



Anexo VI. Identificación de medidas de eficiencia energética para la Hoja de Ruta

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

Apoiado 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 Sbroiavacca, 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 (GIZ México).

Coordinación editorial: Ángel Azamar, Daniela Méndez y Veronica Gómez (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.



ÍNDICE

| | |
|--|----|
| 1. Hierro y acero..... | 3 |
| Metodología aplicada..... | 4 |
| Medidas de eficiencia energética propuestas aplicables al subsector hierro y acero en México. | 5 |
| 2. Cemento..... | 8 |
| 3. Química..... | 12 |
| Consumo y matriz energética..... | 13 |
| Medidas para el uso eficiente de la energía en la industria química..... | 14 |
| Medidas para el uso eficiente de energía primaria (combustible) y en energía eléctrica..... | 15 |
| Resumen de oportunidades..... | 15 |
| 4. Vidrio..... | 17 |
| Medidas factibles para México y costos estimados (oportunidades)..... | 17 |
| Potencial de ahorro de energía (conforme a las medidas, prácticas y cambios de tecnologías recomendadas)..... | 18 |
| Resultados esperados..... | 20 |
| 5. Celulosa y papel..... | 21 |
| Matrices de fuentes y usos para el proceso kraft y para la elaboración de papel a partir de fibra secundaria reciclada..... | 21 |
| Consumo energético asociado en la industria mexicana..... | 22 |
| Potencial de eficiencia energética en la industria de papel y celulosa..... | 23 |
| 6. Potencial de cogeneración en los ingenios azucareros de México..... | 25 |
| Caracterización general del sector..... | 25 |
| La cogeneración en los ingenios azucareros..... | 25 |
| El potencial de cogeneración en los ingenios azucareros de México..... | 27 |
| 7. Pequeñas y medianas empresas (PyMEs) industriales..... | 31 |
| Caracterización económica y productiva del subsector PyMEs industrial..... | 31 |
| Caracterización energética del subsector PyMEs..... | 32 |
| Medidas para el uso eficiente de la energía en el subsector PyMEs..... | 34 |
| Síntesis de las opciones de ahorro identificadas..... | 35 |

1. Hierro y acero

Según datos del Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2016) en 2015 la producción de acero crudo siguiendo la ruta de reducción directa + horno de arco eléctrico fue de 13.2 millones de toneladas de acero crudo (tAC.), mientras que la producción que se debe a la ruta tecnológica de alto horno + convertidor a oxígeno fue de 5.6 millones de tAC. De esta forma el total de producción en 2015 fue de 18.8 millones de t A.C.

El consumo total de energía final del sector hierro y acero en 2015 fue de 222.3 PJ (SENER, 2016), de lo cual 63% corresponde a consumo de gas natural seco, 27% corresponde a coque (sumado coque de carbón mineral y coque de petróleo), 8.6% a electricidad, y la diferencia restante corresponde a combustibles derivados de petróleo (combustóleo y diésel).

Con los datos de producción de acero crudo y consumo total de energía final se estimó la intensidad energética del sector hierro y acero de México. En 2015 este indicador tuvo un valor de 12.2 GJ/ t A.C. Para 2016 este valor fue estimado en 12.3 GJ/ tAC. Por otro lado, el factor de emisión de CO₂ del sector hierro y acero en México en 2016 fue estimado por la Cámara Nacional del Acero (CANACERO) (2017) igual a 1.4 t CO₂/ tAC.

Según información de la CANACERO, el sector siderúrgico de México evaluó las tecnologías de eficiencia energética catalogadas como estado del arte, recomendadas internacionalmente por *Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate (2010)*, y las tecnologías para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. De forma similar, CANACERO contribuyó con estudios similares desarrollados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático de México; en dichos estudios se realizaron sondeos para determinar la penetración de tecnologías para eficiencia energética y medidas de mitigación en el sector siderúrgico en México.

La mayor parte de esas tecnologías ya han sido adoptadas por algunas de las plantas siderúrgicas 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 en plantas de horno de arco eléctrico; uso de hornos eficientes de corriente alterna; uso de hornos de corriente directa; técnica de escoria espumosa; técnica de tapón poroso; uso de lanzas de oxígeno en conversores a oxígeno (BOF/EOF); automatización del proceso, entre otros. De esta forma, el potencial técnico-económico remanente para eficiencia energética parecería ser limitado, inicialmente, en el sector de hierro y acero mexicano.

1.1.

Metodología aplicada.

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

Tabla 1.1. Rutas tecnológicas para la producción de acero en México.

| Rutas de producción de acero | Intensidad energética media en el escenario base en México (GJ/ t A.C.) |
|--|--|
| 1. Planta integrada: preparación de materia prima + alto horno + convertor a oxígeno + colado + laminación + acabados | 16.7 – 19.9 |
| 2. Planta integrada: preparación de materia prima + reducción directa + horno de arco eléctrico+ colado +laminación + acabados | 18.7 – 19.9 |
| 3. Planta semi-integrada (<i>mini-mills</i>): acería basada en horno de arco eléctrico que usa chatarra, arrabio y fierro esponja + colado +laminación + acabados | 2.6 – 2.9 |

Fuente: Fundación Bariloche.

Se estimó la intensidad energética de cada planta siderúrgica productora de acero crudo en México, esto considerando la capacidad productiva instalada por empresa según la CANACERO (2017). Se verificó que los valores de intensidad energética en México, inclusive por planta, son menores a la media mundial (20.3 GJ/ t A.C.), lo cual muestra que el sector hierro y acero en México es bastante eficiente en comparación a países como China, India o Brasil.

Considerando la información anterior, se realizó una reconstrucción ascendente del consumo energético, emisiones de CO₂ y producción física del sector siderúrgico mexicano. Estos parámetros fueron estimados para cada planta industrial de producción de acero crudo, considerando a todas las empresas del sector hierro y acero en México. Partiendo de datos específicos de cada planta (capacidad instalada por planta industrial, ocupación media de la

capacidad instalada por planta, intensidad energética media por planta según tipo de ruta tecnológica y factor de emisión medio por planta) fue posible reconstruir los valores reportados a nivel sectorial, con relación a consumo energético, emisiones de CO₂ y producción física por ruta tecnológica. Los principales indicadores de este ejercicio se muestran en la [Tabla 1.2.](#)

Tabla 1.2. Balance general estimado 2016 a partir del análisis ascendente (reconstrucción de la actividad sectorial).

| Categoría | Cantidad | % |
|--|----------|------|
| Producción de acero crudo – Ruta 1: alto horno + convertidor al oxígeno (plantas integradas) (1,000 t AC) | 5,418 | 29% |
| Producción de acero crudo – Ruta 2 y 3: Reducción directa + horno arco eléctrico (plantas integradas y semi integradas) (1,000 t AC) | 13,382 | 71% |
| Producción de acero crudo –Total (1,000 t AC) | 18,800 | 100% |
| Consumo total de energía 2016 (PJ) | 230.9 | |
| Intensidad energética 2016 (GJ/ t AC) | 12.3 | |
| Factor de emisión 2016 (t CO ₂ / t AC) | 1.4 | |

Fuente: Fundación Bariloche.

1.2.

Medidas de eficiencia energética propuestas aplicables al subsector hierro y acero en México.

Las medidas de eficiencia energética propuestas y sus valores medios de costo de inversión se presentan en la **Tabla 1.3**; se resalta que las medidas propuestas son en realidad un paquete de acciones específicas, por tanto, el potencial de ahorro de la medida es la suma del potencial con cada acción.

