación en efecto minimiza los requisitos energéticos del proceso. En el caso de las tuberías que conducen vapor, la evacuación del condensado es necesaria para evitar que se formen bolsas de agua que al circular a la velocidad del vapor y encontrar un obstáculo, tal como un cambio de dirección o el extremo cerrado de una tubería, producen un golpe de ariete potencialmente destructivo para el sistema. Cuando los sistemas de evacuación de condensado se instalan en conjunto con un sistema de retorno de condensado, se puede recuperar la energía del mismo al retornarlo al tanque de agua de alimentación, lo cual también reduce costos por tratamiento de agua cruda.

Dado que muchas instalaciones, muy frecuentemente las PyME, no cuentan con retorno de condensado o el mismo es rudimentario, y también debido a que la selección de las trampas de vapor que evacúan el condensado no es adecuada para el servicio requerido, se detectan en muchas ocasiones oportunidades de mejora a través del cambio de trampas por otras adecuadas al servicio, y mediante la instalación o mejora de sistemas de recuperación de condensado.

Aunque cada instalación es diferente y sus sistemas de trampas de vapor tienen necesidades específicas a la misma, se ha observado que existen potenciales de reducción de necesidades de energía en la caldera de entre 1% y 10% del total. En cuanto a los sistemas de retorno de condensado, cuando los mismos no existen y su instalación es

⁶⁶ Período Simple de Recuperación o Retorno de Inversión.

adecuada, pueden reducirse las necesidades energéticas en la caldera hasta en 15%, y cuando se mejoran podrían esperarse reducciones de entre 3% y 7%.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 1 y 24 meses, correspondiendo el PSRI mayor a instalaciones donde deben instalarse sistemas de condensado nuevos.

Se estima que al menos el 60% de los sistemas de vapor en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética. De acuerdo con lo anterior, dado que cada sistema es diferente y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 5% en el 30% de los sistemas instalados, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en = 1.05 PJ.

- **Sistemas de vapor – Ajustes de combustión:** El proceso de combustión en una caldera de vapor requiere de una adecuada mezcla del combustible y el aire, un acondicionamiento del combustible, según sea requerido, para permitir su mezcla y fácil encendido, una temperatura adecuada y tiempo suficiente para ceder calor durante el paso de los gases de combustión por la trayectoria de gases en la caldera. En muchas ocasiones y para asegurar una buena mezcla, se ingresa a la caldera más aire del necesario para llevar a cabo una operación adecuada. Aunque no es posible una combustión sin exceso de aire en calderas comerciales, sí existe la posibilidad de minimizar dicho exceso, con lo que se reducen las pérdidas por calor contenido en gases de combustión al reducir el volumen de estos y permitir mayor tiempo de residencia a los mismos en la trayectoria de gases, con lo cual también disminuye la temperatura de los gases que salen de la caldera.

Lo anterior puede lograrse en la mayoría de los casos sin necesidad de cambio de equipo o accesorios, sino simplemente con una medición de gases de combustión y una carburación adecuada, modificando los puntos o posiciones de elementos finales de control para inyección de aire y combustible. El único costo involucrado es el de materiales consumibles para el equipo de medición, y el tiempo del personal externo contratado, ya que en el caso del personal interno suele ser parte de sus actividades normales, no incidiendo como costo adicional para la empresa.

La corrección de exceso de aire puede reducir las pérdidas y por tanto las necesidades energéticas de la caldera. Es común observar en calderas pequeñas y medianas excesos de aire de 10% a 15%, cuando pueden ajustarse para operar sin problemas con 5% de exceso de aire. En las calderas grandes, se encuentran excesos de aire de entre 7% y 10%, mientras es posible su operación con valores de 2% a 3%. La reducción de necesidades energéticas en la caldera por la reducción de exceso de aire frecuentemente es de 1% y mayor, mientras que, aunado al efecto de reducción de temperatura consecuente, alcanza hasta 2%.

El PSRI para esta medida, prácticamente en todos los casos es menor a 1 mes. Se estima que al menos el 90% de las calderas instaladas en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 2% en el 50% de los sistemas a los que puede aplicarse, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en 0.35 PJ.

- **Sistemas de vapor – Recuperación de calor de gases de combustión:** La temperatura con la que salen los gases de combustión de una caldera es aproximadamente proporcional a la energía contenida en ellos. Existen límites físicos, determinados por la temperatura del vapor a manejar y por el diseño del equipo, para reducir la temperatura de gases que salen de la caldera. Cuando una caldera ha sido ajustada en exceso de aire y sus superficies de transferencia se encuentran en buen estado y limpias, se alcanza la temperatura de gases mínima técnicamente posible en cada condición de carga. Cuando dicha temperatura es suficientemente alta, permite la instalación de equipo de recuperación de calor para calentar el agua de alimentación (economizadores), o el aire para combustión (precalentadores de aire). Mediante estos dispositivos, parte de la energía contenida en los gases de escape se transfiere al agua o al aire, respectivamente, incrementando su temperatura, lo que reduce las necesidades energéticas en el quemador de la caldera. La aplicación de estos dispositivos debe seguir prácticas de diseño adecuadas, para evitar corrosión por condensación, particularmente cuando el combustible empleado es combustóleo con alto contenido de azufre.

Existen muchas calderas que no cuentan con estos dispositivos, mientras algunas de las unidades más grandes que originalmente quemaban combustóleo y por ello no los incluían o tenían algunos con baja recuperación de calor. El cambio de la matriz de energía de la industria a gas no significó una instalación masiva de estos dispositivos, como era de suponerse. De este modo, existe un potencial significativo para la aplicación de esta oportunidad.

Aproximadamente se reducen las pérdidas de calor en 1% por cada 30°C de reducción en la temperatura de gases de la caldera. Dado que en un economizador generalmente se busca una diferencia de entre 50 y 75°C, podría haber cerca de 2% de reducción de consumo energético al instalar estos dispositivos, mientras que en el caso de calderas de presiones altas, podría justificarse la instalación de un precalentador de aire adicionalmente al economizador, lo que reduce otro 1% el consumo de combustible.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentran entre 12 y 24 meses generalmente.

Se estima que al menos el 50% de las calderas instaladas en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 2% en el 25% de los sistemas en operación, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en $0.38 \text{ PJ} \times 0.94 = 0.35 \text{ PJ}$.

- **Sistemas de vapor – Recuperación de calor de purga continua:** Durante la operación normal de la caldera de vapor, es necesario eliminar depósitos que se forman en la caldera, reduciendo la concentración de sólidos en el agua dentro de la misma. Esto se logra a través de la purga de una cantidad relativamente pequeña de agua, tanto en el domo de lodos (purga de fondo), como en el domo de vapor (purga de superficie). Esta última purga es continua, y el agua que sirve como medio de transporte a las sales y depósitos se encuentra a la temperatura de saturación del vapor para la presión a la que opera la caldera. De este modo, la purga continua se encontrará siempre a una temperatura elevada, y normalmente se envía al drenaje.

Existen dispositivos para recuperar el calor de la purga, lo cual puede lograrse a través de un intercambiador de calor en donde se ceda parte del calor de la purga al agua de alimentación, además de que también puede hacerse en un tanque flash, en donde se realiza la evaporación instantánea de una fracción del agua de purga, y ese vapor puede emplearse en algún uso de baja presión.

La mayoría de las calderas no cuentan con estos dispositivos, lo cual representa una oportunidad de implementación significativa.

A través de la purga continua se pierde entre el 1% y 5% del calor total liberado por el combustible en una caldera. Un sistema de recuperación de calor de purga puede reducir dichas pérdidas aproximadamente en 50%, es decir entre 0.5% y 2.5%, con una incidencia más frecuente entre 1.0% y 2.0%. El PSRI para esta aplicación generalmente se encuentra entre 12 y 18 meses.

Se estima que cerca de 90% de las calderas instaladas en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

Suponiendo que se aplica esta medida al 50% de las calderas existentes con una reducción promedio de 2% en combustible, el potencial de reducción de requisitos de energía primaria podría estimarse en $0.75 \text{ PJ} \times 0.94 = 0.7 \text{ PJ}$.

- **Sistemas de vapor – Quemadores de alta eficiencia:** El equipo de liberación de calor (quemador) normalmente suministrado en una caldera estándar, es capaz de operar en diferentes regímenes de carga, con un límite de “Turndown”, es decir la relación entre el régimen máximo y mínimo de combustión reducido, lo cual implica que existe un rango relativamente estrecho de carga en que la operación de la caldera será la más eficiente. Un quemador de alta eficiencia permite extender ese rango, y dependiendo del combustible podría lograrse una buena operación desde un 10% y 25% (para gas natural y combustóleo, respectivamente), hasta el 95% de carga. Lo anterior es particularmente útil en calderas de carga variable, situación muy común en la industria química de especialidades, en donde existe una gran cantidad de procesos realizados por lotes o demandas instantáneas altas con tiempos relativamente largos a baja carga. Aunque los resultados de la implementación de esta medida de optimización energética son variables y dependen del tipo de procesos y el régimen de carga (no se recomienda esta solución para calderas con carga relativamente estable), se han observado reducciones de consumo de combustible de entre 5% y 15%. El PSRI para esta aplicación generalmente se encuentra entre 6 y 12 meses, sin considerar el beneficio de evitar encendido y apagado de calderas. Se estima que al menos el 25% de las calderas instaladas en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética. Suponiendo que se aplica esta medida al 10% de las calderas existentes, considerando una reducción de consumo de 5%, el potencial de reducción de requisitos de energía primaria podría estimarse en $0.38 \text{ PJ} \times 0.94 = 0.35 \text{ PJ}$.
- **Calentadores y hornos de proceso – Recuperación de calor de gases de combustión:** La temperatura con la que salen los gases de combustión de un horno o calentador de proceso es aproximadamente proporcional a la energía contenida en ellos. Existen límites físicos, determinados por la temperatura de las sustancias a calentarse y por el diseño del equipo,

para reducir la temperatura de gases que salen de la caldera. Dado que muchos de estos equipos son de tiro natural, su eficiencia en promedio es inferior a las de las calderas. Cuando la temperatura es suficientemente alta, permite la instalación de equipo de recuperación de calor para calentar el aire para combustión (precalentadores de aire). También debido al tiro natural, es necesario incorporar un sistema de conducción de aire y convertir al calentador en un equipo con aire forzado, para posibilitar tal precalentamiento de aire. Mediante estos dispositivos, parte de la energía contenida en los gases de escape se transfiere al aire, mientras que se incrementa también la eficiencia total de la caldera. La aplicación de estos dispositivos debe seguir prácticas de diseño adecuadas, para evitar corrosión por condensación, particularmente cuando el combustible empleado es combustóleo con alto contenido de azufre.

Existen muchos calentadores u hornos de proceso que no cuentan con estos dispositivos, incluso algunos de los equipos de mayor capacidad.

Aproximadamente se reducen las pérdidas de calor en 1% por cada 30°C de reducción en la temperatura de gases de la caldera. Dado que en un precalentador de aire generalmente se busca una diferencia de entre 50 y 75°C, pero además se incrementa la eficiencia del equipo, podría haber cerca de 7% a 10% de reducción de consumo energético al instalar estos dispositivos.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 12 y 36 meses generalmente.

Se estima que al menos el 80% de los hornos y calentadores de proceso instalados en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 7% en el 50% de los sistemas existentes, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en 0.10PJ.

- **Calentadores de fluido térmico – Recuperación de calor de gases de combustión:** La temperatura con la que salen los gases de combustión de un calentador de fluido térmico es aproximadamente proporcional a la energía contenida en ellos. Existen límites físicos, determinados por la temperatura del fluido térmico a manejar y por el diseño del equipo, para reducir la temperatura de gases que salen de estos dispositivos. Cuando un calentador de fluido térmico ha sido ajustado en exceso de aire y sus superficies de transferencia se encuentran en buen estado y limpias, se alcanza la temperatura de gases mínima técnicamente posible de operación. Dado que en general esta temperatura es alta, permite la instalación de equipo de recuperación de calor para calentar el aire para combustión. Puede también montarse un sistema que caliente agua para caldera, siempre y cuando la disposición de los equipos y la distancia entre ellos lo permitan. Gracias a estos dispositivos, parte de la energía contenida en los gases de escape se transfiere al aire o al agua de alimentación de una caldera, incrementando su temperatura, lo que reduce las necesidades energéticas en el quemador de la caldera a donde se enviará dicha agua. La aplicación de estos dispositivos debe seguir prácticas de diseño adecuadas, para evitar corrosión por condensación, particularmente cuando el combustible empleado es combustóleo con alto contenido de azufre.

La mayoría de los calentadores de aceite térmico no cuentan con estos dispositivos. De este modo, existe un potencial significativo para la aplicación de esta oportunidad.

Aproximadamente se reducen las pérdidas de calor en 1% por cada 30°C de reducción en la temperatura de gases del calentador. Dado que en un economizador para estos equipos generalmente se busca una diferencia de entre 75 y 100°C, podría haber cerca de 3% de reducción de consumo energético al instalar estos dispositivos, mientras que en calentadores de gran capacidad podría justificarse la instalación de un precalentador de aire adicionalmente, lo que reduce otro 1% el consumo de combustible.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentran entre 12 y 24 meses generalmente.

Se estima que al menos el 25% de los calentadores de fluido térmico instalados en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 3% en el 50% de los sistemas a los que puede aplicarse, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en 0.01PJ.

5.2.5. Medidas para el uso eficiente de energía eléctrica en la industria química

- **Sistemas de refrigeración – Mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos:** La baja temperatura a la que se manejan diversos fluidos de proceso en la industria química, hace necesario que los sistemas de tuberías y equipos asociados al manejo de dichos fluidos y a los de los sistemas de refrigerante se aislen térmicamente tanto por seguridad del personal, como para evitar ganancia de calor a través de la superficie de los elementos implicados, lo cual se traduce en mayores requisitos de energía dedicada a refrigeración.

Dada la fragilidad de los elementos que recubren al aislamiento, el envejecimiento del mismo y la intromisión de agua de lluvia principalmente, así como prácticas de instalación deficiente, es frecuente encontrar oportunidades para mejorar las condiciones de los sistemas de aislamiento.

No es inusual conseguir con estas reparaciones mejoras energéticas que implican una reducción de entre 1 y 3% de la energía de refrigeración requerida, si bien en casos extremos pueden darse reducciones cercanas a 10%.

El PSRI⁶⁷ para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 3 y 9 meses generalmente.

Se estima que al menos el 50% de los sistemas de refrigeración en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 2% en el 25% de los sistemas instalados, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en $0.1PJ \times 0.14 = 0.01 PJ$.

⁶⁷ Período Simple de Recuperación o Retorno de Inversión.

- **Sistemas de bombeo, compresión y ventilación centrífugos – Mejora en eficiencia integral de sistemas:** Los sistemas de bombeo y de compresión empleados en aplicaciones industriales que incorporan equipo centrífugo impulsado por motor eléctrico, se diseñan e instalan muchas veces a partir de especificaciones estándar para una cierta capacidad, carga, fluido y condiciones del mismo, lo cual debido a diferentes procesos o al cambio de productos elaborados en el tiempo, resultan sobredimensionados u operan en puntos de eficiencia bajos.

Dadas las características de la relación presión - flujo de los equipos centrífugos, mediante un análisis energético de necesidades y condiciones de proceso, puede determinarse el punto ideal de operación, así como la eficiencia global que puede alcanzarse realizando diversas modificaciones o cambios. Entre ellos se encuentran la instalación de accionamientos de velocidad variable (AVV), la modificación de impulsores o rotores de bombas y compresores, el redimensionamiento de tuberías de conducción, la reducción de fugas y recirculación, y el cambio de equipos en situaciones extremas.

El potencial de ahorro de energía es variable, pues depende de la extensión de estas acciones y de las características propias del sistema, pero es frecuente encontrar potenciales de entre 15% y 25%.

