



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

APROVECHAMIENTO DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA EN DISTINTOS  
PROCESOS EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA METAL-MECÁNICA MEXICANA

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
AGUSTÍN RUIZ RAMÍREZ

TUTOR  
M.I. ABEL CLEMENTE REYEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

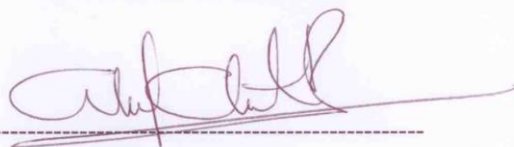
**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Campillo Illanes Bernardo Fabián  
Secretario: Dr. Francois Lacouture Juan Luis  
1 er. Vocal: Dra. Martín Del Campo Márquez Cecilia  
2 do. Vocal: Dr. Barba Pingarrón Arturo  
3 er. Vocal: Dr. Santoyo Castelazo Edgar

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Posgrado de Ingeniería, FI-UNAM, Ciudad Universitaria, CDMX

**TUTOR DE TESIS:**

ABEL CLEMENTE REYES



**FIRMA**

# Contenido

AGRADECIMIENTOS	1
NOTA ACLARATORIA	2
RESUMEN	3
INTRODUCCIÓN	4
1. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	8
1.1.    Objetivo general y específicos	8
1.2.    Metodología de la investigación	8
2. USO DE LA ENERGÍA EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA METALMECÁNICA.	11
2.1.    Módulo de tratamientos térmicos	13
2.2.    Módulo de deformación plástica (conformado mecánico).	19
2.3.    Módulo de corte y acabado final de piezas metálicas	30
2.4.    Módulo de unión de partes: Soldadura.	35
2.5.    Módulo de fundición de metales.	37
3. LA INDUSTRIA METALMECÁNICA SIDERÚRGICA EN MÉXICO Y LOS RECURSOS ENERGÉTICOS.	41
3.1.    Industria metalmecánica siderúrgica en México	41
3.1.1.    Distribución geográfica y estadística de interés.	41
3.1.2.    Características de la producción metalmecánica siderúrgica.	47
3.2.    Consumo energético en el sector siderúrgico en México.	49
3.3.    Energía renovable en las entidades con mayor actividad metalmecánica siderúrgica.	49
4. TECNOLOGÍA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA RENOVABLE APLICADA AL SECTOR METALMECÁNICO	54
4.1.    Clasificación de la literatura consultada	54
4.2.    Aspectos relevantes nacionales e internacionales de la literatura consultada.	56
5. IMPACTOS AMBIENTALES RELEVANTES DEL SECTOR METALMECÁNICO.	68

6. PLANTEAMIENTO DE UN CASO PROBLEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA LIMPIA APLICADA AL SECTOR METALMECÁNICO MEXICANO.	76
6.1. Construcción de un escenario base o tipo Bussiness As Usual (BAU)	76
6.1.1. Selección de materiales y operaciones involucradas.	76
6.1.2. Selección del entorno geográfico	83
6.2. Aspectos relevantes en el diseño del sistema de generación de energía renovable	85
7. CONCLUSIONES	89
8. COMENTARIOS FINALES	91
REFERENCIAS BIBLOGRÁFICAS	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Producción internacional de metales comunes en el año 2011.	4
Figura 2.	Módulos de operación en una planta perteneciente a la industria metalmeccánica	12
Figura 3.	Flujo de materiales y energía generales en los procesos de fundición.	12
Figura 4.	Diagrama de equilibrio de fases del sistema Fe-Fe <sub>3</sub> C.	14
Figura 5.	Curva típica de temperatura frente a tiempo (o avance dentro del horno) para el tratamiento de acero en un horno continuo de recalentamiento.	17
Figura 6.	Ejemplo de máquina empleada en la forja de componentes metálicos (martillo de contragolpe).	22
Figura 7.	Representación esquemática del proceso de laminación.	23
Figura 8.	Esquema de sección transversal del proceso de trefilado.	25
Figura 9.	Esquema que muestra el conjunto de operaciones de limpieza, preparación y deformación involucradas en el trefilado de alambre.	26
Figura 10.	Sección transversal de los procesos de extrusión básicos: Extrusión (a)directa e (b)indirecta.	26
Figura 11.	Ejemplo de máquina de extrusión.	27
Figura 12.	Proceso de embutido y esquema de deformaciones ocurridas en la placa deformada.	29
Figura 13.	Maquinado ortogonal idealizado	31
Figura 14.	Esquema de funcionamiento de la soldadura por arco eléctrico con electrodo sumergido.	35
Figura 15.	Diagrama de Sankey de los flujos de energía involucrados en cada una de las etapas de la fabricación de productos metálicos por fundición.	39
Figura 16.	Evolución del PIB total y de la construcción	43
Figura 17.	Localización geográfica de la producción bruta total de la rama siderúrgica en 2013.	44
Figura 18.	Distribución geográfica de la industria siderúrgica en México en 2019.	45