Tabla 1.3. Medidas de eficiencia energética propuestas y costos asociados.

| Escenarios/medidas de EE | ¿En qué etapa se aplica? | Inversión (USD/t A.C.) |
|---|---|--|
| Base | | 0 |
| 1. Thin Slab Casting | Integración del colado continuo y laminación en caliente, aplicable a planchón y producción de planos | 235 (corto plazo) 150 - 200 (largo plazo) |
| 2. Eficiencia en la ruta integrada preparación de materiales + alto horno + horno BOF | Sinterizado | 4.1 |
| | Coquería | 156.5 |
| | Alto horno | 50.0 |
| | Horno BOF | 35.2 |
| 3. Strip Casting | Integración del moldeado en caliente de tiras y la conformación directa de placa fina en caliente | 255-5 (corto plazo) 150 - 200 (largo plazo) |
| 4. Hornos de arco eléctrico eficientes | Horno de arco eléctrico | 7.8 |
| 5. Sistemas de gestión de la energía y otras medidas de eficiencia energética | A lo largo de todo el proceso | 23.6 |

Fuente: Fundación Bariloche.

Los potenciales de ahorro que se plantean como alcanzables en 2030, y las metas de intensidad energética (según lo propuesto por la literatura específica internacional (evaluación comparativa) que se puede conseguir con el estado de arte de la tecnología), se resumen en la [Figura 10](#). No se encuentra el origen de la referencia.

Las medidas de eficiencia energética propuestas se modelaron 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 teórico** de ahorro de energía en el sector siderúrgico de México. Sin embargo, probablemente no todo este potencial podría ser aprovechado, por lo que se ha estimado adicionalmente un **potencial técnico factible de ser aprovechado** de ahorro de energía para cada medida en función de las premisas descritas a continuación.

Para la medida de *Thin Slab Casting* se consideró que apenas un 25% del potencial técnico-teórico podría ser considerado como potencial técnico factible de ser aplicado hasta 2030. Esta consideración toma en cuenta la retroalimentación de especialistas de CANACERO. Sus comentarios van de acuerdo con lo reportado por la literatura, que indica que esta medida es aplicable especialmente para plantas nuevas, y para plantas que realizan de forma integrada los procesos de acería + acabados. Para el resto de las medidas se consideró que 50% del potencial técnico-teórico podría ser considerado como potencial técnico factible de ser aplicado hasta 2030.

Tabla 1.4. Potencial de ahorro de energía en el sector siderúrgico en México.

| Escenarios/medidas de eficiencia energética | Intensidad energética por escenario y tipo de ruta tecnológica* | | | Potencial técnico con relación al escenario base estimado para 2030 | | Potencial técnico-factible de implementarse con relación al escenario base estimado para 2030 | |
|---|---|-------------------------------|-------------------------------|---|------------|---|------------|
| | | | | GJ/t AC | Ahorro (%) | GJ/t AC | Ahorro (%) |
| | Ruta 1 | Ruta 2 | Ruta 3 | | | | |
| Base | 16.7 – 19.9 | 18.7 – 19.9 | 2.6 – 2.9 | - | - | - | - |
| Thin Slab Casting | 14.8 | 17.0 | 2.6 | 10.3 | 16% | 10.8 | 4% |
| Altos hornos eficientes | 13.5 | No aplica | No aplica | 10.7 | 13% | 11.5 | 7% |
| Strip casting | 16.0 | 17.3 | No aplica | 11.1 | 10% | 11.7 | 5% |
| Hornos de arco eléctrico eficientes | No aplica | 18.3 – 19.5 | 2.3 – 2.6 | 12.1 | 1.2% | 12.2 | 0.6% |
| Sistemas de Gestión de la Energía y otras medidas de eficiencia energética | No disponible en este formato | No disponible en este formato | No disponible en este formato | 10.9 | 10% | 11.5 | 5% |

Fuente: Fundación Bariloche.

2. Cemento

En México existen seis empresas registradas ante la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM), lo cual indica un alto grado de concentración del mercado. Las empresas registradas son:¹

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.

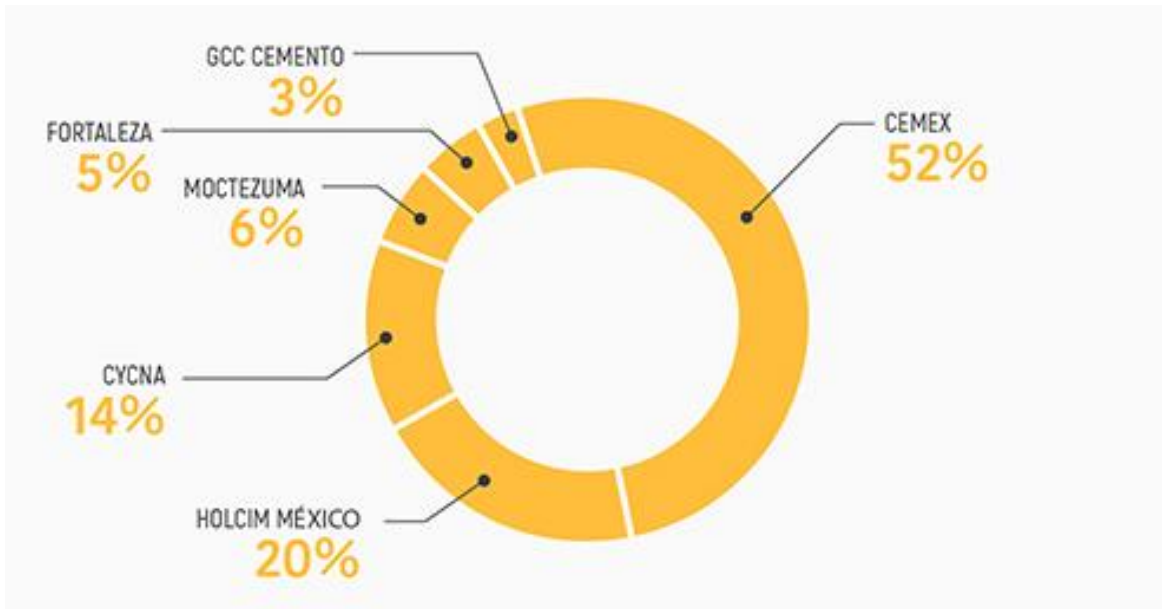
Estas seis empresas concentran la mayoría de las 34 plantas cementeras distribuidas a lo largo del territorio nacional. La producción total de dichas empresas en el 2015 se ubicó en 44.9 millones de toneladas anuales, empleando directamente a 20,000 personas e indirectamente a otras 110,000, de acuerdo a la CANACEM. **El 86% del mercado se concentra en tres empresas**, las que en conjunto poseen 26 plantas: **CEMEX, Holcim y CYCNA (véase Figura 1.1)**.

La capacidad productiva en 2015 se ubicaba en 53.0 millones de 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 9% tipo Portland², 2.7% tipo Mortero y 2% tipo Blanco y otros 2.5%.

1 Este aspecto, así como otros de este apartado, se explican en el Anexo: Análisis de la intensidad energética y consumo energético de los sectores analizados.

2 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*.

Figura 1.1. Participación de las empresas en el mercado de cemento en México.