El PSRI⁶⁸ para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 1 y 18 meses generalmente.

Se estima que al menos el 60% de los sistemas de bombeo, el 40% de los sistemas de compresión y el 20% de los sistemas de ventilación en la industria química podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 15% en el 50% de los sistemas a los que puede aplicarse, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en $19.24 \text{ PJ} \times 0.15 \times 0.50 \times (0.1 \times 0.6 + 0.1 \times 0.4 + 0.1 \times 0.2) = 0.17 \text{ PJ}$.

5.2.6. Potencial de cogeneración – tri-generación

La mayoría de los estudios realizados para cogeneración en la industria química son de alcance limitado, por lo que no pueden hacerse inferencias a partir de los mismos, al no constituir una muestra representativa del subsector.

En el reporte “Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México”⁶⁹, se hace un análisis considerando la demanda existente y otras consideraciones de análisis. En el mismo se determina que el potencial económicamente factible para el sector es de 638 MW instalados y de 2,658 MW instalados considerando los escenarios de autoconsumo y de venta de excedentes al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

En el mismo, se considera que habría una reducción de combustible correspondiente a 46.1 PJ y 106.4 PJ en los escenarios indicados, respectivamente.

⁶⁸ Período Simple de Recuperación o Retorno de Inversión.

⁶⁹ GIZ – CONUEE, 2009.

De acuerdo con el perfil de consumo mostrado en diferentes documentos y resumido en la sección 7.1.2, el consumo que podría atribuirse a la generación en la industria química actualmente es de 29.69 PJ, en donde se sabe, aunque no se tienen los datos necesarios para cuantificarlo, que parte de esa autogeneración es realizada a través de ciclos de cogeneración.

Así, considerando el consumo global de la industria (108.8 PJ), el ahorro de 46.1 PJ significaría un 42% de reducción de consumo. Lo anterior se hace porque en el documento señalado, se diferencia a la industria química de PEMEX en conjunto, y se indica un potencial de cogeneración adicional para ella.

Lo anterior parece contrastar con análisis en otros países, principalmente la Unión Europea, en donde el potencial de cogeneración se sitúa en 25%, mientras que en México una parte significativa de consumo se da en PyME, las cuales son menos propensas a contar con condiciones para la implementación de un proyecto de cogeneración eficiente.

Con base en lo anterior y en la situación actual de la autogeneración en la industria, que actualmente cuenta con 1,451 MW, aunque el 25% podría ser un porcentaje real de potencial teórico a largo plazo, se estima que podría considerarse como una aproximación conservadora la de reducir el consumo de la industria química en su conjunto en 10%, lo cual representa 10.9 PJ.

5.2.7. Potencial de ahorro por mejora tecnológica y de procesos

Este rubro puede ser de gran importancia energética. Las modificaciones y nuevos desarrollos de procesos completos o catalizadores / sistemas de recuperación de energía en equipo de proceso, pueden reducir las necesidades energéticas netas en rangos de hasta 30% para casos específicos.

5.3.

Consideración de energías renovables

El tema de energía renovable es muy relevante para la sustitución de energía fósil en la industria, si bien no constituye por sí mismo un aspecto directamente relacionado con el ahorro de energía. Al incorporar a la matriz de energía eléctrica altos porcentajes de energías renovables, puede darse una sinergia con el ahorro energético cambiando equipamiento térmico a base de combustible por otro eléctrico, si bien el costo de la energía eléctrica en México aún no permite hacer tales modificaciones de manera rentable. En cuanto a energía solar para generación de calor, su uso aún tiene un horizonte limitado tanto por costo como por el área requerida y la alta intensidad energética del sector.

De este modo, para efectos de NDC deberán considerarse todas las interacciones, así como la forma actual de suministro de energía eléctrica en cada caso, para estar en posibilidad de realizar una contabilidad debida de reducciones de emisiones.

5.4.

Resumen de oportunidades y comentarios finales sobre la industria química

De acuerdo con lo arriba señalado, se construyó la Tabla 60 la cual sintetiza las oportunidades principales de ahorro de energía descritas anteriormente, junto con los potenciales estimados. De dicha puede observarse que las oportunidades de ahorro energético evaluadas representan un potencial de reducción de emisiones teórico y técnico de 6.7 PJ y 3.44 PJ respectivamente, correspondiendo a su vez a una disminución en consumo energético de 6.2% y 3.2%.

Mientras tanto, en el caso de cogeneración el potencial teórico y el técnico representan el 25% y el 10% de reducción de consumo potencial en el sector respectivamente.

En cuanto a mejora en eficiencia por desarrollo tecnológico de procesos de la industria, se sabe de algunas tecnologías que han reducido sus índices de intensidad energética hasta en 50%, si bien esto no se refleja de manera dramática en el índice general de la industria. Por esta razón, no se indica ninguna cifra en la tabla señalada.

Es importante resaltar que estos potenciales se refieren a una matriz de combustibles, estado actual, consideración de usos finales y consumo de la industria química para 2015, por lo que puede haber variaciones en el tiempo, y no se está contabilizando el efecto acumulativo de las acciones, ya que, aunque muchas de ellas no se realizarán en el corto plazo, es posible que el potencial de implementación a largo plazo alcance el potencial teórico señalado.

En cuanto a la cogeneración, es necesario establecer hipótesis más específicas al sector, así como dar consideración a la forma en que se darán las reducciones, pues muchas de ellas se reportarán como una reducción del sector energía, y en algunos casos el consumo energético en una unidad productiva dada podría incrementarse al establecer un sistema de cogeneración con venta de excedentes.

Tabla 60: Resumen de oportunidades de ahorro de energía y optimización energética para la industria química

Oportunidad	Potencial de ahorro	Porcentaje susceptible a aplicación (% de total)	Aplicabilidad técnica (% de total)	Potencial teórico (PJ)	Potencial Técnico (PJ)
Vapor-Aislamiento Térmico	2–5 %	80%	50%	1.12	0.70
Vapor-Manejo Condensado	1–15%	60%	30%	2.11	1.05
Vapor-Ajuste Combustión	1-2%	90%	50%	0.63	0.35
Vapor-Recup. Calor Gases	2 – 3%	50%	25%	0.70	0.35
Vapor-Recup. Calor Purga	0.5–2.5%	90%	50%	0.70	0.35
Vapor-Quemador Alta Efic.	5–15%	25%	10%	0.88	0.35
C y H*-Recup. Calor Gases	7–10%	80%	50%	0.17	0.10
CFT**-Recup. Calor Gases	3%	25%	12.5%	0.01	0.01
Aislamiento refrigeración	1–3%	50%	25%	0.03	0.01
Efic. Bombeo, Compres. Vent.	15–25%	60/40/20%	30/20/10%	0.35	0.17
Cogeneración	N/A	N/A	N/A	27.2	10.9
Totales:				33.9	14.34

*Calentadores y hornos de proceso

** Calentadores de fluido térmico

Fuente: Elaboración propia en el marco de este estudio.

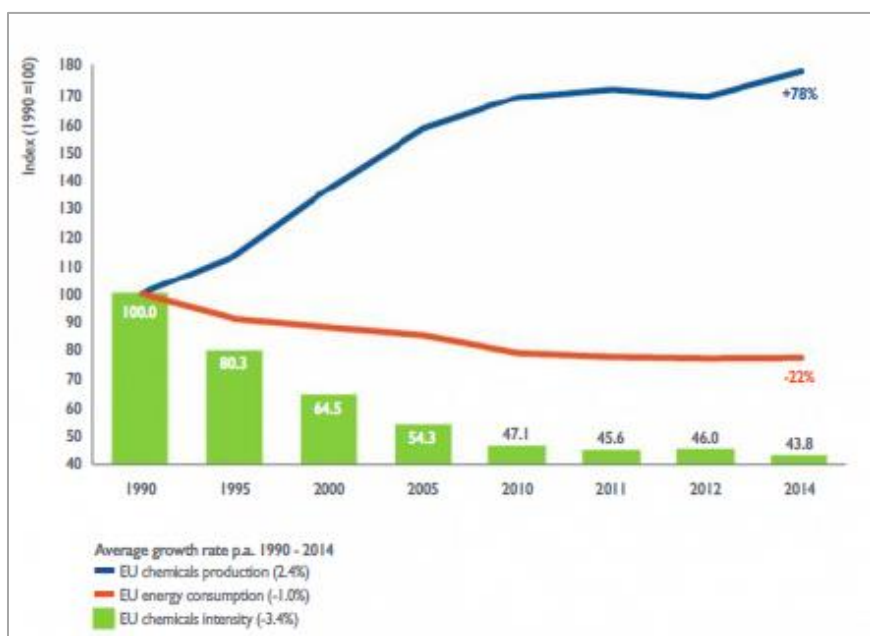
Como comentario final a este análisis de la industria química, puede decirse que el potencial para mejora energética es considerable, y el mismo se elevará a medida que se realicen análisis detallados de consumo y uso final para este subsector.

Como ejemplo de lo anterior, se tiene el caso de la industria europea, de acuerdo con información del Consejo Europeo de la Industria Química (The European Chemical Industry Council, CEFIC)⁷⁰, en donde se ha experimentado una reducción en el consumo y el índice de intensidad energética a lo largo de más de dos décadas de manera sostenida.

Lo anterior se muestra en la Figura siguiente. Se observa en la misma el comportamiento de la producción (azul), del consumo energético (naranja) y del índice de intensidad energética relativo a 1990 (barras verdes).

⁷⁰ Facts and Figures 2016 of the European chemical industry.

Figura 16: Desempeño energético de la industria química europea (2015)



Fuente: CEFIC, 2017.

Es pues, una realidad que la industria química en México tiene muchas oportunidades de alcanzar un crecimiento sostenido y sostenible, a través de una optimización energética, y que seguirá siendo uno de los motores principales de la industria, contribuyendo también a la consecución de los objetivos ambientales y compromisos internacionales que México ha adquirido, destacadamente el cumplimiento de su NDC.

Desde luego se debe para ello sortear las barreras existentes, crear un marco propicio para la inversión y estimular el cambio cultural tanto de empresarios como de trabajadores y de la sociedad con dicho fin.

6. Potencial de cogeneración y eficiencia en los Ingenios de México

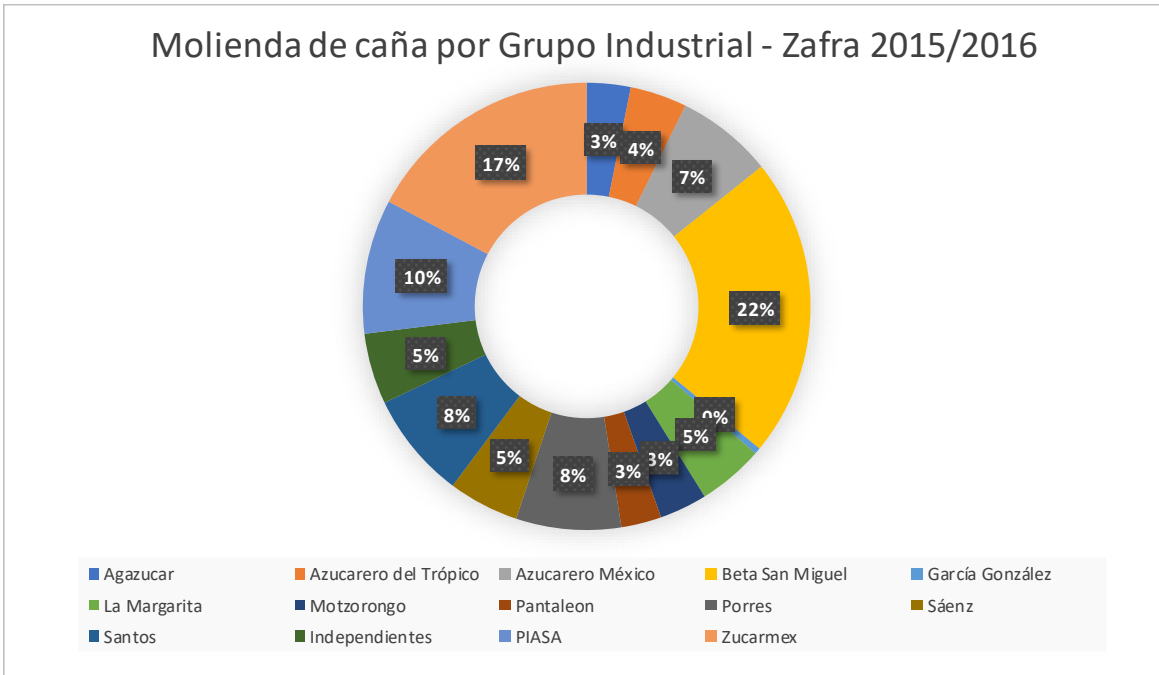
6.1.

Caracterización general del sector

Existen 51 Ingenios azucareros operando en México organizados en 14 grupos (Figuras 1 y 2). Durante la zafra 2015/2016 se molieron 54,188,609 toneladas de caña de azúcar.

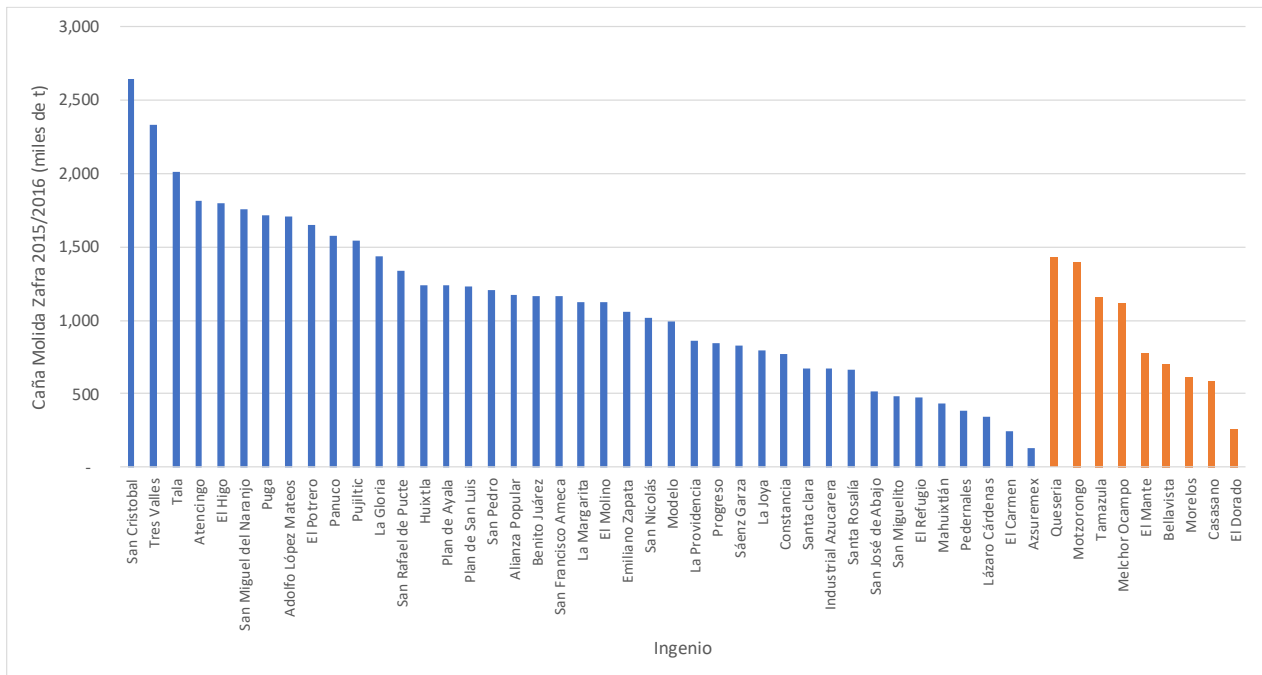
Figura 17: Molienda de caña de la zafra 2015/2016 por grupo industrial en México

Molienda de caña por Grupo Industrial - Zafra 2015/2016



Fuente: Elaboración propia en base a (Cía Editora, 2017).