Figura 19.	Contribución porcentual promedio de cada producto en la producción total siderúrgica.	48
Figura 20.	Tipo de referencia bibliográficas consultadas y su contribución porcentual.	55
Figura 21.	Fotografía del concentrador solar empleado por Llorente et al y esquema que ilustra la concentración solar en el dispositivo.	59
Figura 22.	Diagrama general del modelo de generación de energía por medio de gas de síntesis para un horno de tratamiento térmico de polvo de acero.	65
Figura 23.	Distribución de los aserraderos en un radio de 250 km con respecto a la planta de polvo de acero en Höganäs.	66
Figura 24.	Contribución actual y futura de las opciones bioenergéticas para la generación de energía en México.	67
Figura 25.	Mapa de fuentes de emisión fijas más importantes del sector de la Industria metalúrgica, siderúrgica y metalmecánica.	69
Figura 26.	Recipientes transportables para contener Gas L.P clase 1 a) tipo común y b) tipo semicapsulado.	77
Figura 27.	Gráfico de distribución porcentual de la energía en el caso problema planteado al considerar los valores de consumo energético anual por operación mínimos (Caso 1).	82
Figura 28.	Gráfico de distribución porcentual de la energía en el caso problema planteado al considerar los valores de consumo energético anual por operación máximos (Caso 2).	83
Figura 29.	Mapa de Coahuila marcado con el radio de influencia del caso problema.	84
Figura 30.	Mapas de recurso solar en la zona delimitada por el radio de influencia para el caso problema planteado.	86
Figura 31.	Mapas de recurso eólico en la zona delimitada por el radio de influencia para el caso problema planteado.	86
Figura 32.	Mapas de recurso en biomasa en la zona delimitada por el radio de influencia para el caso problema planteado.	87

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ventajas y desventajas de los tipos de hornos utilizados en las operaciones de tratamiento térmico de acuerdo con el tipo de fuente de calentamiento.	18
Tabla 2.	Ventajas y desventajas del conformado en caliente y en frío.	20
Tabla 3.	Desglose del consumo energético en la cadena productiva completa del conformado en frío.	24
Tabla 4.	Energía específica consumida por distintos materiales metálicos en distintos procesos de conformado mecánico	27
Tabla 5.	Energías específicas de corte para diferentes materiales metálicos.	31
Tabla 6.	Uso de la exergía para la deformación elástica y plástica de materiales metálicos.	32
Tabla 7.	Energía específica consumida por distintos materiales metálicos en procesos de maquinado.	33
Tabla 8.	Algunas características de las técnicas de soldadura por arco eléctrico.	36
Tabla 9.	Algunas especificaciones para modelos de equipos para soldadura por arco eléctrico de la empresa Okila y de la línea WELD500.	37
Tabla 10.	Contribución porcentual al consumo de energía en una fundidora de aluminio.	38
Tabla 11.	Energía específica consumida por distintos materiales metálicos en procesos de fundición.	39
Tabla 12.	Principales entidades participantes en el sector siderúrgico (miembros de CANACERO) por entidad federativa.	46
Tabla 13.	Productos siderúrgicos fabricados por acereras y laminadores en México.	47
Tabla 14.	Algunas investigaciones relevantes adicionales relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar térmica.	61
Tabla 15.	Emisiones por subsector de interés en el estado de Veracruz.	71
Tabla 16.	Algunas de las emisiones identificadas para distintos procesos metalmeccánicos.	73