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

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 Corrales:³

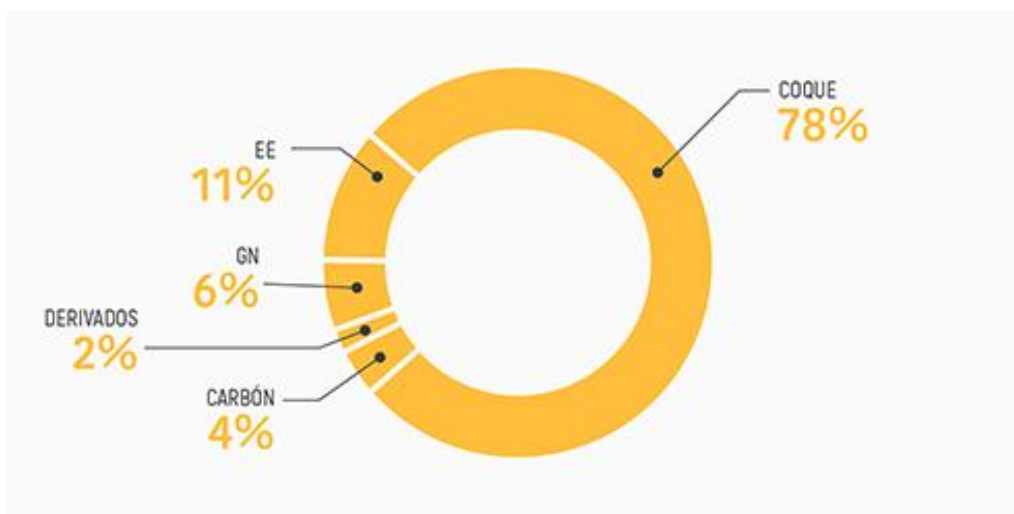
“Existen pocos trabajos formales que hayan analizado a detalle el comportamiento de la industria cementera en México. Los más relevantes se han centrado en analizar las características generales de la industria (Avalos y Schatan, 2003; Kumakan y Martínez, 2008), en analizar la utilización eficiente de energía en la producción (Sternier, 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.

³ Vásquez y Corrales, “Industria del cemento en México: análisis de sus determinantes”, Revista Problemas del Desarrollo, marzo 2017.

El consumo energético de la **industria cementera** representó en el 2015 el **11.0% 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 2015 la industria del cemento consumió 176.8 PJ. Se detallan a continuación las fuentes energéticas utilizadas en este sector, donde se destaca la presencia del **coque con el 78%** (véase Figura 1.2).

Figura 1.2. Participación de las fuentes energéticas en el consumo de la industria del cemento.



Fuente: Fundación Bariloche.

La intensidad energética de la industria del cemento en México se ubica en el rango de valores que presenta esta misma industria 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* que presentan intensidades del orden de 5.8 a 6.7 GJ/t⁴.

Cabe destacar que una práctica usual, adoptada por la industria del cemento internacionalmente,⁵ es la de incinerar diversos residuos, tanto líquidos como sólidos, en sus múltiples 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

4 Para mayor información consultar: 151201 DG ENER Industrial EE study - final report_clean_stc.

5 Para mayor información consultar: Mejora del rendimiento de una cementera mediante el empleo de combustibles alternativos. LOPEZ, A.; BLANCO, F.; GUTIERREZ, M.A.

acondicionarlos previamente utilizando para ello otros procesos que también requieren el uso de energía (esto deberá ser consultado con las empresas del sector).

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.

Los principales usos eléctricos se llevan a cabo en la molienda de cemento y acabado (41%), preparación y molienda de la materia prima (32%), y en la homogenización y conjunto del horno (21%).

Dentro de las oportunidades de eficiencia energética en la industria del cemento se destaca la penetración de combustibles alternos. De acuerdo con la carta de intención del proyecto NAMA del sector cementero de México⁶ las metas estimadas por el equipo consultor son las siguientes:

- Al 2020, lograr un uso de combustibles alternativos de 8% del total, en donde:
 - 3% serán llantas⁷ y 5% serán FIRSU⁸
- 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 *clinker* utilizado para las estimaciones es del orden de 3.4 GJ/t cinker.**⁹

El factor de emisión de la producción de cemento en México se situaba en 0.7 t CO₂ (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 variaba entre 0.6 y 0.9 tCO₂ por tonelada de cemento, con una media ponderada de 0.8 tCO₂ por tonelada de cemento (IEA, 2007). Por lo que se aprecia que el factor de emisiones de producción de cemento en México, dada su alta eficiencia, se encuentra por debajo de la media internacional.¹⁰

Finalmente, una segunda opción se vincula con la mejora en los procesos de molienda; una tercera incorporando ventiladores eficientes para el precalentamiento y una cuarta incluyendo variadores de frecuencia de motores.

6 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.

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

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

9 INECC. PNUD. Marzo 2013.

10 *Ibíd.*

3. Química

La industria química es un importante subsector industrial en México. Dada su articulación con muchas cadenas productivas, en las que incide como creador de bienes intermedios o para consumo final. Esta industria presenta una gran diversidad de procesos prolíficos dependiendo de los bienes que hace cada instalación. Tiene unidades productivas que van de microempresas a gran industria y representó cerca de 9% del PIB manufacturero total en 2016.¹¹

En 2016 la aportación de la industria química al PIB fue de 2.1%, siguiendo una tendencia de recuperación desde 2012, y creciendo en el período 2012-2016 a un ritmo promedio mayor a 18% anual. En 2016 el valor de la producción nacional fue mayor a \$15,200 MUSD.¹² Cabe señalar la importancia de la industria química con relación a su participación en el PIB manufacturero, lo cual se muestra en la **Tabla 1.5**.

Tabla 1.5. Participación de la industria química en PIB manufacturero.

| Año | PIB industria química (MXN x 106) | % de PIB manufacturero | Variación a precios constantes | |
|------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| | | | Anual a precios constantes (%) | Acumulado en el sexenio (%) |
| 2013 | 324,298 | 11.9 | 0.8 | 1.8 |
| 2014 | 280,567 | 9.7 | -1.3 | Promedio en el sexenio (%) |
| 2015 | 274,047 | 8.8 | -1.4 | -0.6 |

Fuente: Tabla extraída de la página oficial del Gobierno Federal.¹³

Según opiniones de expertos en el tema, y derivado de la reforma energética, se espera un crecimiento de la producción nacional en las siguientes décadas.¹⁴

11 Para mayor información consultar:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133111/Sector_Industria_Quimica.pdf.

12 Para mayor información consultar: <http://webpublico.aniq.org.mx/nosotros/Paginas/EstadisticasIQ.aspx>.

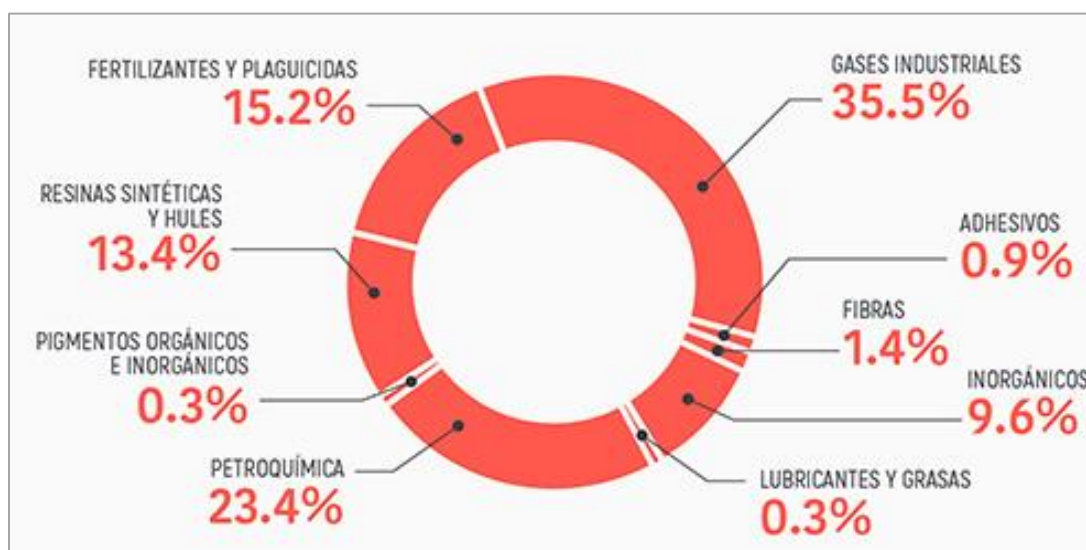
13 Para mayor información consultar:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133111/Sector_Industria_Quimica.pdf.