Figura 18: Molienda de caña de la zafra 2015/2016 por ingenio en México



Fuente: Elaboración propia en base a (Cía Editora, 2017).

6.2.

La cogeneración en los ingenios azucareros

Se asumirá que la energía eléctrica excedente cogenerada que podría inyectarse a la red es una función de la presión de trabajo del sistema de cogeneración. Se observa que a mayor presión y temperatura de trabajo mayor es la energía eléctrica excedente.

Tabla 61: Energía eléctrica excedente en función de la presión de trabajo del sistema de cogeneración

Escenario	Parámetros del sistema de cogeneración	Consumo de vapor en el proceso	Período de generación	Uso de la paja	Energía eléctrica excedente	Bagazo excedente
1	21 bar, 300°C	500 kg/tc	Cosecha	No	10.4 kWh/tc	33 kg/tc
2	42 bar, 400°C	500 kg/tc	Cosecha	No	25.4 kWh/tc	50 kg/tc
3	42 bar, 450°C	500 kg/tc	Cosecha	No	28.3 kWh/tc	48 kg/tc
4	65 bar, 480°C	500 kg/tc	Cosecha	No	57.6 kWh/tc	13 kg/tc
5	65 bar, 480°C	350 kg/tc	Cosecha	No	71.6 kWh/tc	0 kg/tc
6	65 bar, 480°C	500 kg/tc	Todo el año	50%	139.7 kWh/tc	13 kg/tc
7	65 bar, 480°C	350 kg/tc	Todo el año	50%	153 kWh/tc	0 kg/tc

Fuente: BNDES, 2008.

Se asume para el cálculo de los valores de la anterior una producción de 280 kg de bagazo por tonelada de caña con un 50% de humedad y el uso de turbinas a vapor a contrapresión o turbinas de condensación en el caso de generación fuera del periodo de cosecha.

Una presión y temperatura de trabajo de 22 bares y 300°C es suficiente para alcanzar la autosuficiencia en el abastecimiento de electricidad (BNDES, 2008).

Restricciones en la disponibilidad de bagazo limitan en general la generación eléctrica al período de cosecha de la caña (unas 30 de las 52 semanas del año en México). Para extender la generación a todo el año sería necesario almacenar bagazo o recurrir a la paja de la caña, la cual habitualmente queda en el campo y cumple funciones agronómicas (mejora la humedad, estructura y fertilidad del suelo, reducción de la erosión). Por lo tanto, se plantea en los escenarios 5 y 6 la recuperación del 50% de la paja de la caña para generar energía fuera del período de cosecha. El otro 50% se dejaría en campo. La disponibilidad de paja se estima entonces en 70 kg por tonelada de caña.

El caso brasileño es ilustrativo para observar el efecto del marco regulatorio y diversos incentivos sobre los parámetros de trabajo de las calderas y turbogeneradores y por ende la magnitud de los excedentes de electricidad. Efectivamente, hasta la década de 1980 las calderas de los ingenios de

San Pablo trabajaban en el rango de presiones de 12 a 22 bares, debiendo importar el 40% de la electricidad que consumían. A partir de la década de 1990 un proceso de sustitución llevó la presión media de trabajo a 22 bares, para luego seguir creciendo progresivamente motorizada por un cambio regulatorio, permitiendo un crecimiento notable de la inyección de electricidad de los ingenios a la red (BNDES, 2008).

6.3.

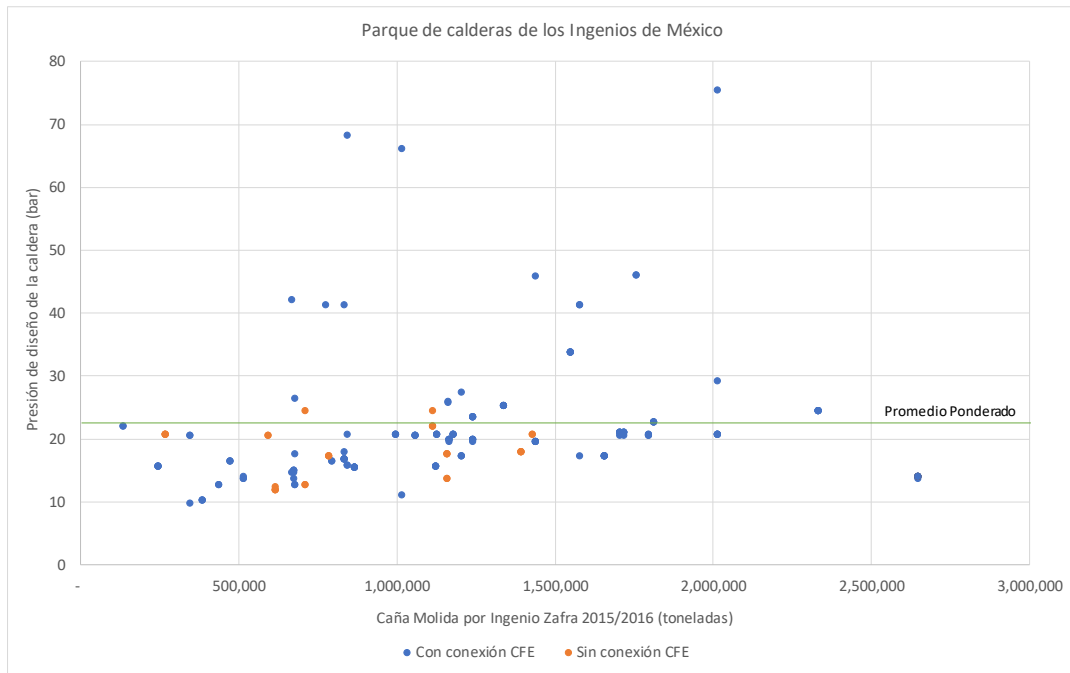
El potencial de cogeneración en los ingenios azucareros de México

En la Figura siguiente se presenta la presión de la mayor parte de las calderas instaladas en los ingenios de México en función de la capacidad de molienda de cada ingenio. A continuación, se brinda una síntesis general del parque de calderas⁷¹:

- Existen 203 calderas instaladas en 48 de los 51 ingenios de México, con una presión de diseño promedio ponderada por la caña molida en cada ingenio de 22.7 bares.
- La mayor parte de las calderas de los ingenios mexicanos trabajan cerca o por debajo de los 22 bares, un valor de presión que les permitiría alcanzar la autosuficiencia pero no generar excedentes significativos para inyectar a la red eléctrica.
- 39 ingenios (82% de la caña molida en la zafra 2015/2016) poseen conexión a la red eléctrica (Con conexión CFE)
- de los ingenios (15% de la caña molida en la zafra 2015/2016) no poseen conexión a la red eléctrica (Sin conexión CFE)
- 3 de las 203 calderas (1.5% del parque) poseen una presión de diseño superior a los 65 bares (instaladas en ingenios que molieron entre 840,000 y 2,000,000 toneladas de caña). Estos ingenios están conectados a la red eléctrica (Tala, San Nicolás, Progreso) y dos de ellos venden excedentes de electricidad.
- 6 de las 203 calderas (3% del parque) poseen una presión de diseño entre 40 y 50 bares (instaladas en 5 ingenios que molieron entre 660,000 y 1,570,000 toneladas de caña). Estos ingenios están conectados a la red eléctrica. 4 de estos ingenios venden excedentes de electricidad.
- La casi totalidad del resto de las calderas (95% del parque) posee una presión de diseño de entre 10 bares y 30 bares (instaladas en ingenios que molieron entre 130,000 y 2,640,000 toneladas de caña). 80% de estos ingenios están conectados a la red eléctrica.
- Tres ingenios venden excedentes a la red pero no poseen calderas de alta presión (Tres Valles, San Rafael de Pucte, Huixtla), todos ellos con calderas de 24-25 bares
- En total existen 9 ingenios con calderas de media y alta presión instaladas (11 calderas de más de 40 bares), de los cuales 6 están vendiendo electricidad a la red (Tala, Santa Rosalía, La Gloria, San Nicolás, Constanica, San Miguel del Naranjo).

⁷¹ "Informe Anual de la Industria del Azúcar" – 2017.

Figura 19: Parque de calderas de los ingenios azucareros de México por presión de diseño y capacidad de molienda del ingenio



Fuente: Elaboración propia en base a (Cía Editora, 2017).

Tabla 62: Características de las calderas instaladas en los ingenios azucareros de México.

Ingenio	Potencial (GWh)								Interconectado
	Caña molida (ton)	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Escenario 7	
San Cristobal	2,646,308	28	67	75	152	189	370	405	Sí
Tres Valles	2,329,987	24	59	66	134	167	325	356	Sí
Tala	2,012,135	21	51	57	116	144	281	308	Sí
Atencingo	1,810,879	19	46	51	104	130	253	277	Sí
El Higo	1,795,411	19	46	51	103	129	251	275	Sí
San Miguel del Naranjo	1,755,784	18	45	50	101	126	245	269	Sí
Puga	1,716,164	18	44	49	99	123	240	263	Sí
Adolfo López Mateos	1,702,820	18	43	48	98	122	238	261	Sí
El Potrero	1,653,120	17	42	47	95	118	231	253	Sí
Panuco	1,574,888	16	40	45	91	113	220	241	Sí
Pujiltilc	1,546,230	16	39	44	89	111	216	237	Sí
La Gloria	1,434,850	15	36	41	83	103	200	220	Sí
San Rafael de Pucte	1,335,437	14	34	38	77	96	187	204	Sí
Huixtla	1,238,907	13	31	35	71	89	173	190	Sí
Plan de Ayala	1,238,218	13	31	35	71	89	173	189	Sí
San Pedro	1,202,882	13	31	34	69	86	168	184	Sí
Alianza Popular	1,174,524	12	30	33	68	84	164	180	Sí
Benito Juárez	1,163,568	12	30	33	67	83	163	178	Sí
San Francisco Ameca	1,161,086	12	29	33	67	83	162	178	Sí
La Margarita	1,123,351	12	29	32	65	80	157	172	Sí
El Molino	1,122,402	12	29	32	65	80	157	172	Sí
Emiliano Zapata	1,056,264	11	27	30	61	76	148	162	Sí
San Nicolás	1,014,907	11	26	29	58	73	142	155	Sí
Modelo	993,538	10	25	28	57	71	139	152	Sí
La Providencia	864,446	9	22	24	50	62	121	132	Sí
Progreso	841,913	9	21	24	48	60	118	129	Sí
Sáenz Garza	830,025	9	21	23	48	59	116	127	Sí
La Joya	792,519	8	20	22	46	57	111	121	Sí
Constancia	771,752	8	20	22	44	55	108	118	Sí
Santa Clara	674,320	7	17	19	39	48	94	103	Sí
Industrial Azucarera	671,912	7	17	19	39	48	94	103	Sí
Santa Rosalía	664,400	7	17	19	38	48	93	102	Sí
San José de Abajo	512,984	5	13	15	30	37	72	78	Sí
El Refugio	471,423	5	12	13	27	34	66	72	Sí
Mahuixtlán	432,924	5	11	12	25	31	60	66	Sí
Pedernales	382,214	4	10	11	22	27	53	58	Sí
Lázaro Cárdenas	342,798	4	9	10	20	25	48	52	Sí
El Carmen	242,071	3	6	7	14	17	34	37	Sí
Azuremex	131,269	1	3	4	8	9	18	20	Sí
Queseria	1,425,200	15	36	40	82	102	199	218	No
Motzorongo	1,391,682	14	35	39	80	100	194	213	No
Tamazula	1,156,945	12	29	33	67	83	162	177	No
Melchor Ocampo	1,112,239	12	28	31	64	80	155	170	No
El Mante	782,506	8	20	22	45	56	109	120	No
Bellavista	706,574	7	18	20	41	51	99	108	No
Morelos	613,196	6	16	17	35	44	86	94	No
Casasano	589,190	6	15	17	34	42	82	90	No
El Dorado	264,043	3	7	7	15	19	37	40	No
Total	52,472,205	546	1,333	1,485	3,022	3,757	7,330	8,028	

Fuente: Elaboración propia en base a (Cía Editora, 2017).

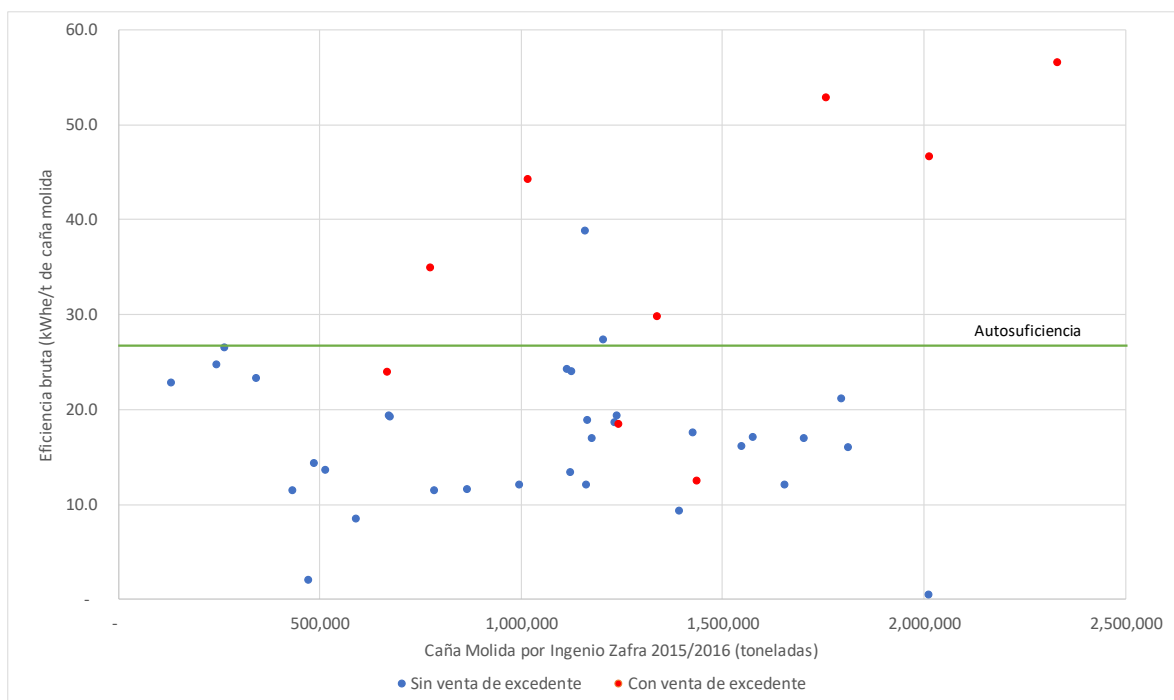
Tabla 63: Características de las centrales eléctricas instaladas en Ingenios de México (Año 2015)