Tabla 17.	Emisiones de CO <sub>2</sub> para aceros al carbono con distintos contenidos del principal elemento de aleación procesados en operaciones metalmeccánicas.	75
Tabla 18.	Materiales seleccionados para cada producto con base en la normatividad.	78
Tabla 19.	Cálculo de la energía específica de recalentamiento y laminado en caliente.	79
Tabla 20.	Rangos de energía específica de procesamiento y de consumo energético para cada uno de los procesos principales de fabricación de los productos seleccionados para el caso problema.	81
Tabla 21.	Rangos de emisiones específicas de CO <sub>2</sub> de procesamiento y de emisiones de CO <sub>2</sub> para cada uno de los procesos principales de fabricación de los productos seleccionados para el caso de estudio.	81
Tabla 22.	Porcentajes del consumo total de energía que representan cada uno de los procesos contemplados en la relaminadora planteada para el caso problema .	82

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Facultad de Ingeniería de la UNAM por ser sede de mis estudios de Maestría y al CONACYT por la beca económica brindada.

Al Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM por brindarme las facilidades para continuar con mi vida académica docente durante mis estudios de Maestría.

Al M en I. Abel Clemente Reyes por aceptarme como su estudiante, confiar en mi y en el tema propuesto, por su comprensión y paciencia en todo momento y sobre todo por enseñarme que la ingeniería es una disciplina integral y que una visión holística es importante para el éxito de un proyecto. Llevo sus enseñanzas conmigo y ahora las transmito a mis estudiantes.

A la Dra. Cecilia Martín del Campo Márquez por el apoyo brindado durante los problemas de salud que atravesé mientras desarrollaba esta investigación.

A mi familia: mis padres Agustín e Irma, mi hermana Haidé, mis primas Katherine y Ximena, por su amor incondicional y su ayuda. Los llevo conmigo en cada paso que doy.

A los amigos que hice durante mi travesía en el posgrado: Selef, Juan Carlos, Ernesto, Salma, Óscar, Claudia. Así como todos aquellos que siguen a mi lado en este viaje.

A todos los que se han cruzado en mi camino y que en un modo u otro han dejado una huella en mi vida, en mi aprendizaje y en mi corazón.

Muchas gracias.

### **Nota aclaratoria**

Toda la información asociada a entidades del sector industrial estudiado presentada en este trabajo es de acceso público y fue empleada exclusivamente con fines académicos y se dejan a salvo posibles derechos de autor o intelectuales de terceros que pudieran haber sido mencionados como referencia bibliográfica, el objetivo de este trabajo no intenta promover de manera alguna las tecnologías, marcas comerciales, productos o servicios, secretos industriales de terceros que pudieran haber sido mencionados en este documento.