14 PNUD – ANIQ, Elementos hacia una estrategia de desarrollo bajo en emisiones para la industria química en México, 2017.

Es un reto al analizar a la industria química en general desde el punto de vista energético, pues incluye diversos perfiles de energía, tipos de procesos y valor final de productos. Dentro de los principales productos del subsector se encuentra los gases industriales, los fertilizantes y plaguicidas, las resinas sintéticas y hules, entre otros (véase **Figura 1.3**).

Figura 1.3. Distribución de la producción de la industria química, julio 2017.



Fuente: Fundación Bariloche con información de ANIQ, (2017).

3.1. Consumo y matriz energética.

La abundancia 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, excluyendo de la misma a la Petroquímica de PEMEX, tuvo un consumo de energía de 108.8 PJ. Los energéticos utilizados en la industria química en 2015 fueron por orden de importancia: gas natural seco, electricidad, diésel, combustóleo, coque de petróleo y gas licuado.

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.

3.2.

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

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 antigüedad¹⁵ y con base en la experiencia del equipo de consultoría en auditorías energéticas en instalaciones industriales, entre ellas de producción de químicos, se pudo establecer un listado preliminar de medidas que podrían tener un impacto relevante en el consumo de energía y en las emisiones de GEI, lo cual ayudaría al cumplimiento del NDC de México.

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 presentan en los listados siguientes, divididos en energía primaria y en 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 (19.2 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).

¹⁵ Apuntes de taller del grupo de trabajo del Protocolo de Eficiencia en Calderas de México, Climate Action Reserve (CAR), 2016.

3.3.

Medidas para el uso eficiente de energía primaria (combustible) y en energía eléctrica.

- Sistemas de vapor – mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos.
- Sistemas de vapor – mejora en sistemas de evacuación y recuperación de condensado.
- Sistemas de vapor – ajustes de combustión.
- Sistemas de vapor – recuperación de calor de gases de combustión.
- Sistemas de vapor – recuperación de calor de purga continua.
- Sistemas de vapor – quemadores de alta eficiencia.
- Calentadores y hornos de proceso – recuperación de calor de gases de combustión.
- Calentadores de fluido térmico – recuperación de calor de gases de combustión.
- Sistemas de refrigeración – mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos.
- Sistemas de bombeo, compresión y ventilación centrífugos – mejora en eficiencia integral de sistemas.

Potencial de ahorro por mejora tecnológica y de procesos: este rubro puede ser de gran importancia energética, pues las modificaciones y nuevos desarrollos de procesos completos o catalizadores/sistemas de recuperación de energía en equipo de proceso, permiten reducir las necesidades energéticas netas en rangos de hasta el 30% en casos específicos.

3.4.

Resumen de oportunidades.

En cuanto a la 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 un 50%. 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 (véase la **Tabla 1.6**).

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 pueden existir 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.

Tabla 1.6. 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 de ahorro (PJ) | Potencial Técnico de Ahorro (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-QuemadorAltaEfic. | 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: Fundación Bariloche.

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

La industria química en México tiene muchas oportunidades de alcanzar un crecimiento sostenido y sostenible, a través de una optimización energética y 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.

Para ello, se deben 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.

4. Vidrio

De acuerdo con investigaciones realizadas en el marco de este estudio, la actividad de fabricación de envases de vidrio, botellas, frascos y tarros tiene la característica diferenciadora de que requiere elaborar su propia materia prima: el vidrio. De tal manera, esta actividad se constituye en 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, esto es el 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.

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 reducir el impacto energético y ambiental afectan de manera muy positiva al conjunto productivo.

4.1.

Medidas factibles para México y costos estimados (oportunidades).

El consumo total de energía en la industria del vidrio de México a 2016 es de 64,327 PJ de acuerdo al Balance Nacional de Energía elaborado por SENER. En la **Tabla 1.7** se muestra una clasificación de medias con su respectivo potencial de ahorro energético, estimado en función del consumo reportado en el Balance Nacional de Energía de 2016.

Tabla 1.7. Potencial de ahorro de energía (en función del consumo energético señalado por el BNE a 2016).

| Tipo de medida | Porcentaje estimado de ahorro | Potencial de ahorro de energía anual (PJ) |
|--|-------------------------------|---|
| Comenzar a medir los consumos energéticos | 5 | 3,200 |
| Por housekeeping o retrofitting | Hasta 10 | Hasta 6,400 |
| Por auditorías, mejores prácticas, otros estudios, incluidos SGEEn | 10 – 25 | Entre 6,400 y 16,000 |
| Por cambio tecnológico | 25 – 40 | Entre 16,000 y 25,700 |

Fuente: Estimado con base en las cifras del Balance Nacional de Energía de México 2016, sector industrial, vidrio.

4.2.

Potencial de ahorro de energía (conforme a las medidas, prácticas y cambios de tecnologías recomendadas).

En la Tabla 1.8, se presenta una selección de medidas de ahorro recomendadas, potenciales de ahorro energético, inversión estimada, períodos de repago simple, y lugares donde se aplicó cada una de las medidas (cuando existe esta información) para la etapa de proceso correspondiente a fusión y refinado.

Tabla 1.8. Medidas recomendadas y potencial de ahorro.

| Medida recomendada | Potencial de ahorro (%) | Beneficio colateral | Inversión estimada | Período de repago simple | Lugar de aplicación |
|--|---|------------------------------------|--------------------|--------------------------|---|
| Control computarizado | 2 a 3% | Δ producción de hasta 8% | 150,000 US\$ | < a un año | Planta de vidrio en Canadá |
| Incremento de la cantidad de vidrio reciclado (<i>cullet</i>) | Δ 10% vidrio reciclado, ahorro 2.5 a 3 % de energía | Depende de disponibilidad y costos | S/D | S/D | Estatus: comercial, generalizado a la industria |
| Mejora en recubrimiento refractario y aislaciones | Se reduce entre 1 y 1.5% la factura energética y hasta 7% sustituyendo los ladrillos refractarios en la sección de regeneración con materiales especiales | S/D | S/D | S/D | Estatus: comercial |
| Selección de combustible | El uso de <i>fuel-oil</i> se considera un 7-8 % más eficiente en términos de energía que el uso de gas natural | Menos emisiones de GEI | S/D | S/D | Estatus: comercial |
| Uso de hornos con tecnología <i>end-fired</i> | Comparado con hornos con tecnología <i>cross-fired</i> la eficiencia térmica <i>end-fired</i> es 10% superior | | 305,000 US\$ | 7 meses | Reino Unido |
| Combinación de horno de fusión eléctrico y precalentador <i>batch</i> a gas natural | 9 GWh/año de energía eléctrica. Consumo de gas: 3.5 Gwh/año | | 208,000 US\$ | 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 | | 300,000 US\$ | Entre 7 y 14 meses | Planta en India |
| Electrodos de fusión en tope | 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% | | | 4 meses | Planta en Reino Unido |

| | | | | | |
|---|---|--|---|----------|-------------------|
| 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 t/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% | | Costos elevados | | Alemania |
| Uso de burbujeo de oxígeno | El burbujeo de oxígeno incrementa la eficiencia un 10-15% | | | | Holanda |
| Uso de variadores de velocidad ajustables en ventiladores | Ahorro de 800 MWh/año | | | 1.7 años | Planta en EUA |

Fuente: Industrial Efficiency Technology Database.16

4.3.