Central	Esquema	Capacidad Bruta (MW)	Capacidad en contrato de interconexión (MW)	Generación Bruta (GWh)	Fc	Caña molida (ton)	Eficiencia (kWh/t caña)
Piasa Cogeneración (Tres Valles)	Cogeneración	40	40	132	38%	2,329,987	56.7
San Miguel del Naranjo	Usos propios continuos	49	49	93	22%	1,755,784	53.0
Tala Electric	Cogeneración	25	25	94	43%	2,012,135	46.7
San Nicolás	Usos propios continuos	14	14	45	37%	1,014,907	44.3
Tamazula	Autoabastecimiento	10	Sin contrato	45	51%	1,156,945	38.9
Bsm Energía de Veracruz	Autoabastecimiento	13	13	27	24%	771,752	35.0
San Rafael de Pucté	Autoabastecimiento	9	Sin contrato	40	51%	1,335,437	30.0
Grupo Azucarero San Pedro	Autoabastecimiento	10	Sin contrato	33	38%	1,202,882	27.4
El Dorado	Autoabastecimiento	10	Sin contrato	7	8%	264,043	26.5
El Carmen	Usos propios continuos	7	Sin contrato	6	10%	242,071	24.8
Melchor Ocampo	Autoabastecimiento	6	Sin contrato	27	51%	1,112,239	24.3
Santa Rosalía de La Chontalpa	Usos propios continuos	25	25	16	7%	664,400	24.1
La Margarita	Usos propios continuos	7	Sin contrato	27	44%	1,123,351	24.0
Lázaro Cárdenas	Autoabastecimiento	6	Sin contrato	8	15%	342,798	23.3
Azuremex	Autoabastecimiento	3	Sin contrato	3	11%	131,269	22.9
El Higo	Autoabastecimiento	22	Sin contrato	38	20%	1,795,411	21.2
Plan de Ayala	Usos propios continuos	16	Sin contrato	24	17%	1,238,218	19.4
Compañía Industrial Azucarera	Usos propios continuos	6	Sin contrato	13	25%	671,912	19.3
Santa Clara	Usos propios continuos	9	Sin contrato	13	16%	674,320	19.3
Presidente Benito Juárez	Autoabastecimiento	14	Sin contrato	22	18%	1,163,568	18.9
Plan de San Luis	Autoabastecimiento	9	Sin contrato	23	29%	1,230,730	18.7
Huixtla Energía	Cogeneración	12	12	23	22%	1,238,907	18.6
Quesería	Usos propios continuos	6	Sin contrato	25	48%	1,425,200	17.5
Panuco	Usos propios continuos	18	Sin contrato	27	17%	1,574,888	17.1
Adolfo López Mateos	Autoabastecimiento	14	Sin contrato	29	24%	1,702,820	17.0
Alianza Popular	Autoabastecimiento	6	Sin contrato	20	38%	1,174,524	17.0
Compañía Azucarera la Fé	Autoabastecimiento	13	Sin contrato	25	22%	1,546,230	16.2
Atencingo	Usos propios continuos	15	Sin contrato	29	22%	1,810,879	16.0
San Miguelito	Autoabastecimiento	5	Sin contrato	7	16%	485,674	14.4
San José de Abajo	Usos propios continuos	8	Sin contrato	7	10%	512,984	13.6
El Molino	Autoabastecimiento	10	Sin contrato	15	17%	1,122,402	13.4
La Gloria	Usos propios continuos	53	22	18	4%	1,434,850	12.5
El Potrero	Usos propios continuos	10	Sin contrato	20	23%	1,653,120	12.1
El Modelo	Usos propios continuos	9	Sin contrato	12	15%	993,538	12.1
San Francisco Ameca	Autoabastecimiento	5	Sin contrato	14	32%	1,161,086	12.1
La Providencia	Usos propios continuos	7	Sin contrato	10	16%	864,446	11.6
Mahuixtlán	Usos propios continuos	3	Sin contrato	5	19%	432,924	11.5
El Mante	Autoabastecimiento	6	Sin contrato	9	17%	782,506	11.5
Central Motzorongo	Usos propios continuos	20	Sin contrato	13	7%	1,391,682	9.3
Casasano	Usos propios continuos	3	Sin contrato	5	19%	589,190	8.5
El Refugio	Usos propios continuos	4	Sin contrato	1	3%	471,423	2.1
Tala	Autoabastecimiento	12	Sin contrato	1	1%	2,012,135	0.5
Total (incluye CFE?)		632	240	1,105	20%	48,945,554	22.6

Fuente: Elaboración propia en base a (PRODESEN, 2016) y (Cía Editora, 2017).

Al graficar la eficiencia bruta de generación de los ingenios se percibe una situación análoga a la observada para las calderas en relación al nivel requerido para lograr el autoabastecimiento. Efectivamente, la eficiencia bruta de los ingenios en general se sitúa por debajo o cerca del nivel típico requerido para satisfacer el consumo interno del ingenio (28 kWh/t de caña molida). Por encima de este nivel en general se sitúan ingenios que poseen calderas de alta o media presión. También existen ingenios que poseen alguna caldera de alta o media presión y que venden sus excedentes, pero cuyo parque de calderas hace que en el promedio tengan una eficiencia inferior a 28 kWh/t de caña.

Figura 20: Eficiencia bruta de generación de los ingenios azucareros de México en función de la capacidad de molienda del ingenio



Fuente: Elaboración propia en base a (Cía Editora, 2017) y (PRODESEN, 2016).

Tal como se indicó más arriba, existen en México 9 ingenios de 6 Grupos que estarían generando excedentes de electricidad, seis de los cuales han instalado calderas de media y alta presión (>40 bares). En su conjunto estos ingenios representan el 24% de la caña molida en la zafra 2015/2016.

Tabla 64: Ingenios de México que venden electricidad a la red o a socios

Grupo	Ingenio	Caña molida (ton)	Excedente (GWh)	Rendimiento excedente
PIASA	Tres Valles	2,329,987	67	29
Azucarero México	Tala	2,012,135	31	15
Beta San Miguel	San Miguel del Naranjo	1,755,784	68	39
Azucarero del Trópico	La Gloria	1,434,850	2	1
Beta San Miguel	San Rafael de Pucte	1,335,437	3	2
Porres	Huixtla	1,238,907	5	4
Independiente	San Nicolás	1,014,907	17	16
Beta San Miguel	Constancia	771,752	7	9
Beta San Miguel	Santa Rosalía	664,400	4	5
Total		12,558,159	202	26

Fuente: Elaboración propia en base a (Cía Editora, 2017) y (PRODESEN, 2016).

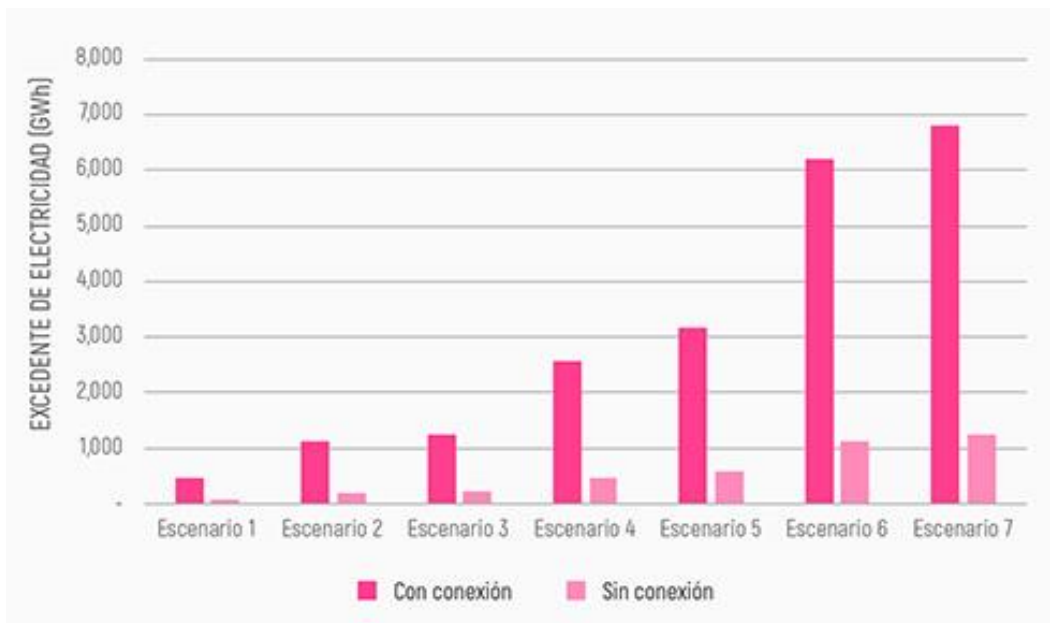
Puede observarse que el rendimiento máximo en la producción de excedentes (39 kWh/t de caña) se sitúa entre los valores de los escenarios 3 y 4 de la Tabla (28-57 kWh/t caña) y que el promedio para los 9 ingenios se sitúa cerca del escenario 2 de la Tabla (25.4 kWh/t).

Teniendo en cuenta estos datos, se estiman a continuación potenciales de cogeneración para diversos escenarios en base al acondicionamiento y sustitución de calderas y turbogeneradores de baja eficiencia por equipos de mayor eficiencia y presión. Para ello se utilizarán los escenarios y valores de energía excedente ya presentados. Las Figuras siguientes presentan los potenciales de excedentes de electricidad (energía y potencia respectivamente) en función de los escenarios considerados para los ingenios con conexión y sin conexión a la red (en base a la molienda de la zafra 2015/2016). Para la estimación de la potencia se asume un factor de capacidad del 40%, similar al que alcanzaría el Ingenio Tala al completar su proyecto de implantación de calderas de alta presión (Escenarios 1 a 5).

Como referencia se puede indicar que la venta actual de electricidad a la red o a socios por parte de los ingenios se situaría actualmente alrededor de los 200 GWh por zafra.

En todos los escenarios prácticamente se eliminaría la necesidad de generar con otros combustibles que no fueran bagazo durante el período de cosecha (combustóleo, 2% del total del consumo del sector en el año 2015, 0.75 PJ) o de importar electricidad de la CFE (9.5% del total del consumo del sector en el año 2015, 3.55 PJ) (FB, 2017), salvo situaciones puntuales. Adicionalmente, en los escenarios 6 y 7 se eliminaría esta necesidad durante todo el año. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) evitadas por la sustitución de los petrolíferos en los ingenios azucareros representarían el 49% del total de emisiones GEI de los ingenios en el año 2015 (ahorro de 58 Gg de CO₂eq).

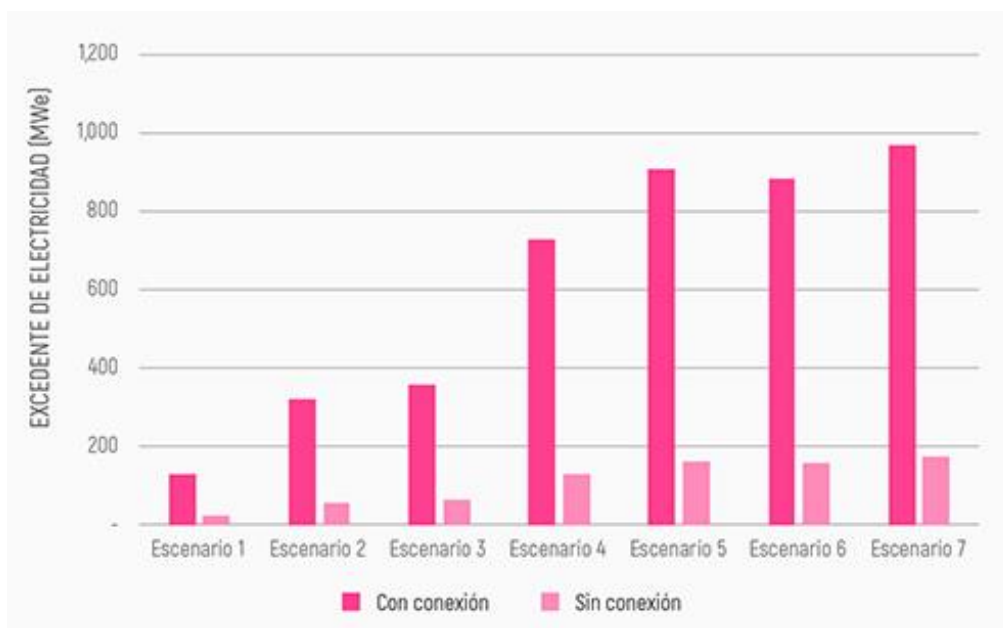
Figura 21: Potencial de excedentes de electricidad generado en ingenios (GWh)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los escenarios 1 a 5 sólo generarían durante el período de cosecha de la caña.

Figura 22: Potencial de excedentes de electricidad generado en ingenios (MW)



Fuente: Elaboración propia.

Los escenarios 1 a 7 presentan un orden creciente de excedentes de electricidad y de requerimientos de inversiones. El escenario 1 es el que se muestra como más viable en el corto plazo debido a que eventualmente se podrían reacondicionar algunas de las calderas y grupos generadores, en tanto que se debería sustituir otros. Los demás escenarios involucrarían la sustitución de todas las calderas de baja potencia y grupos generadores asociados. Ya existen en México 9 ingenios con al menos una caldera cuyas características son compatibles con los escenarios 2 a 5 (40 a 70 bares). El escenario 5 constituiría un escenario de máxima factible de ser alcanzado en el mediano plazo. El potencial de generación de excedentes en los ingenios conectados a la red en dicho escenario es cercano a los 3,000 GWh (900 MWe). Por último, los escenarios 6 y 7 plantean el desafío adicional del manejo de la paja de la caña, reduciendo su factibilidad frente al resto de los escenarios, pero constituyendo una opción interesante en el mediano y largo plazo por las ventajas que representa para el sistema eléctrico y para el ingenio (mejora del factor de capacidad de las centrales).

En el corto plazo, un posible nicho para incrementar los excedentes podría buscarse en los ingenios de seis Grupos Azucareros que ya han implementado este tipo de medidas. Excluyendo a los independientes estos grupos controlan 24 ingenios que concentran el 50% de la caña molida en la zafra 2015/2016. Otro posible nicho se encuentra en los ingenios conectadas a la red que poseen calderas con presión de diseño cercana a los 20 bares (40% del total de calderas) y analizar cuáles de ellas y sus grupos de generación asociados podrían ser reacondicionados para generar excedentes exportables a la red. Por último, dadas las características de algunas de las calderas de

los ingenios Panuco, Pujilic, Progreso y Sáenz Garza sería recomendable investigar el potencial de generación de excedentes en los mismos.

No se dispone de datos de costos de sistemas modernos de cogeneración para ingenios en México. Como referencia, el costo de inversión en un sistema de cogeneración para ingenios en Brasil se estima en 1,400 USD/kW y el costo de O&M es cercano 84 USD/kW año (Dantas, 2013).

6.4.

Otras medidas de eficiencia

6.4.1. Secado del bagazo para bajar el % de humedad e incrementar la eficiencia en la generación de vapor

El bagazo quemado en los ingenios para la producción de vapor posee entre un 50% y un 55% de humedad, con un 50.5% en promedio nacional para la zafra 2015/2016 (SAGARPA, 2017). A raíz de ello algunos ingenios realizan una co-combustión con combustóleo. A pesar de ello, el consumo de combustóleo se sitúa actualmente cerca de 0.33 litros por tonelada de caña, habiendo descendido desde cerca de 8 litros por tonelada de caña molida en la zafra 2007/2008. La principal barrera para el secado del bagazo sería de índole económica.

El bagazo se podría secar con los gases de escape de las calderas (aproximadamente a 250°C) para lograr entre un 35% y un 41% de humedad (Cárdenas, 2014). La limitación del 35% está asociada a evitar problemas de condensación del gas de salida del proceso. Ello equivaldría a llevar el poder calorífico inferior de 7,070 kJ/kg de bagazo a entre 9,200 y 10,400 kcal/kg de bagazo. Esto podría eliminar la necesidad de quemar combustóleo en algunos ingenios y además producir un excedente de bagazo para quemar fuera del periodo de zafra, de tal forma de vender electricidad a la red al tiempo que se mejora el factor de capacidad de las centrales. La reducción del contenido de humedad del 51% al 41% podría producir un ahorro neto de bagazo utilizado en calderas cercano al 18% (D'Angelo, 2006).

Tabla 65: Estimación del excedente de bagazo por secado, en base a los datos de la zafra 2015/2016

Escenario	Humedad bagazo	PCI bagazo kJ/kg	Requerimiento Bagazo para ingenio		Combustóleo PJ	EE CFE PJ	Demanda total PJ	Excedente Bagazo PJ
	%		Ton	PJ				
Base	51.1%	7,071	14,369,384	101.3	0.74	0.169	102.3	0.20
Escenario 8	41.0%	9,168	11,782,895	83.1	0	0	83.1	18

Fuente: Elaboración propia en base a (D'Angelo, 2006).