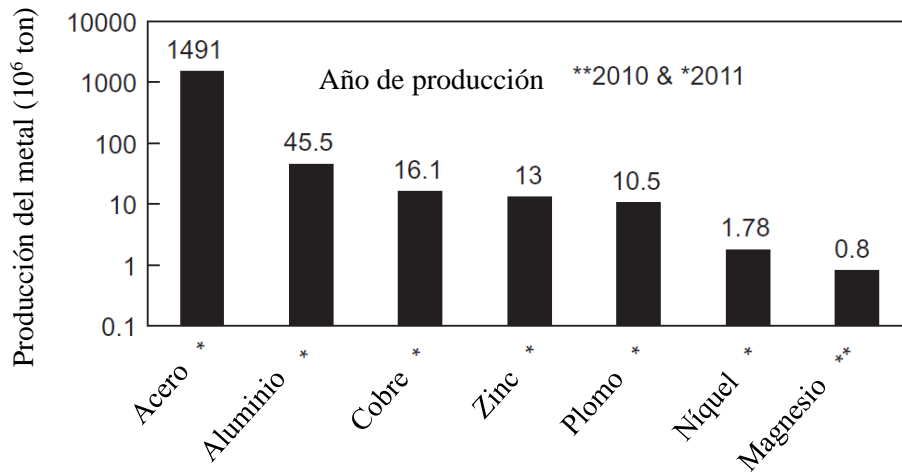
## Resumen

La industria metalmeccánica del hierro y del acero es una actividad económica energéticamente intensiva, cuyo consumo debe abastecer operaciones que pueden involucrar altas temperaturas ( $> 400^{\circ}\text{C}$ ) y deformaciones plásticas severas de materiales base hierro con el fin de producir productos terminados o semiterminados. Aunado a ello, el impacto ambiental de esta actividad en términos de emisiones atmosféricas directas proviene principalmente de la quema de combustibles fósiles como el gas natural, para abastecer energía a procesos como los tratamientos térmicos. En México, el sector siderúrgico al que pertenece esta industria consumió el 13% de la energía total del sector industrial y el 0.6% de las emisiones atmosféricas nacionales. Bajo este contexto, en este trabajo se realiza un análisis técnico de la posibilidad de emplear energías renovables en algunas operaciones pertenecientes a la industria metalmeccánica del hierro y del acero mediante un enfoque holístico que aborda, el uso de la energía en un conjunto seleccionado de operaciones del sector (tratamiento térmico, conformado mecánico, corte-acabado superficial, fundición y soldadura), la participación del sector en la economía mexicana, los impactos ambientales en materias de emisiones, los casos de éxito a nivel nacional e internacional del acoplamiento de estas tecnologías a las operaciones metalmeccánicas y el planteamiento de un caso problema; tomando como base una revisión bibliográfica intensiva de documentación de origen diverso. Los resultados de esta investigación muestran que las tecnologías de energía renovable aplicables se encuentran principalmente en etapa de investigación o ingeniería conceptual, aunque ya se reportan casos de éxito industrial en la generación de energía eléctrica. En particular para la energía solar térmica se perciben posibles beneficios a escala laboratorio en operaciones de tratamientos térmicos, soldadura y fundición en materia, por ejemplo, de reducción de emisiones, mientras que la energía fotovoltaica ha superado la ingeniería de detalle con centrales de autoconsumo que benefician a siderúrgicas en México y el mundo.

*Palabras clave: renovables en la industria metalúrgica del hierro y acero, renovables en tratamientos térmicos de aceros, renovables en manufactura de productos metálicos.*

## Introducción

Los materiales metálicos son esenciales para el desarrollo tecnológico de la humanidad. Aleaciones como el acero fueron pieza clave en la construcción de la Revolución Industrial, siendo parte de elementos de maquinaria, herramientas y construcciones. Con el paso del tiempo, se fueron sentando las bases científicas e ingenieriles de la industria dedicada al aprovechamiento de los metales, iniciando así la industria metalúrgica. En la actualidad, los materiales metálicos más utilizados para aplicaciones ingenieriles son los basados en hierro (principalmente aceros), aluminio y cobre; lo que los convierte en los metales más producidos a nivel internacional como lo muestra la Figura 1 que compara la producción mundial de distintos materiales metálicos al comienzo de la última década.



Fuente: Gráfica de Gupta et al. [1].

Figura 1. Producción internacional de metales comunes en el año 2011.

Podría decirse que dentro de la industria metalúrgica existen dos grandes ramos: la industria extractiva que desarrolla procesos para la obtención de los metales y la industria metalmeccánica enfocada en el procesamiento de los metales para fabricar componentes que cubran necesidades ingenieriles. Entonces, *la industria metalmeccánica es la actividad económica que engloba todos aquellos procesos y operaciones unitarias que tienen como objetivo procesar los materiales metálicos susceptibles de manejarse a nivel industrial, para obtener un producto terminado o semiterminado con valor agregado, una vez que ya se ha obtenido el material por vía primaria (a partir de minerales) o secundaria (reciclaje)*. Dentro de este conjunto de operaciones se encuentran el conformado mecánico, la aplicación de tratamientos térmicos, las operaciones de corte y unión, los procesos de fundición (aunque estos podrían considerarse inclusive como otro sector industrial) y algunos procesos menos convencionales como los involucrados en la metalurgia de polvos (pulvimetalurgia).