Resultados esperados.

De acuerdo con la intensidad energética del sector vidrio en su conjunto, según información al año 2015, esta rama industrial presenta un valor de IE (promedio) de 11.6 GJ/t. Las instalaciones industriales del grupo local VITRO, uno de los más importantes productores mexicanos de vidrio, presentan una intensidad energética media de 9.7 GJ/t; este valor está un 16% por debajo de la media nacional, pero un 20% por encima de la industria del vidrio en países desarrollados (8 GJ/t). Esto indica que hay un margen significativo para mejorar la eficiencia energética (medida en términos de IE) en el sector del vidrio de México, tomando al Grupo Vitro como evaluación comparativa interna.

Una acción sostenida en el tiempo, mediante estudios sectoriales que determinen las oportunidades de ahorro energético al tiempo que un adecuado apoyo financiero para implementar las inversiones que sean necesarias para alcanzar un meta de ahorro de energía, darán como resultado capturar ese 15 a 20% de ahorro energético para estar a la altura de las mejores prácticas internacionales. Los resultados esperados en cuanto a reducción de emisiones de GEI serán directamente proporcionales a la reducción del consumo energético sectorial.

16 Institute for Industrial Productivity, <http://ietd.iipnetwork.org/glass>.

5. Celulosa y 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 con 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 a 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.

El proceso de producción de pulpa a partir de fibra virgen más utilizado, internacionalmente, 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 menor cantidad de energía que el proceso químico (menos del 50%), 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 bajo el 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.

5.1.

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 1.9**.

Tabla 1.9. Estimación de los usos y requerimientos energéticos por proceso agregado.

| Proceso (GJ/Ton pulpa) | Combustible | Electricidad | Vapor | Total de Energía |
|-------------------------------|-------------|--------------|-------|------------------|
| Descortezado y Chipeado | | 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: Fundación Bariloche.

La matriz que se asoció a la producción *kraft*, partiendo del insumo virgen, corresponderá a la tabla completa (excluyendo la fila “pulpado fibra reciclada”). La matriz estimada para la producción de papel reciclado es aquella que comienza en la cuarta fila (véase la **Tabla 1.9**). Para el proceso de producción de papel, partiendo de la pulpa importada, se adoptará una matriz únicamente con los dos últimos procesos, blanqueado y producción de papel. La columna del total de energía por tonelada de papel asume para el vapor una eficiencia de producción del 80%.

5.2.

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 a los valores internacionales.

En la comparación internacional puede notarse que el potencial de eficiencia energética, únicamente adoptando tecnologías usadas internacionalmente, es bajo; no supera el 5 a 10%. La adopción de las mejores tecnologías disponibles, equivalentemente al caso del promedio de las industrias en OCDE podría, sin embargo, ampliar dicho potencial, como se verá a continuación.

Para el caso de México, se puede reconstruir el consumo energético térmico y eléctrico de la industria de la pulpa y el papel, y aproximarla al BNE del año 2015 a partir de las matrices presentadas. Los resultados obtenidos aproximan muy bien los valores demandados de

combustibles consignados en dicho BNE del sector papel y pulpa.¹⁷ La energía eléctrica estimada, sin embargo, sobrepasa de manera importante el valor del BNE que se encuentra en 10.9 PJ, lo que indica la posible existencia de energía cogenerada no registrada. Utilizando los valores registrados por la CRE se pueden explicar 1.9 PJ de energía eléctrica cogenerada, restando aún 8 PJ de los estimados, que no se encuentran presentes en la estadística oficial. Tal estimación se muestra en la matriz siguiente (véase la **Tabla 1.10**).

Tabla 1.10. Estimación del consumo de energía térmica y eléctrica por proceso de producción de pulpa y papel en México – año 2015.

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

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

Fuente: Fundación Bariloche con base en Cámara, (2017), IETD, (2017), EC, (2001), Cámara, (2011).

5.3.

Potencial de eficiencia energética en la industria de papel y celulosa.

Dado el peso que posee el proceso de fabricación de papel, con base en la 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.

Debido al importante peso de la fuerza motriz en la vía de producción a partir de fibra secundaria, será importante analizar el efecto de los 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/t de papel con inversiones rondando los \$6 USD/t (Martin, 2000).

Adicionalmente, se evaluó el impacto de aumentar la cogeneración. Las industrias papeleras poseen un balance de consumo térmico-eléctrico que las hace aptas para cogenerar la electricidad

¹⁷ 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.

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 (European Commission, 2001). Muchas veces el costo de compra a la red o las barreras de venta de excedentes impiden su desarrollo. Como parte de este proyecto, se evaluó el potencial remanente suponiendo el caso de llegar a una cogeneración de autoabasto completo. Se estima que la cogeneración en las operaciones de fabricación de papel con base a fibra secundaria puede reducir la compra de electricidad prácticamente a cero (3 kWh/t (European Commission, 2001).

Asimismo, se analizó 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.

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

A continuación, se presenta un listado de las medidas que se seleccionaron y propusieron por las instancias participativas, aquellas con mejores indicadores económicos para su implementación, así como aquellas con mayores reducciones posibles. Las convalidadas por los actores del sector fueron evaluadas en el modelo energético global LEAP para estimar su impacto y conveniencia a nivel nacional. (véase la **Tabla 1.11**)

Tabla 1.11. Síntesis de las principales opciones de ahorro de energía.

| Medida | Ahorro estimado [GJ/t] | Costo estimado [USD/t] |
|---|------------------------|------------------------|
| Eficiencia en motores | 0.60 | 6.00 |
| Automatización y control vapor | 0.54 | 0.40 |
| Disminución de requerimientos de aire | 0.76 | 9.50 |
| Eficiencia en producción y conducción de vapor | 2.80 | 4.10 |
| Extensión de prensado (<i>shoe press</i>) | 1.60 | 38.0 |
| Secado Condebelt | 1.70 | 28.2 |
| Recuperación de calor de secado | 0.50 | 17.5 |

Fuente: Fundación Bariloche con base en Worrell *et al.*

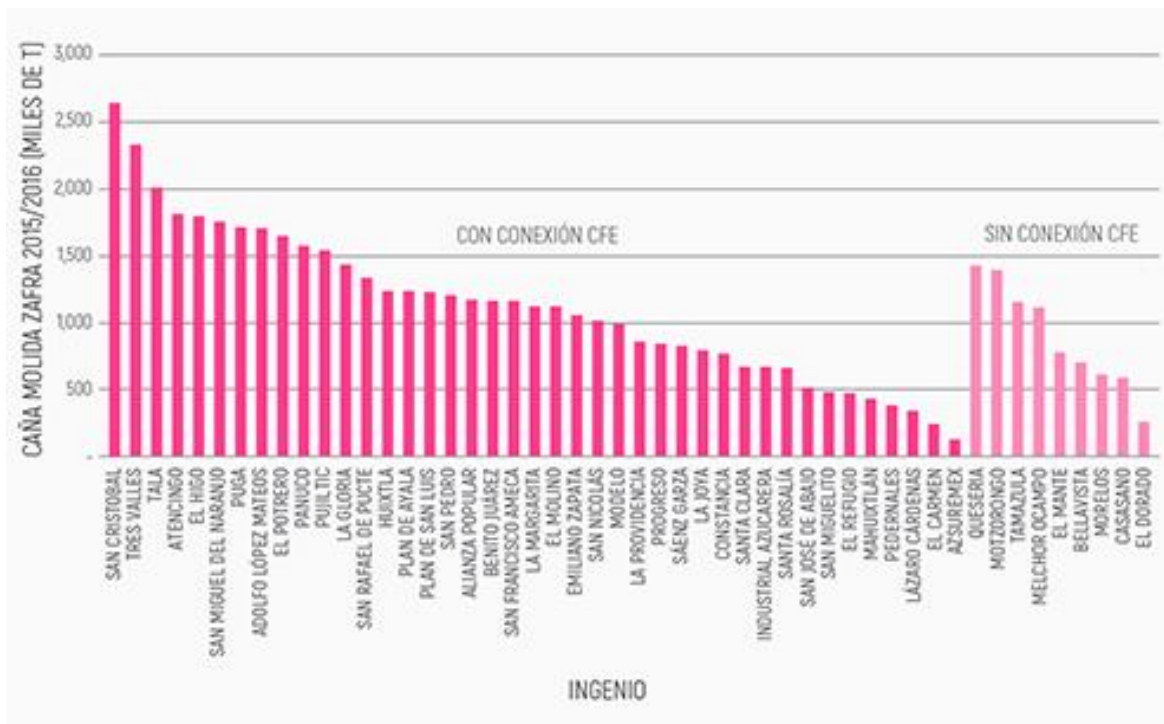
6. Potencial de cogeneración en los ingenios azucareros de México