El Escenario 8 podría extender la generación una vez finalizada la zafra sin necesidad de utilizar residuos agrícolas (e.g. paja de la caña).

Para secar el bagazo existe la posibilidad de utilizar sistemas de secado al aire libre, de tipo túnel, neumático y rotatorio, siendo este último el más empleado y el de menor costo de inversión. Se tiene registro de la utilización de esta tecnología en tres de los 51 ingenios de México, Tamazula, El Carmen y Puga (Cárdenas, 2014). Sin embargo, existen registros de la falta de viabilidad económica de la operación de secado en ingenios mexicanos (CONUEE, 2009), aspecto que deberá ser investigado más en profundidad. A raíz de ello, es necesario explorar la posibilidad de venta de electricidad como sociedad de autoconsumo en lugar de la venta a la CFE y cómo afecta la ecuación financiera el incremento del factor de capacidad de las centrales por operación fuera del período de zafra.

La utilización de equipos de secado al aprovechamiento de los gases de combustión de la caldera es posible tanto en calderas de baja, media y alta presión, aunque en este último caso los resultados son más modestos (5 a 6 puntos porcentuales de reducción de la humedad) (Colombres, 2010).

No se poseen datos de costos de secadores de bagazo para México.

6.4.2. Modelación en LEAP

Se sugiere modelar el escenario 8, con una penetración paulatina de la medida de secado de bagazo al 41% de humedad en todos los ingenios.

Instalación de VFD (Variable Frequency drives) en bombas, elevadores, cintas transportadoras de caña y ventiladores

Las variaciones frecuentes en la molienda de la caña de azúcar ocasionan cambios en la carga a la que se ven sometidos los equipos de fuerza motriz. Bajo estas condiciones, la utilización de VFD contribuye a mejorar la eficiencia de operación. Dado que no se dispone de datos de ahorro potencial para el uso fuerza motriz en el caso de los ingenios mexicanos, se extrapolaron potenciales de ahorro en base a la bibliografía internacional (Rao, 2012) y a la capacidad de molienda mexicana (SAGARPA, 2017). La Tabla 66 muestra los resultados para dos escenarios de ahorro, brindando un potencial situado entre 3% y 7% de la demanda de electricidad de los ingenios en la zafra 2015/2016

Tabla 66: Escenarios de potencial de ahorro por instalación de VFD en los ingenios mexicanos

	Componente	Escenario 9	Escenario 10
Ahorro específico (kWh/t de capacidad de molienda diaria)	Transportador de caña	14	24
	Bombas y compresores	51	80
	Ventiladores	11	93
	Total	77	197
Ahorro	GWh/año	28	73
	% demanda EE ingenios 2015/16	3%	7%

Fuente: Elaboración propia en base a (RAO, 2012)

Estos valores representan estimaciones que deberán ser contrastadas contra las posibilidades de ahorro en México mediante el relevamiento de información local.

No se poseen datos de costos de instalación de VFD en ingenios para México.

7. Potencial de ahorros en el subsector de pequeña y mediana empresa (PyMES) industrial

7.1

Caracterización económica y productiva del subsector PyMES industrial

Previo a la exposición relacionada con la pequeña y mediana empresa industrial en México, a la cual en adelante se denominará simplemente como “PyMES”, es conveniente recordar que la clasificación de las industrias en México obedecía hasta 2009 exclusivamente al número de trabajadores que cierto establecimiento o empresa ocupaba directamente, por lo que no consideraba otras variables operativas o financieras.

En junio de 2009, la Secretaría de Economía publicó el acuerdo por el que se establece la estratificación de las micro, pequeñas y medianas empresas, en el cual se incluye el criterio de monto de ventas anuales y se define un tope máximo combinado, junto con la fórmula para su cálculo, el valor del cual determina en última instancia el estrato en el que debe ubicarse la industria en cuestión.

La Tabla 67 muestra la estratificación de empresas de acuerdo con esta nueva clasificación, identificando aquellos a los que se refiere esta sección.

Tabla 67: Clasificación de empresas industriales en México.

Clasificación	Número de trabajadores*	Ventas anuales (millones MXN)	Tope máximo combinado**	Notas
Micro-empresa	1 – 10	≤ \$4	4.6	No forma parte de este análisis
Pequeña empresa	11 – 50	\$4.01 a \$100	95	✓ Forma parte de este análisis
Mediana empresa	51 – 250	\$100.01 a \$250	250	✓ Forma parte de este análisis
Gran empresa	>250	> \$250	N/A	No forma parte de este análisis

*Se consideran sólo trabajadores efectivos permanentes promedio.

** Tope Máximo Combinado = (Trabajadores) X 10% + (Ventas Anuales) X 90%.

Fuente: Elaboración propia con información del Diario Oficial de la Federación del 30/06/2009.

No obstante, lo anterior y la fecha en que fue publicado el acuerdo referido, en general en la documentación y estudios oficiales en México al respecto, una PyME se sigue definiendo prioritariamente de acuerdo con el personal que ocupa.

Lo anterior coincide con otras clasificaciones de PyME a nivel internacional, por ejemplo, el sistema de clasificación de empresas de la Comisión Europea, en cuanto a número de trabajadores para la industria⁷², pero difiere con ellos en cuanto a los niveles de ventas, e incluyen otros conceptos, el balance general en este caso, que representa el valor de los activos de la empresa elevado al año.

Figura 23: Criterios para clasificación de empresas de acuerdo con el sistema de la Comisión

Europea

Categoría de empresa	Efectivos: Unidades de trabajo anual (UTA)	Volumen de negocios anual	Balance general anual
Medianas	< 250	≤ 50 millones EUR	≤ 43 millones EUR
Pequeñas	< 50	≤ 10 millones EUR	≤ 10 millones EUR
Microempresas	< 10	≤ 2 millones EUR	≤ 2 millones EUR

Fuente: Comisión Europea.

⁷² Las PyME comerciales y de servicios en México tienen umbrales de personal más bajos para pequeñas y medianas empresas, con un límite de 100 trabajadores para ser consideradas como tales.

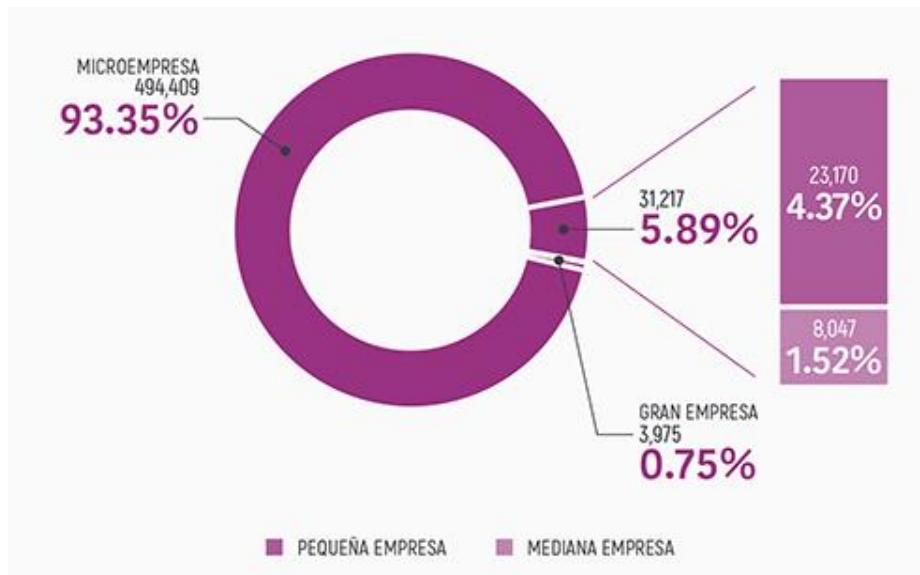
Además de los criterios de estratificación indicados, el sistema de la Comisión Europea establece otros para permanencia y cambio de clasificación, atendiendo a la temporalidad de cruce de umbrales, al tipo de control y la propiedad compartida de empresas diferentes a aquella que busca clasificarse, todo lo anterior con la intención de que los programas e instrumentos de apoyo y fomento sean dirigidos a las empresas que en realidad los requieran.

La discusión anterior se considera relevante en el contexto de este análisis, pues el concepto aplicado en México, que como se indicó se orienta aún por el número de trabajadores, ha sido históricamente una de las causas de que programas e instrumentos de apoyo para este subsector de la industria en ocasiones beneficien a industrias con capacidad técnica y económica suficiente para continuar su desarrollo normal aun sin contar con ellos, reduciendo en consecuencia el alcance y extensión de aplicación de los mismos en grupos de PyME donde su impacto sería mayor.

La industria manufacturera en su conjunto, de acuerdo con la información contenida en el Directorio Nacional de Unidades Económicas⁷³, se estima que estaba integrada en 2016⁷⁴ por un total de 529,601 establecimientos.

La misma fuente señala que de ese total, 494,409 establecimientos correspondieron a microempresas, 3,975 a grandes empresas, y el resto, es decir 31,217 correspondieron a PyME. La siguiente Figura muestra la distribución porcentual de esta estratificación.

Figura 24: Distribución porcentual de estratos de industrias de manufactura en México.



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI (DENUE, 2016).

⁷³ DENUE, décima edición 11/2017.

⁷⁴ Debido a la metodología de actualización del DENUE, los datos mostrados se integran por una mezcla de datos de diferentes años, que van de 2013 a 2017, si bien se considera que existe un alto nivel de certidumbre en que los datos reportados reflejan la situación de la industria manufacturera en 2016.

De este modo, si no se consideran las grandes empresas, las MiPyME industriales manufactureras se estructuran como sigue:

- Microempresas: 94.06%
- Pequeñas empresas: 4.41%
- Medianas empresas: 1.53%

Lo anterior presenta diferencias con los resultados de la Encuesta Nacional sobre Productividad y Competitividad de las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (ENAPROCE) de 2015, publicados en julio de 2016⁷⁵, la cual incluye a estos tres grupos para todos los sectores económicos no agropecuarios o forestales, y señala que los porcentajes anteriores son: Microempresas 97.6%, pequeñas empresas 2.0% y medianas empresas 0.4%, para un total de 4,048,543 unidades económicas.

Esto puede explicarse debido a que la producción de manufacturas en general requiere de mano de obra más intensiva para pequeñas operaciones que el sector comercio y servicios, por lo cual se observa dicho incremento en la proporción de pequeñas y medianas empresas.

Así mismo, muchas de las microempresas industriales se clasifican así por su producto final y por realizar procesos industriales para obtenerlo, si bien en un gran número dichos procesos corresponden a clasificación, ensamble, acondicionamiento y empaque de materiales e insumos ya procesados, por lo cual el aporte energético para proceso es marginal.

En cuanto al personal ocupado en las MiPyME en general, la ENAPROCE señala que, de acuerdo con las estimaciones realizadas sobre la muestra estadística consultada, su número es de aproximadamente 2.8 millones de trabajadores, incluyendo aquéllos no contratados directamente.

Esta misma encuesta señala que del total anterior, las PyME industriales manufactureras ocuparon en 2014 a cerca de 1.07 millones de trabajadores, es decir el 37.8% del total empleado para estos estratos de empresas y generan, aproximadamente, el 30% del Valor Agregado Industrial. Debido a estas características, y al tipo de análisis que se realiza, relacionado con medidas de ahorro energético derivadas o impulsadas por políticas y/o instrumentos de apoyo y fomento, el enfoque se ha hecho sobre las pequeñas y medianas empresas industriales en principio y, derivado de análisis previos y de la actualización de datos de los mismos, desarrollados por Fundación Bariloche en el desarrollo de estos trabajos, se han seleccionado algunos subsectores de PyME como objeto particular de estudio. El sector manufacturero, debido a la multiplicidad de actividades, presenta oportunidades de crecimiento.

⁷⁵ Puede consultarse en: http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/boletines/2016/especiales/especiales2016_07_02.pdf

Estas oportunidades de crecimiento implican que a su vez se incrementen las necesidades energéticas aplicables, además de una necesaria optimización operativa de las instalaciones actualmente operando con tecnologías obsoletas o prácticas que hacen dispendio de los recursos energéticos, una razón adicional por la cual la inclusión y el análisis de este subsector en esta consultoría es relevante.

Al ser las PyME un subsector con base en criterios puramente económicos, aun cuando se estudie en el marco del subsector de industria manufacturera, la contabilidad de producción total de este subsector no puede reportarse más que en unidades económicas, pues la gran variabilidad en actividades y productos y la falta de información detallada, debido en gran parte al alto número de establecimientos catalogados como PyME manufactureras, lo que hace poco realista pensar en un parámetro universal que tome en cuenta las diferencias entre ellos para fines de comparación.

Lo anterior representa un reto al analizar a las PyME manufactureras desde el punto de vista energético, pues incluye muy diversos perfiles de aportación de energía unitaria, tipos de procesos y valor final de productos.

Baste decir que la industria manufacturera se divide para fines de reporte y estudio, en 21 ramas y 240 clases de actividad.

Como se ha explicado en otras secciones de este capítulo, existe una alta vulnerabilidad de la PyME a las situaciones de mercado, debido a sus mayores costos de producción unitarios, relacionados directamente con la energía. Esto refuerza la necesidad de la atención a este estrato de empresas en la mayoría de las ramas industriales de manufacturas.

Así, utilizando la información disponible públicamente, así como análisis realizados por CONUEE, GIZ y otros actores en esfuerzos del subsector en pro de la competitividad y el respeto al medio ambiente, permiten establecer líneas generales y algunas particulares de acción, con potenciales estimados por los propios expertos de la industria.

7.2.

Caracterización energética del subsector PyME

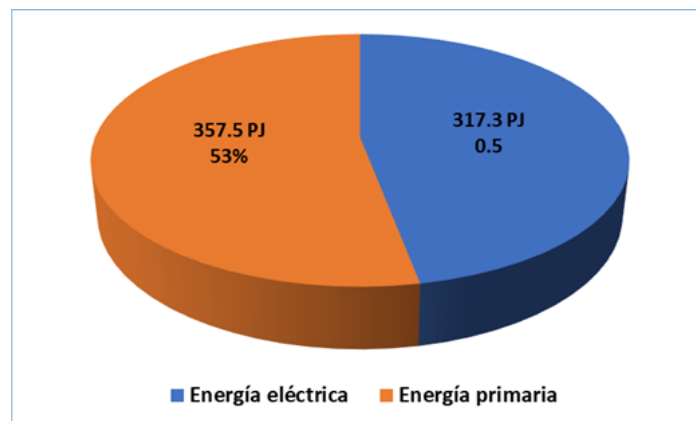
7.2.1. Consumo y matriz energética

Como se mencionó en la sección anterior, la profusión de líneas de producto y de procesos de producción representa también diferentes mercados y precios, así como costos de producción y consumo energético en cada caso.

No existe una estadística oficial acerca del consumo energético de las PyME manufactureras. Sin embargo, dos estudios, “Recomendación estratégica sobre tecnologías y subsectores como orientación para sustentar acciones de eficiencia energética en el sector PyME”, e “Introducción a la Eficiencia Energética y Sistemas de Gestión de la Energía en Pymes de México”, ambos realizados con el apoyo de la Cooperación Alemana al Desarrollo Sustentable en México (GIZ) y coordinados con CONUEE, así como un análisis denominado “La importancia del consumo de energía en inmuebles no residenciales en México y su evidente subestimación en las estadísticas Nacionales”⁷⁶, y las actualizaciones y proceso de la información emanada de ellos y otras fuentes tanto por expertos de GIZ como por el equipo de consultoría de Fundación Bariloche⁷⁷, permiten establecer que el subsector PyME manufacturero tuvo un consumo energético en 2015 de 674.84 PJ. De este consumo, 317.3 PJ corresponderían a energía eléctrica y 357.5 a energía primaria.

No existen datos suficientes para establecer con detalle la matriz energética de las PyMES manufactureras en cuanto a tipos de energía primaria por subsector de PyMES (industrial, comercial y de servicios), por lo que en la Figura se muestra la participación porcentual de estos dos tipos de energía en dicha matriz.