6.1.

Caracterización general del sector.

Existen 51 ingenios azucareros operando en México organizados en 14 grupos. Durante la zafra 2015/2016 se molieron 54,188,609 toneladas de caña de azúcar (véase la **Figura 1.4**).

Figura 1.4. Molienda de caña de la zafra 2015/2016 por ingenio azucarero en México.



Fuente: Fundación Bariloche con base en la CNIAA (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, de acuerdo con lo que se indica en la siguiente tabla (**véase la Tabla 1.12**), donde se observa que, a mayor presión y temperatura de trabajo, mayor es la energía eléctrica excedente.

Tabla 1.12. 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 |

Nota: Para el cálculo de los valores de la tabla anterior, se asume una producción de 280 kg de bagazo por tonelada de caña procesada con un contenido de humedad del 50%, y el uso de turbinas de vapor a contrapresión o turbinas de condensación en el caso de generación fuera del período de cosecha.

Fuente: BNDES, (2008).

Las restricciones en la disponibilidad de bagazo limitan la generación eléctrica al período de cosecha de la caña (unas 30 de las 52 semanas del año en México), de acuerdo con datos de la Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica (CNIAA) (2017). 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, la estructura y fertilidad del suelo, reduce la erosión, etc.). 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.

6.3.

El potencial de cogeneración en los ingenios azucareros de México.

A continuación, se brinda una síntesis general del parque de calderas basándose en datos de la CNIAA (2017):

- 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 CFE.
- 9 de los ingenios (15% de la caña molida en la zafra 2015/2016) no poseen conexión a la red eléctrica (sin conexión con 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 de toneladas de caña). Estos ingenios están conectados a la red eléctrica 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 restante) 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, todos ellos con calderas de 24 a 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.

La eficiencia bruta de los ingenios 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.

Tal como se indicó anteriormente, existen 9 ingenios de 6 grupos que estarían generando excedentes de electricidad (véase la **Tabla 1.13**), 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 1.13. Grupos con ingenios que venden electricidad a la red o a socios.

| Ingenio | Caña molida (Ton) | Excedente (GWh) | Rendimiento excedente (kWh/t caña) |
|-----------------|-------------------|-----------------|------------------------------------|
| Ingenio 1 | 2,239,987 | 67 | 29 |
| Ingenio 2 | 2,012,135 | 31 | 15 |
| Ingenio 3 | 1,755,784 | 68 | 39 |
| Ingenio 4 | 1,434,850 | 2 | 1 |
| Ingenio 5 | 1,335,437 | 3 | 2 |
| Ingenio 6 | 1,238,907 | 5 | 4 |
| Ingenio 7 | 1,014,907 | 17 | 16 |
| Ingenio 8 | 771,752 | 7 | 9 |
| Ingenio 9 | 664,400 | 4 | 5 |
| Totales: | 12,558,159 | 202 | 26 |

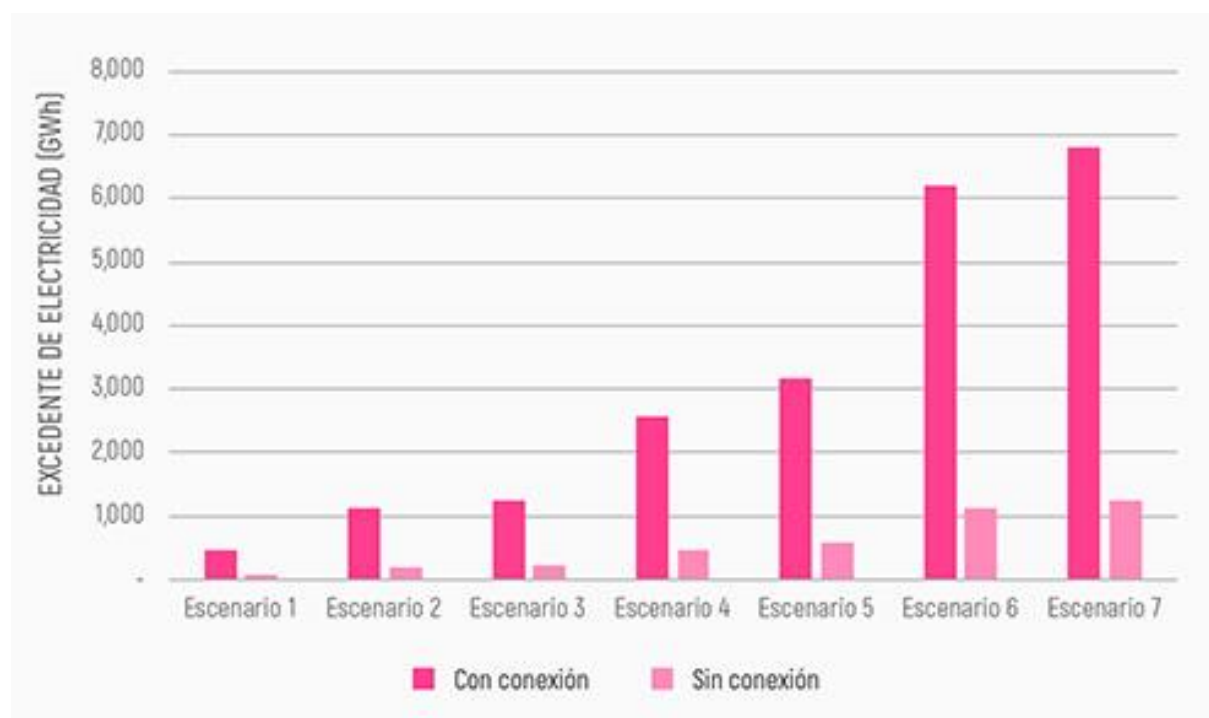
Fuente: Fundación Bariloche con base en CNIAA (2017) y PRODESEN (2016).

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 1.12** (28-57 kWh/t caña), y el promedio para los 9 ingenios se sitúa cerca del escenario 2 de la **Tabla 1.12** (25.4 kWh/t).

Teniendo en cuenta estos datos, se estiman a continuación potenciales de cogeneración para diversos escenarios con base en el 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 listados en la **Tabla 1.13**. Las **Figuras 1.5 y 1.6** 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 (con base en la molienda de la zafra 2015/2016). Para la estimación de la potencia se asume un factor de capacidad del 40%, (escenarios 1 a 5). 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 CO₂e).