Figura 25: Distribución porcentual de tipos de energía consumida por el subsector PyME manufacturero en México (2015)



Fuente: Elaboración propia, con datos del Balance Nacional de Energía 2015.

7.2.2. Usos finales de la energía

Como se ha reiterado en el presente capítulo, existe una infinidad de procesos y formas de producción de manufacturas. El subsector PyME manufacturero, por tanto, tiene una gran diversidad de usos finales de energía. Es común el empleo de cantidades significativas de energía

⁷⁶ De Buen, Odón, 2016.

⁷⁷ Nadal, Gustavo, 2017.

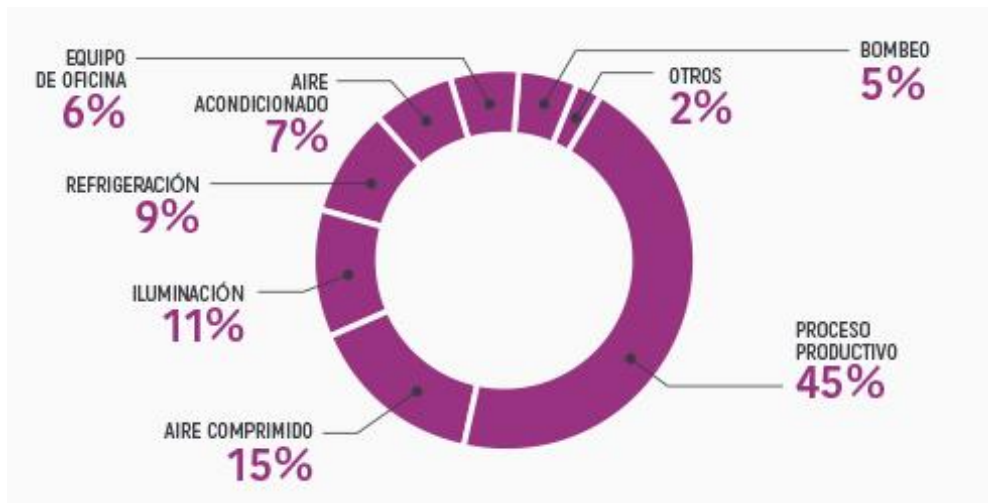
en forma de vapor para calentamiento, alimentación a proceso, depuración de corrientes, desodorización, limpieza y otros usos, así como hornos, calentadores de proceso y túneles de secado.

Los motores y sistemas eléctricos son empleados en la mayoría de los sistemas de aire comprimido, iluminación, equipo y operaciones de proceso y aire acondicionado entre otros. En comparación con la industria pesada, la fracción de energía eléctrica utilizada para alumbrado como porcentaje del consumo de energía eléctrica total es mayor en las, debido principalmente a la relación entre el tamaño físico de las instalaciones con relación a su producción, con las estimaciones realizadas.

Gracias al procesamiento y actualización de información relacionada con los estudios mencionados antes, se pudo actualizar la composición encontrada en los mismos para los usos finales de la energía, tanto eléctrica como primaria en diversas PyME de intensidad energética moderada a alta, de acuerdo a los porcentajes de participación de los costos energéticos en los costos totales.

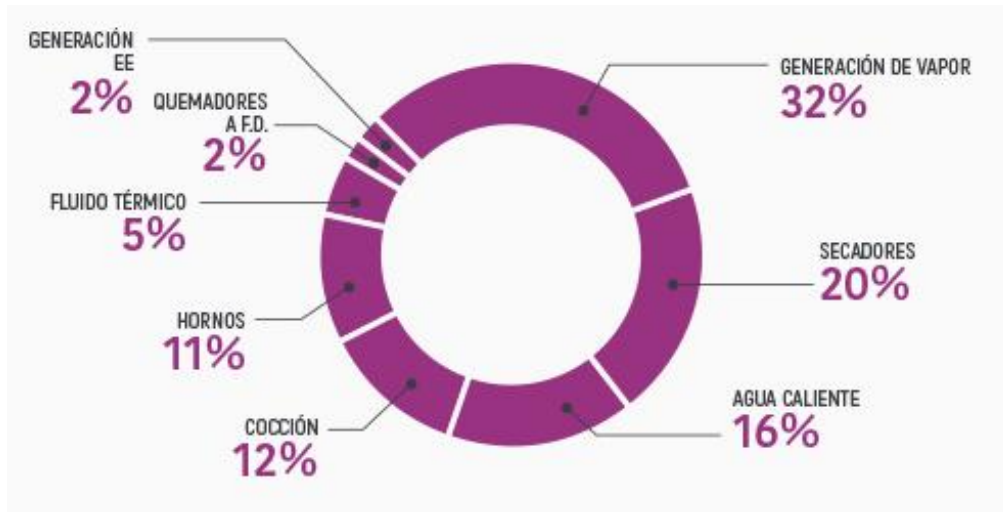
De acuerdo con lo anterior, y aunque el estudio tomó como parámetro de reporte el grado de utilización en PyME individuales de cada tipo de energético asociado a un uso final, y no el consumo total de este subsector, es de esperar que los resultados puedan tener algunas imprecisiones. Los perfiles de uso de energía estimados se presentan en las Figuras 27 y 28 a continuación.

Figura 26: Usos finales de energía eléctrica en PyME manufactureras en México



Fuente: Elaboración propia con información procesada por Fundación Bariloche 2017.

Figura 27: Usos finales de energía primaria en PyME manufactureras en México



Fuente: Elaboración propia con información procesada por Fundación Bariloche 2017.

7.3.

Medidas para el uso eficiente de la energía en el subsector PyME

Al analizar los usos finales de la energía, debe considerarse que una buena parte de los equipos térmicos y la infraestructura relacionada tiene más de 20 años de antigüedad⁷⁸, o bien no es operado en condiciones no óptimas. Esta situación puede deberse a condiciones de diseño de origen, o bien a cambios en niveles de producción o de líneas de producto que han ocasionado la desviación en la operación de equipos y sistemas, en comparación con sus parámetros de diseño y operación óptimos.

Con base en lo anterior, puede establecerse un listado preliminar de medidas susceptibles de tener un impacto relevante en el consumo de energía, y por tanto en las emisiones de GEI del subsector de industria PyME. Dicho listado está alineado con los análisis realizados para las diferentes ramas industriales, por lo cual ayudarían al cumplimiento del NDC de México. Una explicación breve y el potencial relativo estimado de ahorro, se presenta en los listados siguientes, dedicados uno a energía eléctrica y el otro a energía primaria. No se establece en esta versión del documento un potencial absoluto al no conocerse el consumo energético de las ramas que finalmente serán analizadas, aunque se harán estimaciones acordes a ello y a información superveniente de un análisis actualmente en desarrollo, elaborado por expertos de la GIZ.

Este listado no pretende ser exhaustivo, por lo que existen cuando menos varias decenas de oportunidades con menor potencial ya sea de aplicación extendida o de reducción de consumo de energía. Los análisis y consideraciones se realizaron para las medidas que se consideran rentables

⁷⁸ Apuntes de taller de grupo de trabajo del Protocolo de Eficiencia en Calderas de México, Climate Action Reserve (CAR) 2016

y que serían susceptibles de ser apoyadas específicamente mediante campañas o instrumentos. Se explican los siguientes casos mencionados:

Motores de alta eficiencia: salvo casos excepcionales, sólo se consideran económicos cuando se conjuntan con un cambio programado de un motor, ya que de tal modo el costo diferencial entre el motor de eficiencia normal y el de alta eficiencia sería la inversión por recuperar. No obstante, en México sólo pueden comercializarse motores de alta eficiencia, por lo que no es muy clara la diferencia con BAU, a menos que se trate de motores de eficiencia Premium, en donde se aplica el primer comentario.

Aire comprimido y HVAC. En el primer caso se incluye en sistemas de bombeo, compresión y ventilación. En el segundo caso, la carga por dichos sistemas no es tan alta en la industria, pues principalmente se utiliza para climatización de ambientes, y ello está incluido en los programas que FIDE apoya.

Capacitores, tarifas, políticas de operación y automatización relacionada con demanda, no son medidas de eficiencia energética, sino de ahorro económico.

Además de las mencionadas, existen muchas más medidas y subtipos de medidas de entre las señaladas, pero dado el contexto de propuesta de instrumentos relacionada con modelación de impacto, y ante la falta de información disponible, se incurriría en mayor imprecisión al tratar de ir a un nivel mayor de detalle, pues ello sólo podría hacerse con base en suposiciones realizadas sobre otras suposiciones.

Es importante señalar que se ha considerado un porcentaje de aplicabilidad basado en la experiencia del equipo de consultoría en el mercado mexicano, si bien los programas y políticas generalmente utilizarán la dimensión total del potencial como meta aspiracional. Por ello se dan elementos para cuantificar ambos escenarios. Así mismo, se utilizan los potenciales de reducción relativos del lado bajo para ser conservadores en la estimación.

Se ha considerado como potencial para reducción de combustible el potencial de reducción de consumo de vapor o de pérdidas, en los casos de medidas que no son aplicables directamente en la caldera. En realidad, la estimación debe hacerse dividiendo a dichas pérdidas o reducción de consumo de vapor por la eficiencia de la caldera, por lo que los ahorros reales serían mayores a los descritos. Nuevamente, lo anterior se hace en pro de ser conservadores en la estimación.

Lo mismo aplica para energía eléctrica, en donde un ahorro en consumo redundará en un ahorro mayor en los casos en que la electricidad es transformada dentro de la instalación, así como en todos los casos debido a las pérdidas de conducción. Y en los casos en que se genera electricidad, los ahorros se traducirán en ahorros en combustible, de magnitud mayor en cuanto a energía pues estará involucrada la eficiencia de generación evitada.

7.3.1. Medidas para el uso eficiente de energía eléctrica en PyME manufactureras

En el siguiente listado, se consideran aquellas medidas que pueden tener un impacto significativo en la industria de manera transversal, característica que las hace más convenientes para políticas o instrumentos generales para la industria, Lo anterior no quiere decir que no existan otras tecnologías aplicables en casos determinados o con alcance limitado, lo cual debe tomarse en el diseño de tales instrumentos para no limitar la posibilidad de su implementación.

Sistemas de bombeo, compresión y ventilación centrífugos – Mejora en eficiencia integral de sistemas: Los sistemas de bombeo y de compresión empleados en aplicaciones industriales que incorporan equipo centrífugo impulsado por motor eléctrico, se diseñan e instalan muchas veces a partir de especificaciones estándar para una cierta capacidad, carga, fluido y condiciones del mismo, lo cual debido a diferentes procesos o al cambio de productos elaborados en el tiempo, resultan sobredimensionados u operan en puntos de eficiencia bajos.

Dadas las características de la relación presión - flujo de los equipos centrífugos, mediante un análisis energético de necesidades y condiciones de proceso, puede determinarse el punto ideal de operación, así como la eficiencia global que puede alcanzarse realizando diversas modificaciones o cambios. Entre ellos se encuentran la instalación de accionamientos de velocidad variable (AVV, o bien variadores de frecuencia), la modificación de impulsores o rotores de bombas y compresores, el redimensionamiento de tuberías de conducción, la reducción de fugas y recirculación, y el cambio de equipos en situaciones extremas.

El potencial de ahorro de energía es variable, pues depende de la extensión de estas acciones y de las características propias del sistema, pero es frecuente encontrar potenciales de reducción de consumo de energía de los sistemas intervenidos de entre 15% y 25%.

El PSRI⁷⁹ para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 1 y 18 meses generalmente.

Se estima que al menos el 50% de los sistemas de bombeo y compresión de aire instalados en PyMEs podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

Sistemas de iluminación – Modernización e instalación de sistemas de alumbrado eficiente: La tecnología actual ha permitido la reducción de consumos de energía eléctrica en estos sistemas, de hasta 90%. En el subsector PyME, se encuentra la mayor parte del potencial para optimización de este tipo de sistemas en la industria. Lo anterior se debe a que las prácticas de gestión de la energía son incipientes y por tanto la evaluación de eficiencia no es común, considerándola como un costo fijo, lo anterior a pesar de los exitosos programas de sustitución de lámparas y de la amplia oferta de consultoría especializada.

⁷⁹ Período Simple de Recuperación o Retorno de Inversión.

Se estima que esta oportunidad podría tener aplicación en un 50% de los sistemas instalados en PyMEs manufactureras, si bien el grado de reducción de consumo será variable dependiendo de la tecnología actual, de entre un 20% y un 90%.

Sistemas de refrigeración enfocados a procesos – Mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos⁸⁰: La baja temperatura a la que se manejan diversos fluidos de proceso en algunas PyME, hace necesario que los sistemas de tuberías y equipos asociados al manejo de dichos fluidos y a los de los sistemas de refrigerante se aíslen térmicamente tanto por seguridad del personal, como para evitar ganancia de calor a través de la superficie de los elementos implicados, lo cual se traduce en mayores requisitos de energía dedicada a refrigeración.

Dada la fragilidad de los elementos que recubren al aislamiento, el envejecimiento del mismo y la intromisión de agua de lluvia principalmente, así como prácticas de instalación deficiente, es frecuente encontrar oportunidades para mejorar las condiciones de los sistemas de aislamiento. No es inusual conseguir con estas reparaciones mejoras energéticas que implican una reducción de entre 1 y 3% de la energía de refrigeración requerida, si bien en casos extremos pueden darse reducciones cercanas a 10%.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 3 y 9 meses generalmente.

Se estima que al menos el 50% de los sistemas de refrigeración en PyME manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

7.3.2. Medidas para el uso eficiente de energía primaria (combustible) en PyME manufactureras

Sistemas de vapor – Mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos: La temperatura a la que se maneja el vapor en la mayor parte de los sistemas industriales se ubica entre 100°C y 200°C. Lo anterior hace necesaria la instalación de aislamiento térmico en los componentes de sistemas de distribución del mismo, tales como tuberías, válvulas y accesorios, así como en algunos equipos de intercambio de calor o proceso. El aislamiento térmico, cuando se instala adecuadamente, permite una mayor seguridad del personal (evita la exposición o contacto con superficies de alta

⁸⁰ Dado que la generación de vapor y agua caliente constituye más de 45% de la energía total utilizada, y a que, a diferencia de otras líneas de acción, existen más de 50 diferentes medidas de ahorro, algunas con influencia en la generación, pero otras en la distribución y algunas más en el uso de la energía, se dividieron en unos cuantos grupos. El énfasis se da respecto al impacto que un instrumento que apoye cierta medida o grupo de medidas pueda tener, más que al número de posibles medidas. Por otra parte, y aunque es totalmente válido el comentario, las otras tecnologías o acciones en otros sistemas son generalmente de eficiencia energética eléctrica, para lo cual ya existen los programas de FIDE, y en este trabajo se trata de diferenciar y dar un enfoque sistémico. En cuanto a reingeniería, retrofit y mantenimiento, así como sustitución, en el primer caso es difícil indicar algún potencial y por tanto un impacto, pues es específico a cada instalación, por lo cual no habría base para diseño de instrumento de manera sólida. Para retrofit (más comúnmente denominado en México mejora, rehabilitación o repotenciación, dependiendo de su naturaleza y el sistema al que aplica), varias de las medidas lo consideran, y lo que se sigue es la forma tradicional en que se presentan, separando térmicas de eléctricas, y separando por su aplicación a cierta parte del sistema a analizar. En la literatura no hay muchas referencias de análisis por el tipo de acción a considerar. En el caso de mantenimiento, es totalmente cierto que la eficiencia puede mejorarse en muchos casos al mejorar el mismo, pero como en el caso de la reingeniería, no se cuenta con información para estimar el posible impacto o para suponer un nivel de mejora y de ahí estimar un impacto. Sería interesante hacerlo, pero no se tienen los recursos ni forma parte del alcance primigenio de este estudio. Con relación a sustitución, aplica lo mismo que para retrofit.

temperatura), y reduce la disipación de calor desde la superficie de los elementos implicados al medio ambiente. Esto se traduce en una mejora en la eficiencia de uso de la energía.