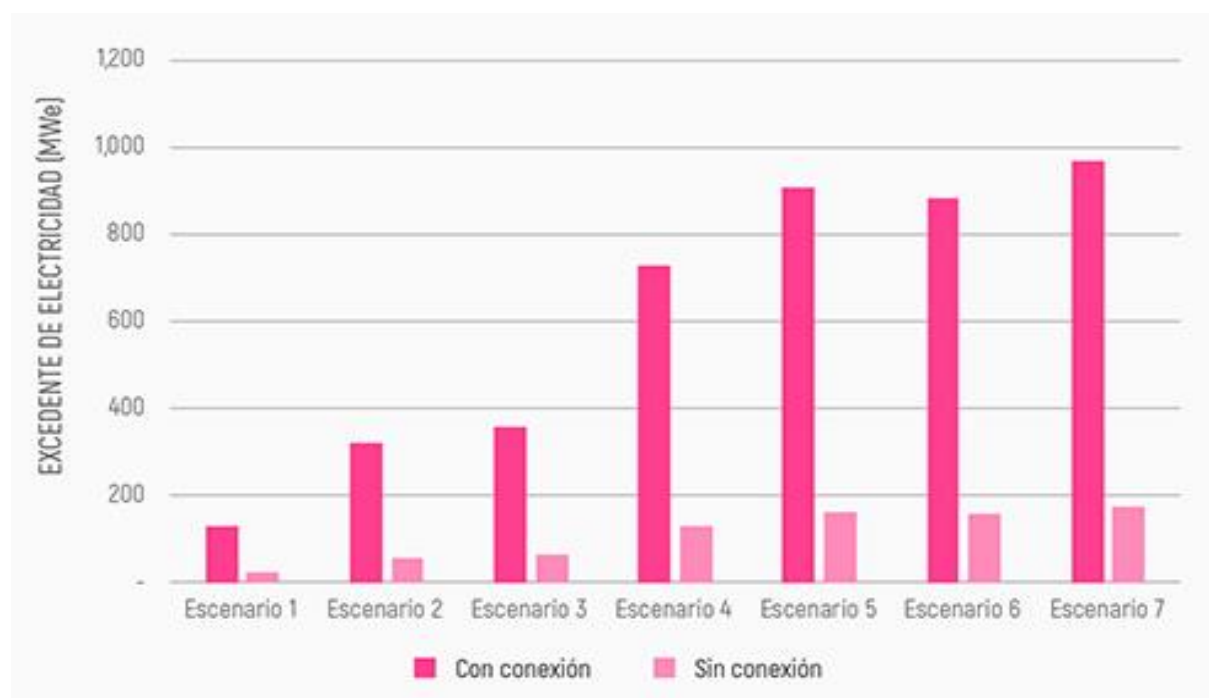
Figura 1.5. Potencial de excedentes de electricidad generada en ingenios con base en la caña molida durante la zafra 2015/2016 (GWh).



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

Fuente: Fundación Bariloche.

Figura 1.6. Potencial de excedentes de potencia eléctrica instalada en ingenios con base en la caña molida durante la zafra 2015/2016 (MW).



Fuente: Fundación Bariloche.

Los escenarios del 1 al 7 presentan un orden creciente de excedentes de electricidad y de requerimientos de inversiones. El escenario 1 es el que se muestra 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 factibilidad y podría 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. 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).

7. Pequeñas y medianas empresas (PyMEs) industriales

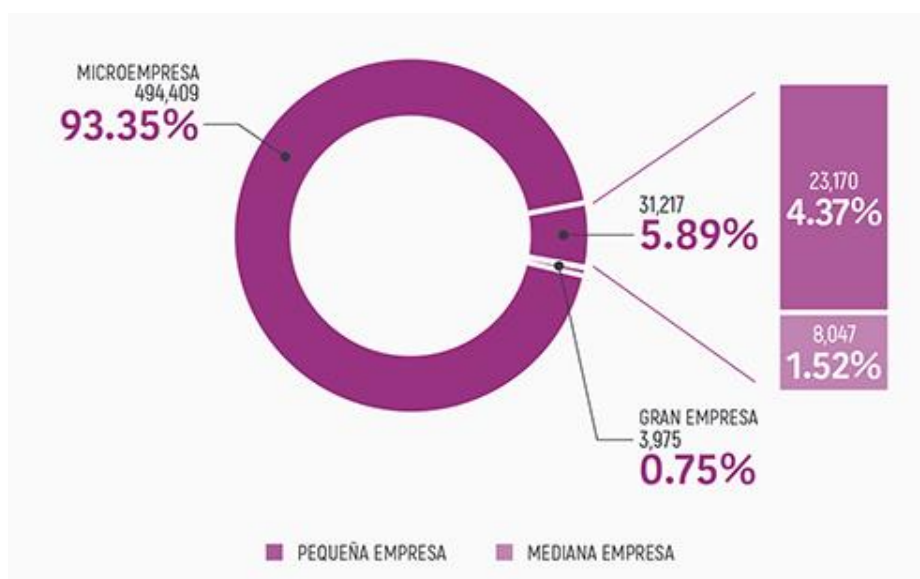
7.1.

Caracterización económica y productiva del subsector PyMEs industrial.

La industria manufacturera en su conjunto, de acuerdo con la información contenida en el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE),¹⁸ se estima que estaba integrada en 2016¹⁹ 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 PyMEs. La **Figura 1.7** muestra la distribución porcentual de esta estratificación.

Figura 1.7. Distribución porcentual de estratos de industrias de manufactura en México, 2016.



Fuente: Fundación Bariloche con información de INEGI (DENUE, 2016).

¹⁸DENUE, décima edición 11/2017.

¹⁹ 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.

En cuanto al personal ocupado en las MiPyMEs en general, la Encuesta Nacional sobre Productividad y Competitividad de las Micro, Pequeñas y Medianas Empresas (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 PyMEs industriales manufactureras ocuparon en 2014 cerca de 1.1 millones de trabajadores, es decir el 37.8% del total empleado para estos estratos de empresas. Por su parte, el PIB total manufacturero fue de 2.939 billones de pesos²⁰, de los cuales las PyMEs generaron 878,000 millones de pesos. Es decir, cerca del 30%.

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

Así, utilizando la información disponible públicamente y los análisis realizados por la Conuee, GIZ y otros esfuerzos del subsector en pro de la competitividad y el respeto al medio ambiente, a continuación se establecen líneas generales y algunas particulares de acción, con potenciales estimados por los propios expertos de la industria.

7.2.

Caracterización energética del subsector PyMEs.

No existe una estadística oficial acerca del consumo energético de las PyMEs manufactureras, sin embargo, se encontraron dos estudios, *Recomendación estratégica sobre tecnologías y subsectores como orientación para sustentar acciones de eficiencia energética en el sector PyMEs*, e *Introducción a la eficiencia energética y Sistemas de Gestión de la Energía en PyMEs de México*, realizados con el apoyo de la GIZ del Instituto nacional de Metrología de la República Federal de Alemania (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*, PTB, por sus siglas en alemán), respectivamente y coordinados por la 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*²¹, y las actualizaciones y proceso de la información emanada de ellos y otras fuentes

²⁰ Producto Interno Bruto a precios corrientes. INEGI, 20/02/015.