Dada la fragilidad de los elementos que recubren al aislamiento, el envejecimiento del mismo y la intromisión de agua de lluvia principalmente, así como la mala práctica de no aislar ciertos elementos con una superficie de disipación considerable (válvulas), o bien prácticas de instalación deficiente, es frecuente encontrar oportunidades para mejorar las condiciones de los sistemas de aislamiento.

No es inusual conseguir con estas reparaciones mejoras energéticas que implican una reducción de entre 2 y 5% de la energía de combustible requerido, si bien en casos extremos pueden darse reducciones mayores a 10%.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 3 y 18 meses generalmente.

Se estima que al menos el 80% de los sistemas de vapor en las PyME manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 2% en el 50% de los sistemas, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en 0.70 PJ.

Sistemas de vapor – Mejora en sistemas de evacuación y recuperación de condensado: En instalaciones que trabajan con vapor saturado, frecuentemente empleadas para el calentamiento de equipo de proceso en PyME, se alimenta el vapor a un equipo o intercambiador de calor, en donde cede su calor latente, condensándose. El condensado formado tiene una muy reducida capacidad para ceder calor comparado con el vapor, por lo que debe evacuarse de los equipos para permitir la mayor superficie de intercambio posible siempre en contacto con vapor. Cuando lo anterior no se verifica de una manera eficiente, se incrementan los tiempos de residencia ocasionando cuellos de botella en la producción por acumulación de condensado, o bien en el caso contrario, en que no hay control de evacuación, se escapa vapor vivo sin trabajar, perdiéndose también la energía contenida en él. Un sistema adecuado de evacuación en efecto minimiza los requisitos energéticos del proceso. En el caso de las tuberías que conducen vapor, la evacuación del condensado es necesaria para evitar que se formen bolsas de agua que al circular a la velocidad del vapor y encontrar un obstáculo, tal como un cambio de dirección o el extremo cerrado de una tubería, producen un golpe de ariete potencialmente destructivo para el sistema. Cuando los sistemas de evacuación de condensado se instalan en conjunto con un sistema de retorno de condensado, se puede recuperar la energía del mismo al retornarlo al tanque de agua de alimentación, lo cual también reduce costos por tratamiento de agua cruda.

Dado que muchas instalaciones, particularmente las PyME, no cuentan con retorno de condensado o el mismo es rudimentario, y también debido a que la selección de las trampas de vapor que evacuan el condensado no es adecuada para el servicio requerido, se detectan en muchas ocasiones oportunidades de mejora a través del cambio de trampas por otras adecuadas al servicio, y mediante la instalación o mejora de sistemas de recuperación de condensado.

Aunque cada instalación es diferente y sus sistemas de trampas de vapor tienen necesidades específicas a la misma, se ha observado que existen potenciales de reducción de necesidades de energía en la caldera de entre 1% y 10% del total, considerando la reducción de consumo de vapor

y la eficiencia de generación del vapor en la caldera. En cuanto a los sistemas de retorno de condensado, cuando los mismos no existen y su instalación es adecuada, pueden reducirse las necesidades energéticas en la caldera hasta en 15%, y cuando se mejoran podrían esperarse reducciones de entre 3% y 7%.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 1 y 24 meses, correspondiendo el PSRI mayor a instalaciones donde deben instalarse sistemas de condensado nuevos.

Se estima que al menos el 60% de los sistemas de vapor en PyME manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

Sistemas de vapor – Ajustes de combustión: El proceso de combustión en una caldera de vapor requiere de una adecuada mezcla del combustible y el aire, un acondicionamiento del combustible, según sea requerido, para permitir su mezcla y fácil encendido, una temperatura adecuada y tiempo suficiente para ceder calor durante el paso de los gases de combustión por la trayectoria de gases en la caldera. En muchas ocasiones y para asegurar una buena mezcla, se ingresa a la caldera más aire del necesario para llevar a cabo una operación adecuada. Aunque no es posible una combustión sin exceso de aire (proporción estequiométrica) en calderas comerciales, sí existe la posibilidad de minimizar dicho exceso, con lo que se reducen las pérdidas por calor contenido en gases de combustión al reducir el volumen de estos y permitir mayor tiempo de residencia a los mismos en la trayectoria de gases, con lo cual también disminuye la temperatura de los gases que salen de la caldera.

Lo anterior puede lograrse en la mayoría de los casos sin necesidad de cambio de equipo o accesorios, sino simplemente con una medición de gases de combustión y una carburación adecuada, modificando los puntos o posiciones de elementos finales de control para inyección de aire y combustible⁸¹, en combinación con un mantenimiento mejorado para dar permanencia a los ajustes. El único costo involucrado es el de materiales consumibles para el equipo de medición, y el tiempo del personal externo contratado, ya que en el caso del personal interno suele ser parte de sus actividades normales, no incidiendo como costo adicional para la empresa.

La corrección de exceso de aire puede reducir las pérdidas y por tanto las necesidades energéticas de la caldera. Es común observar en calderas pequeñas y medianas excesos de aire de 10% a 15%, cuando pueden ajustarse para operar sin problemas con 5% de exceso de aire. En las calderas grandes, se encuentran excesos de aire de entre 7% y 10%, mientras es posible su operación con valores de 2% a 3%. La reducción de necesidades energéticas en la caldera por la reducción de

⁸¹ En cuanto al mantenimiento, se adicionó un nuevo concepto de „mantenimiento mejorado“, si bien es bastante subjetivo establecer un nivel promedio, y las medidas planteadas partían de equipos bien operados y mantenidos como hipótesis base, precisamente debido a dicha subjetividad. Con respecto al desajuste en la presión, el control de la caldera impide dicha variación, pues precisamente las señales de aire y combustible están subordinadas al mantenimiento de la presión en la mayoría de las calderas en PyME, por lo que una reducción más allá de lo posible de acuerdo a las habilidades de la caldera, incrementaría el consumo de combustible debido a la respuesta del sistema. En la práctica, no se presenta por tanto lo anterior, pues se trabaja dentro de los márgenes que el fabricante establece como posibles y óptimos para la operación del equipo en cuestión, los cuales dependen de la capacidad de los elementos finales de control, del tipo de caldera y de la carga a la que opera, ya que enviaría más combustible el cual en caso de no incrementarse el aire de combustión saldría sin quemar, ocasionando condiciones peligrosas inaceptables, que se vigilan durante la prueba. Desde luego existen condiciones donde podría darse dicho desajuste con variaciones relativamente moderadas de exceso de aire, pero ello se observa en calderas operando a cargas más bajas que la capacidad mínima del sistema de combustión para regular eficientemente la mezcla aire-combustible y con sistemas rudimentarios de control. En la experiencia del consultor, en una gran variedad de instalaciones y tipos de calderas, nunca se ha presentado el caso en que la presión descienda por efecto de una carburación, además de que la premisa inicial para optimización energética es no afectar las condiciones del proceso.

exceso de aire frecuentemente es de 1% y mayor, mientras que, aunado al efecto de reducción de temperatura consecuente, alcanza hasta 2%.

El PSRI para esta medida, prácticamente en todos los casos es menor a 1 mes.

Se estima que al menos el 90% de las calderas instaladas en PyMES manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

Sistemas de vapor – Recuperación de calor de gases de combustión: La temperatura con la que salen los gases de combustión de una caldera es aproximadamente proporcional a la energía contenida en ellos. Existen límites físicos y termodinámicos, determinados por la temperatura del vapor a manejar y por el diseño del equipo, para reducir la temperatura de gases que salen de la caldera. Cuando una caldera ha sido ajustada en exceso de aire y sus superficies de transferencia se encuentran en buen estado y limpias, se alcanza la temperatura de gases mínima técnicamente posible en cada condición de carga. Cuando dicha temperatura es suficientemente alta, permite la instalación de equipo de recuperación de calor para calentar el agua de alimentación (economizadores), o el aire para combustión (precalentadores de aire). Mediante estos dispositivos, parte de la energía contenida en los gases de escape se transfiere al agua o al aire, respectivamente, incrementando su temperatura, lo que reduce las necesidades energéticas en el quemador de la caldera. La aplicación de estos dispositivos debe seguir prácticas de diseño adecuadas, para evitar corrosión por condensación, particularmente cuando el combustible empleado es combustóleo con alto contenido de azufre.

Existen muchas calderas que no cuentan con estos dispositivos. El cambio de la matriz de energía de la industria a gas natural no significó una instalación masiva de estos dispositivos, como era de suponerse. De este modo, existe un potencial significativo para la aplicación de esta oportunidad.

Aproximadamente se reducen las pérdidas de calor en 1% por cada 30°C de reducción en la temperatura de gases de la caldera. Dado que en un economizador generalmente se busca una diferencia de entre 50 y 75°C, podría haber cerca de 2% de reducción de consumo energético al instalar estos dispositivos.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentran entre 12 y 24 meses generalmente.

Sistemas de vapor – Recuperación de calor de purga continua: Durante la operación normal de la caldera de vapor, es necesario eliminar depósitos que se forman en la caldera, reduciendo la concentración de sólidos en el agua dentro de la misma. Esto se logra a través de la purga de una cantidad relativamente pequeña de agua, ya sea en el fondo de una caldera de tubos de humo o en el domo de lodos de una caldera de tubos de agua (purga de fondo), como en la cámara de vapor de una caldera de tubos de humo o en el domo de vapor (purga de superficie) de una caldera de tubos de agua. Esta última purga es continua, y el agua que sirve como medio de transporte a las sales y depósitos se encuentra a la temperatura de saturación del vapor para la presión a la que opera la caldera. De este modo, la purga continua se encontrará siempre a una temperatura elevada, y normalmente se envía al drenaje o bien a cárcamos de enfriamiento⁸², cuando ello es requerido para dar cumplimiento a la normativa ambiental aplicable.

⁸² Es adecuada la adición, y se complementa ya que en muchos casos, la simple dilución con agua más fría de otros drenajes consigue que la descarga sea realizada de acuerdo con lo establecido en las condiciones particulares de descarga establecidas

Existen dispositivos para recuperar el calor de la purga, lo cual puede lograrse a través de un intercambiador de calor en donde se ceda parte del calor de la purga al agua de alimentación, además de que también puede hacerse en un tanque *flash*, en donde se realiza la evaporación instantánea de una fracción del agua de purga, y ese vapor puede emplearse en algún uso de baja presión. La mayoría de las calderas no cuentan con estos dispositivos, lo cual representa una oportunidad de implementación significativa.

A través de la purga continua se pierde entre el 1% y 5% del calor total liberado por el combustible en una caldera. Un sistema de recuperación de calor de purga puede reducir dichas pérdidas aproximadamente en 50%, es decir entre 0.5% y 2.5%, con una incidencia más frecuente entre 1.0% y 2.0%. El PSRI para esta aplicación generalmente se encuentra entre 12 y 18 meses. Se estima que cerca de 90% de las calderas instaladas en PyMES manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

Sistemas de vapor – Quemadores de alta eficiencia: El equipo de liberación de calor (quemador) normalmente suministrado en una caldera estándar, es capaz de operar en diferentes regímenes de carga, con un límite de “Turndown”, es decir la relación entre el régimen máximo y mínimo de combustión reducido, lo cual implica que existe un rango relativamente estrecho de carga en que la operación de la caldera será la más eficiente.

Un quemador de alta eficiencia permite extender ese rango, y dependiendo del combustible podría lograrse una buena operación desde un 10% y 25% (para gas natural y combustóleo, respectivamente), hasta el 95% de carga. Lo anterior es particularmente útil en calderas de carga variable, situación muy común en algunas PyMES manufactureras.

Aunque los resultados de la implementación de esta medida de optimización energética son variables y dependen del tipo de procesos y el régimen de carga (no se recomienda esta solución para calderas con carga relativamente estable), se han observado reducciones de consumo de combustible de entre 5% y 15%. El PSRI para esta aplicación generalmente se encuentra entre 6 y 12 meses, sin considerar el beneficio de evitar encendido y apagado de calderas.

Se estima que al menos el 25% de las calderas instaladas en PyMES manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética, si bien las consideraciones anteriores no son privativas de calderas de vapor o agua caliente, sino que aplican a calentadores de fluido térmico, hornos y secadores en donde se tienen quemadores en operación.

Calentadores y hornos de proceso – Recuperación de calor de gases de combustión: La temperatura con la que salen los gases de combustión de un horno o calentador de proceso es aproximadamente proporcional a la energía contenida en ellos. Existen límites físicos y termodinámicos, determinados por la temperatura de las sustancias a calentarse y por el diseño del equipo, para reducir la temperatura de g Es adecuada la adición, y se complementa ya que en muchos casos, la simple dilución con agua más fría de otros drenajes consigue que la descarga sea realizada de acuerdo con lo establecido en las condiciones particulares de descarga establecidas para la instalación, ya que aunque el límite nominal de la NOM-002-ECOL-1996 es de 40°C, se permiten descargas a mayor temperatura siempre y cuando se demuestre que no se dañan los sistemas sobre los que se realiza

para la instalación, ya que aunque el límite nominal de la NOM-002-ECOL-1996 es de 40°C, se permiten descargas a mayor temperatura siempre y cuando se demuestre que no se dañan los sistemas sobre los que se realiza dicha descarga.

dicha descarga, gases que salen de la caldera, por lo que nunca puede recuperarse la totalidad del calor contenido en los mismos. Dado que muchos de estos equipos son de tiro natural, es decir sin un accionamiento eléctrico o mecánico para el flujo de fluidos, su eficiencia en promedio es inferior a las de las calderas, que en general operan con tiro forzado por ventilación mecánica. Cuando el gradiente de temperatura es suficientemente alto, permite la instalación de equipo de recuperación de calor para calentar el aire para combustión (precalentadores de aire). También debido al tiro natural, es necesario incorporar un sistema de conducción de aire y convertir al calentador en un equipo con tiro forzado, para posibilitar tal precalentamiento de aire. Mediante estos dispositivos, parte de la energía contenida en los gases de escape se transfiere al aire de combustión, mientras que se incrementa también la eficiencia total del calentador u horno. La aplicación de estos dispositivos debe seguir prácticas de diseño adecuadas, para evitar corrosión por condensación en puntos fríos del sistema, particularmente cuando el combustible empleado es combustóleo con alto contenido de azufre.

Existen muchos calentadores u hornos de proceso que no cuentan con estos dispositivos, incluso algunos de los equipos de mayor capacidad.

Aproximadamente se reducen las pérdidas de calor en 1% por cada 30°C de reducción en la temperatura de gases de escape del horno o calentadores de proceso. Dado que en un precalentador de aire generalmente se busca una diferencia de entre 50 y 75°C, pero además se incrementa la eficiencia del equipo, podría haber cerca de 7% a 10% de reducción de consumo energético al instalar estos dispositivos.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentra entre 12 y 36 meses generalmente. Se estima que al menos el 80% de los hornos y calentadores de proceso instalados en PyME manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 7% en el 50% de los sistemas existentes, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en 0.10 PJ.

Calentadores de fluido térmico – Recuperación de calor de gases de combustión: La temperatura con la que salen los gases de combustión de un calentador de fluido térmico es aproximadamente proporcional a la energía contenida en ellos. Existen límites físicos y termodinámicos, determinados por la temperatura del fluido térmico a manejar y por el diseño del equipo, para reducir la temperatura de gases que salen de estos dispositivos. Cuando un calentador de fluido térmico ha sido ajustado en exceso de aire y sus superficies de transferencia se encuentran en buen estado y limpias, se alcanza la temperatura de gases de escape mínima técnicamente posible. Dado que en general esta temperatura es alta, permite la instalación de equipo de recuperación de calor para calentar el aire para combustión. Puede también montarse un sistema que caliente agua para caldera, siempre y cuando la disposición de los equipos, su carga relativa, patrón de operación y la distancia entre ellos lo permitan. Gracias a estos dispositivos, parte de la energía contenida en los gases de escape se transfiere al aire o al agua de alimentación de una caldera, incrementando su temperatura, lo que reduce las necesidades energéticas en el quemador de la caldera a donde se enviará dicha agua. La aplicación de estos dispositivos debe seguir prácticas de diseño adecuadas, para evitar corrosión por condensación, particularmente cuando el combustible empleado es combustóleo con alto contenido de azufre.