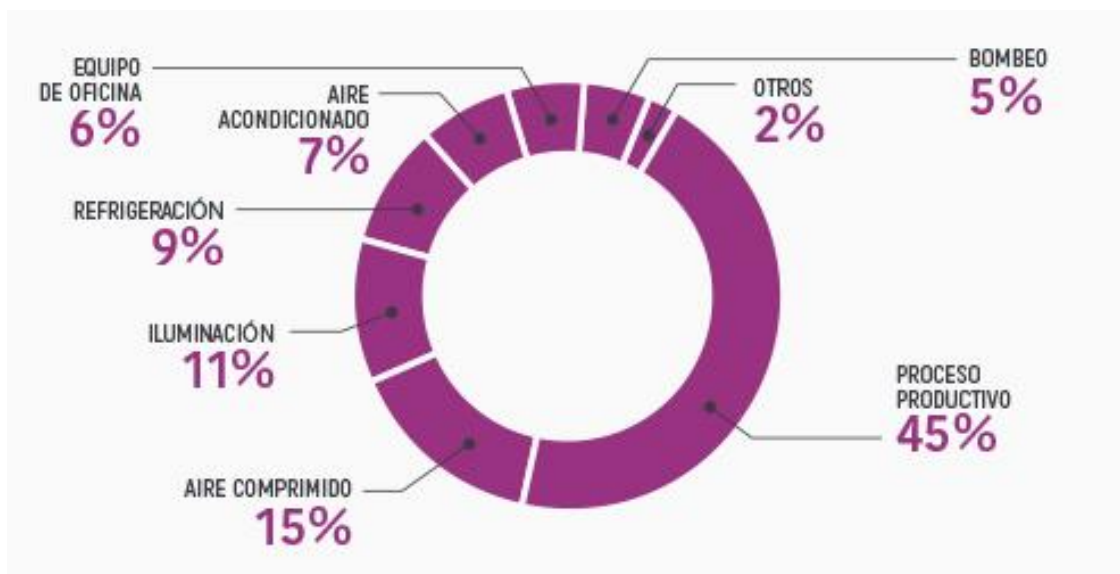
²¹ De Buen, Odón, 2016.

tanto por expertos de GIZ como por el equipo de consultoría de Fundación Bariloche,²² permiten establecer que el subsector PyMEs manufacturero tuvo un consumo energético en 2015 de 674.8 PJ. De este consumo, 317.3 PJ corresponderían a energía eléctrica y 357.5 PJ a energía primaria.

Gracias al procesamiento y actualización de información relacionada con los estudios mencionados, se pudo actualizar la composición encontrada en los mismos para los usos finales de la energía, tanto eléctrica como primaria, en diversas PyMEs de intensidad energética moderada a alta (véase Figura 1.8 y Figura 1.9).

Estos resultados se presentan en las figuras siguientes:

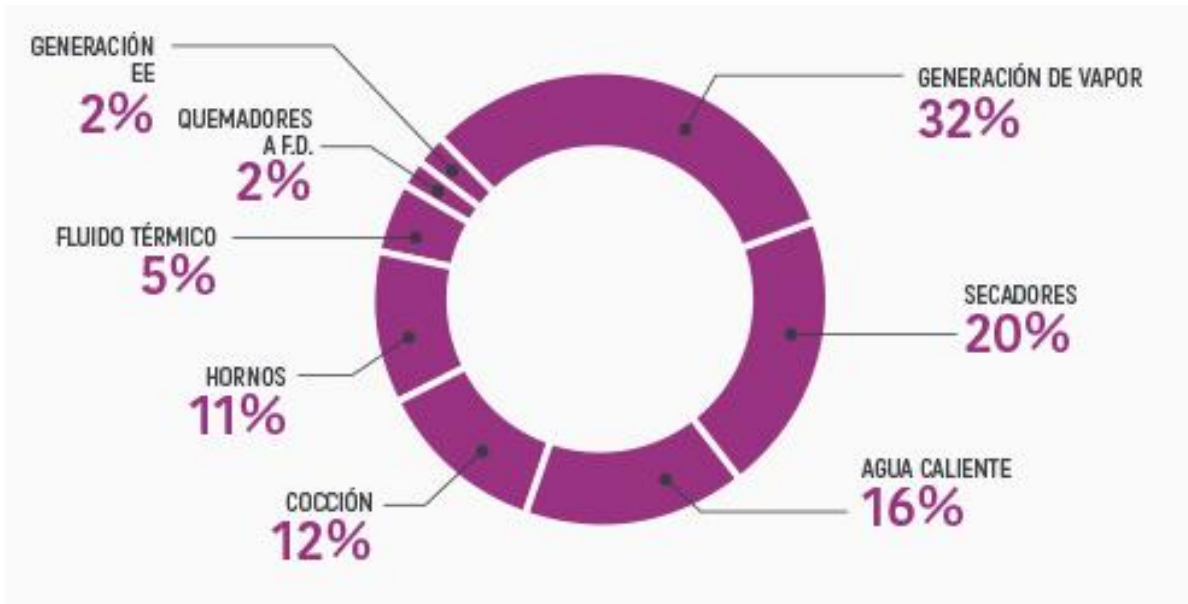
Figura 1.8. Usos finales de energía eléctrica en PyMEs manufactureras en México.



Fuente: Fundación Bariloche con información procesada de estudios mencionados.

²² Nadal, Gustavo, 2017.

Figura 1.9. Usos finales de energía primaria en PyMEs manufactureras en México.



Fuente: Fundación Bariloche con información procesada de estudios mencionados.

7.3.

Medidas para el uso eficiente de la energía en el subsector PyMEs.

En esta versión del documento, no se establece un potencial absoluto de ahorro de energía al no conocerse el consumo energético de las ramas que finalmente serán analizadas, no obstante se harán estimaciones acordes a ello y a la información proveniente de un análisis actualmente en desarrollo, elaborado por expertos de la GIZ. Sin embargo, se enlistan las siguientes medidas identificadas:

- Sistemas de bombeo, compresión y ventilación centrífugas – mejora en eficiencia integral de sistemas.
- Sistemas de iluminación – modernización e instalación de sistemas de alumbrado eficiente.
- Sistemas de refrigeración – mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos.

Además, se tiene conocimiento que existe un alto potencial de ahorro energético y que las tecnologías de cogeneración permiten la instalación de equipos de baja capacidad con buenas

características de rendimiento y desempeño económico, las cuales se sugiere sean motivo de un estudio debido al gran efecto multiplicador de su implementación, particularmente en PyMEs que utilicen cantidades significativas de energía térmica y eléctrica, y que la relación entre dichos consumos en una empresa particular permitan la adaptación de ciclos de cogeneración de pequeña escala disponibles comercialmente.

Potencial de ahorro por mejora tecnológica y de procesos: este rubro puede ser de gran importancia energética, dado que las PyMEs manufactureras (en ciertas ramas de actividad) surgieron y operan con tecnologías que se utilizan 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.

Medidas para el uso eficiente de energía primaria (combustible).

1. Sistemas de vapor: mejora en aislamiento térmico de tuberías y equipos.
2. Sistemas de vapor: mejora en sistemas de evacuación y recuperación de condensado.
3. Sistemas de vapor: ajustes de combustión.
4. Sistemas de vapor: recuperación de calor de gases de combustión.
5. Sistemas de vapor: recuperación de calor de purga continua.
6. Sistemas de vapor: quemadores de alta eficiencia.
7. Calentadores y hornos de proceso: recuperación de calor de gases de combustión.
8. Calentadores de fluido térmico: recuperación de calor de gases de combustión.

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 identificar y acordar criterios que permitan establecer un impacto total.

Tabla 1.14. Síntesis de las medidas de ahorro en el sector PyMEs.

| Oportunidad | Rango de potencial de ahorro | Porcentaje susceptible de aplicación (% de total) | Aplicabilidad técnica ²³ (% 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 |
| 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 |

Fuente: Fundación Bariloche con base en referencias y entrevistas a expertos en eficiencia energética, Conuee, GIZ México, resultados de talleres y colaboración de la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

²³ 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.