La mayoría de los calentadores de fluido térmico no cuentan con estos dispositivos. De este modo, existe un potencial significativo para la aplicación de esta oportunidad.

Aproximadamente se reducen las pérdidas de calor en 1% por cada 30°C de reducción en la temperatura de gases del calentador. Dado que en un economizador para estos equipos generalmente se busca una diferencia de entre 75 y 100°C, podría haber cerca de 3% de reducción de consumo energético al instalar estos dispositivos, mientras que en calentadores de gran capacidad podría justificarse la instalación de un precalentador de aire adicionalmente, lo que reduce otro 1% el consumo de combustible.

El PSRI para esta medida, cuando su aplicación es racional, se encuentran entre 12 y 24 meses generalmente.

Se estima que al menos el 25% de los calentadores de fluido térmico instalados en PyME manufactureras podrían beneficiarse de esta medida de optimización energética.

De acuerdo con lo anterior, y considerando una reducción de requisitos de energía primaria de 3% en el 50% de los sistemas a los que puede aplicarse, el potencial técnico de ahorro podría estimarse en 0.01 PJ.

7.3.3. Potencial de cogeneración – tri-generación

No existe un estudio de cobertura medianamente amplia acerca de potenciales de cogeneración en PyME manufactureras, por lo que no puede hacerse ninguna estimación acerca de este tema para este subsector.

Se sabe, sin embargo, que existe tal potencial, y que las tecnologías de cogeneración permiten la instalación de equipos de baja capacidad con buenas características de rendimiento y desempeño económico. Con base en lo anterior, se sugiere un estudio de la aplicación de estas tecnologías en PyME, debido al gran efecto multiplicador de su implementación. Esto es aplicable, particularmente a PyME que utilicen cantidades significativas de energía térmica y eléctrica, en las cuales la relación entre dichos tipos de energía permita la adaptación de ciclos de cogeneración de pequeña escala disponibles comercialmente.

7.3.4. Potencial de ahorro por mejora tecnológica y de procesos

Este rubro puede ser de gran importancia energética y dado que las PyME manufactureras en ciertas ramas de actividad surgieron y operan con tecnologías que se utilizaron de manera reactiva y no planeada, lo cual induce ineficiencias sistémicas, las modificaciones y nuevos desarrollos de equipo, dispositivos y procesos, así como de sistemas de recuperación de energía, pueden reducir las necesidades energéticas netas en rangos de hasta 30% para casos específicos.

7.3.5. Consideración de energías renovables

El tema de energía renovable es muy relevante para la sustitución de energía fósil en PyME, si bien no constituye por sí mismo un aspecto directamente relacionado con el ahorro de energía.

Al incorporar a la matriz de energía eléctrica altos porcentajes de energías renovables, puede darse una sinergia con el ahorro energético cambiando equipamiento térmico a base de combustible por otro eléctrico, si bien el costo de la energía eléctrica en México aún no permite hacer tales modificaciones de manera rentable. En cuanto a energía solar para generación de calor, su uso aún tiene un horizonte limitado tanto por costo como por el área requerida y la alta intensidad energética del sector, pero algunos tipos de PyME manufactureras presentan condiciones idóneas para dicha implementación.

De este modo, para efectos de NDC deberán considerarse todas las interacciones, así como la forma actual de suministro de energía eléctrica en cada caso, para estar en posibilidad de realizar una contabilidad debida de reducciones de emisiones.

Como comentario final a este análisis de las PyMEs manufactureras, puede decirse que el potencial para mejora energética es atractivo, particularmente en las ramas industriales con mayor intensidad energética, entre las que, en un ejercicio realizado por GIZ y CONUEE, se encuentran:

- Industria alimentaria
- Industria de bebidas
- Industria química
- Industria de procesamiento de plásticos
- Industria metalmecánica
- Industria de fabricación de partes automotrices

Para las PyME manufactureras en particular, se han realizado diversas consideraciones relacionadas con la energía que consume este subsector (ver sección 7.8.1), así como con base en los potenciales de ahorro y distribución de usos finales de la energía para cada medida de las aquí expuestas, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla ³⁵.

Tabla 68: Oportunidades de uso sustentable de energía en subsector PYME manufacturero

Oportunidad	Rango de potencial de ahorro	Porcentaje susceptible de aplicación (% de total)	Aplicabilidad técnica ⁸³ (% de total)	Potencial teórico de ahorro (PJ)	Potencial técnico de ahorro (PJ)
Vapor – aislamiento térmico	2 – 5%	80%	50%	1.84	0.72
Vapor – manejo condensado	1 – 15 %	60%	30%	3.43	1.72
Cald. – ajuste combustión	1 – 2%	90%	30%	2.32	0.77

⁸³ Se refiere a la proporción de equipos o sistemas a los que se considera podría aplicarse realmente la medida del universo de aquellos a que está dirigida.

Vapor – recup. calor gases	2 – 3%	50%	25%	1.84	0.72
Cald. – recup. calor purga	0.5 – 2.5%	90%	50%	2.31	1.29
Cald. – quemador alta efic.	5 – 15%	25%	10%	2.15	0.86
CFT / H* – recup. calor gases	7 – 10%	80%	50%	3.20	1.60
Aislamiento-refrigeración	1 – 3%	50%	25%	0.29	0.14
Efic. bombeo, compres. vent.	15 – 25%	50%	25%	4.60	2.30
Sist. Iluminación	10 – 90%	50%	25%	3.50	1.75
Cogeneración (10 – 5%)	20 - 25%	10%	5%	3.43	1.72
Totales:				58.9	13.6

*Calentadores de fluido térmico y hornos

Fuente: Elaboración propia en el marco de este estudio

Es importante señalar que las cifras anteriores son el resultado de una combinación de información no específica disponible, junto con suposiciones y experiencia, debido a lo cual se recomienda el establecimiento de acciones y/o sistemas para obtener información que permita caracterizar adecuadamente a este importante subsector de la industria en México.

Por lo anterior, es una realidad que las PyMES manufactureras presentan oportunidades atractivas de optimización energética, y que seguirán siendo uno de los motores principales de la industria, contribuyendo también a la consecución de los objetivos ambientales y compromisos internacionales que México ha adquirido, destacadamente el cumplimiento de su NDC.

Desde luego se debe para ello sortear las barreras existentes, que se analizan en una sección específica a PyME, y crear un marco propicio para la inversión y estimular el cambio cultural tanto de empresarios como de trabajadores.

7.4.

Síntesis de las opciones de ahorro identificadas

Considerando que se ha trabajado con información secundaria, las estimaciones realizadas para diferentes sectores y medidas no necesariamente respetan un enfoque homogéneo. En

consecuencia, se requiere un análisis adicional para tratar de identificar y acordar criterios que permitan arribar un impacto total, si ese fuera el objetivo.

Del mismo modo, se está tratando de estimar costos de inversión que, en muchos casos, deberían obtenerse de bibliografía internacional, no necesariamente 100% representativos de los costos internalizados.

Aún queda trabajo por hacer para unificar el entendimiento, base de medición, etc., de las medidas en los diferentes sectores. Es decir, existen diversas lógicas de cuantificación del potencial. En efecto, la interpretación que puede hacerse de los porcentajes de ahorro esperados podría admitir diferentes lecturas. Se asume que los porcentajes planteados se definirían del siguiente modo, por ejemplo: "si una industria X que fabrica vidrio -sin especificar qué tipo de vidrio-, concreta la recomendación citada, puede esperar un ahorro energético de Y % en relación a SU situación de base o punto de partida en lo que hace a consumos energéticos, con una inversión Z (en los casos que existe esa información) y con un periodo de repago P, específico de su caso".

La definición implica que existe para el sector industrial de México un trabajo de base (principalmente, estudios sectoriales de potenciales de ahorro de energía basados en auditorías de diferente grado de profundidad.) en cuanto a la determinación de potenciales de eficiencia energética en sus principales ramas productivas. De lo contrario, deben interpretarse como estimaciones – en base a extrapolaciones, información secundaria o de otro carácter- que afecta negativamente, el grado de certeza en las cifras de ahorros, inversiones, payback, etc.

Tabla 69: Medidas y características de ahorro en la industria

SECTOR	MEDIDAS	Potencial de ahorro	Potencial de ahorro (%)		Costos de inversión estimados
Hierro y acero (se incluyen solo potenciales técnicos)	Thin Slab Casting	18 672,525 GJ	8%	Sobre situación de base o punto de partida	150 – 200 USD/ tAC
	Altos hornos eficientes	15 032,000 GJ	7 %		200 – 250 USD/ tAC
	Moldeado y conformación directa de acero	11 204,125 GJ	5%		150 – 200 USD/ tAC
	Hornos de arco eléctrico eficientes	1 370,423 GJ	0,6%		150 – 200 USD/ tAC
	Sistemas de gestión de la energía y otras medidas de eficiencia energética	11 544,442 GJ	5%		50 – 100 USD/ tAC
Cemento	Mejoras y mantenimiento preventivo		5% (solo en algunas de las empresas menos eficientes)		
	Sistemas de Gestión de la Energía (SGEs – ISO 50001)		3-8%		

SECTOR	MEDIDAS	Potencial de ahorro	Potencial de ahorro (%)	Costos de inversión estimados
Vidrio	Control computarizado del proceso mediante la aplicación Expert System™ (Glass Max)		2 – 3 % (todos los porcentajes de aquí en adelante refieren al consumo de cada instalación que aplique la medida)	150.000 US\$
	Incremento de la cantidad de vidrio reciclado (cullet)		Como regla general, cada 10% de aumento en la cantidad de vidrio reciclado resulta en un 2,5 a 3 % de ahorro de energía	
	Mejora en recubrimiento refractario y aislaciones		Entre 1 y 1,5 % la factura energética de la planta. Ahorros de hasta 7% sustituyendo los ladrillos refractarios en la sección de regeneración con materiales especiales	
	Uso de hornos con tecnología "end-fired"		Cambio de tecnología en el horno más otras medidas adicionales producen ahorros energéticos del 12,2%	305.000 US\$ / 7 meses payback simple
	Sustitución de horno 100% eléctrico por una combinación de horno de fusión eléctrico y precalentador batch a gas natural	Ahorro energía eléctrica: 9 GWh/año. Consumo de gas (incremental): 3,5 GWh/año		208.000 US\$ (precios de 2003) – 1,2 años payback simple
	Utilización de quemadores con premezcla aire/combustible		Hasta 11 % de ahorro	
	Hornos recuperativos (precalentamiento de aire)		Hasta un 30% de ahorro energético en relación a hornos con aire frío	Payback simple: Entre 7 y 14 meses (dependiendo del precio de la energía)
	Electrodos de fusión en tope		4 %	1,3 años
	Optimización del exceso de aire de combustión		Hasta 10%	Operación, sin costo
	Utilización de quemadores sellados al ingreso de aire frío		Reducir un 5% el ingreso de aire frío genera un	

SECTOR	MEDIDAS	Potencial de ahorro	Potencial de ahorro (%)		Costos de inversión estimados
			ahorro del orden del 2 a 3%.		
	Pre calentamiento de la carga (batch) y del vidrio reciclado	Reducción de 90 kWh/tonelada de electricidad y 8% de gas natural.			Para una planta de 450 toneladas/día: 3,4 millones de euros – 3 años payback simple
	Uso de hornos con tecnología oxy-fuel y pre calentamiento		20 a 50% en general		Costos muy elevados
	Uso de variadores de velocidad ajustables en ventiladores de aire para combustión	Ahorro de 800.000 kWh/año			1,7 años payback simple
	Sistemas de Gestión de la Energía (SGEs – ISO 50001)		3 – 8 %		
	Reducción de temperatura de ingreso de aire a compresores		Regla del pulgar: cada 3°C de reducción, el compresor disminuye 1% su consumo de energía eléctrica		
Química	Vapor – Aislamiento Térmico	0.70 PJ	2% en el 50% de los sistemas	Sobre los requisitos de energía primaria	
	Vapor – Manejo Condensado	1.05 PJ	15% - 30% de los sistemas instalados,	Sobre los requisitos de energía primaria	
	Vapor – Ajuste Combustión	0.35 PJ	2% - 50% de los sistemas a los que puede aplicarse	Sobre los requisitos de energía primaria	
	Vapor – Recupero de Calor Gases	0.35 PJ	2% en el 25% de los sistemas en operación	Sobre los requisitos de energía primaria	
	Vapor – Recupero de Calor Purga	0.35 PJ	2.5%-50%	Sobre los requisitos de energía primaria	
	Vapor – Quemador Alta Eficiencia.	0.35 PJ	5% -10%	Sobre los requisitos de energía primaria	
	C y H* – Recuperación de calor (Gases)	0.10 PJ	de 7% en el 50% de los sistemas existentes	Sobre los requisitos de energía primaria	
	CFT** – Recuperación de calor (Gases)	0.01 PJ	3% en el 50% de los sistemas a los que puede aplicarse	Sobre los requisitos de energía primaria	
	Aislamiento refrigeración	0.01 PJ	3% en el 25% de los sistemas instalados	Sobre los requisitos de energía primaria	

SECTOR	MEDIDAS	Potencial de ahorro	Potencial de ahorro (%)		Costos de inversión estimados
	Eficiencia en bombeo, Compresores y ventilación	0.35 PJ	15% en el 30% de los sistemas a los que puede aplicarse	Sobre los requisitos de energía primaria	
Azucarero	Cogeneración	3,000 GWh/año (excedente para red)		Sobre situación de base o punto de partida	1,400 USD/kW
	Secado de Bagazo	0.74 PJ Combustóleo 18 PJ excedente de bagazo	18% del bagazo	Sobre situación de base o punto de partida	
	Variadores de frecuencia (VFD)	28-73 GWh/año	3%-7% de la demanda eléctrica	Sobre situación de base o punto de partida	
PYMES	Sistemas de bombeo, compresión y ventilación centrífugos – Mejora en eficiencia integral de sistemas		15-25%		
	Sistemas de iluminación – Modernización e instalación de sistemas de alumbrado eficiente		20-90%	Sobre el consumo	
	Sistemas de refrigeración – Mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos		1/3 – 10%	Sobre la energía de refrigeración requerida	
	Potencial de ahorro por mejora tecnológica y de procesos		30%	Sobre necesidades energéticas netas	
	Sistemas de vapor – Mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos	0.70 PJ	2% en el 50% de los sistemas	Sobre requisitos de energía primaria	
	Sistemas de vapor – Mejora en sistemas de evacuación y recuperación de condensado		1% y 10% 3% y 7%.	Reducción de necesidades de energía en la caldera Sobre necesidades energéticas en la caldera	
	Sistemas de vapor – Recuperación de calor de gases de combustión		2%	Sobre reducción de consumo energético	
	Sistemas de vapor – Recuperación de calor de purga continua		0.5% y 2.5%, con una incidencia más frecuente entre 1.0% y 2.0%		
	Sistemas de vapor – Quemadores de alta eficiencia		5%-15%	Reducciones de consumo de combustible	

SECTOR	MEDIDAS	Potencial de ahorro	Potencial de ahorro (%)		Costos de inversión estimados
	Calentadores y hornos de proceso – Recuperación de calor de gases de combustión	0.10 PJ	7% a 10%	Reducción de consumo energético	
	Calentadores de fluido térmico – Recuperación de calor de gases de combustión	0.01 PJ	3% en el 50% de los sistemas a los que puede aplicarse	Sobre requisitos de energía primaria	