Por otra parte, enmarcando ambas ramas de la metalurgia se encuentra la industria siderúrgica la cual incluye operaciones tanto de metalurgia extractiva como de metalmeccánica que se encuentran relacionadas con la fabricación y primer procesamiento de aleaciones base hierro, como son los aceros y los hierros colados. Cuando entonces se

mencionan cifras relacionadas a esta industria, éstas se encuentran relacionadas con ambas ramas industriales. Por otra parte, la metalurgia de las aleaciones que no son base hierro se le conoce como metalurgia no ferrosa.

En México, el Banco de Información Económica del INEGI establece que la industria metálica básica representa el 6.08 % del PIB manufacturero, mientras que el subsector de fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo representa el 3.26 % de este indicador. En el primer conjunto, el INEGI considera las operaciones industriales involucradas en la industria siderúrgica y de materiales no ferrosos como el cobre; el segundo campo, como lo indica su nombre, considera la fabricación de productos específicos como la tornillería, bombas, motores eléctricos, etc. La metalurgia extractiva encuadra en el primer subsector mientras que la industria metalmeccánica es transversal a ambos.

En general, la industria metalúrgica es energéticamente intensiva y, por ende, también es intensiva en materia de emisiones. Desde un punto de vista general, la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés) establece en su página web [2] que una tercera parte de la energía global consumida corresponde al sector manufacturero (al que pertenece la industria metalúrgica) además, es responsable del 36% de las emisiones globales de dióxido de carbono. Por otra parte, en particular y de acuerdo con Ashby [3], mediante el uso de la visión dada por el análisis de ciclo de vida, se han obtenido y reportado datos de gran valor asociados con el consumo energético y emisiones de carbono en esta industria. Diversas organizaciones nacionales e internacionales los reportan. Dentro del terreno de la industria extractiva, por ejemplo, existe una gran cantidad de información disponible de acceso público.

En el ámbito siderúrgico, la IEA reporta que el consumo de energía de la producción de acero crudo se mantuvo entre los 19 y los 22 GJ/ton de acero en el periodo definido entre los años 2000 y el 2015, con un descenso del 2.2% para el año 2017 asociado a la implementación de medidas de ahorro de energía y al aumento de la producción del metal a partir del reciclaje (implementación del horno de arco eléctrico alimentado con chatarra) a nivel mundial. Si bien, estas medidas han ayudado a disminuir la cantidad de energía consumida en los procesos de fabricación de este material ferroso, la demanda energética continua en aumento *per se* debido al aumento mundial de la producción de hierro y acero, y existe otro punto de perspectiva importante acerca del consumo energético: hasta el momento, se dista de que el sector siderúrgico se encuentre en una transición energética hacia tecnologías limpias. Alrededor del 75% de la energía directamente demandada proviene del carbón, seguido por el consumo de energía eléctrica (13 %) y en tercer lugar el uso de gas natural como combustible (9%)<sup>1</sup>.

En el caso de los no ferrosos, la IEA reporta también valores de consumo de energía para la producción de aluminio[4]: sin importar la vía de producción del metal (primaria o secundaria), el consumo ha descendido con el tiempo. En el periodo definido por los años 2010-16, el valor global descendió en un 1.7%; para el año 2017, el consumo de energía

---

<sup>1</sup> Estos porcentajes consideran a los consumos asociados al funcionamiento del alto horno y a los hornos empleados para la fabricación de coque metalúrgico.

eléctrica adquiere un valor de 14,154 kWh/ton. La caída se encuentra asociada también a cambios relacionados con el uso de máquinas más eficientes y con el descenso en la producción primaria y el aumento de la producción secundaria: para este mismo año, el 32% del aluminio fue producido a partir de chatarra. Sin embargo, el aumento en la producción de aluminio como en el caso de las aleaciones ferrosas, puede suponer una limitante también en el consumo de energía.

Esta primera búsqueda de información en materia de energía hace evidente el interés por las distintas organizaciones ya sea de investigación, gubernamentales, u otras especializadas en el sector energético por el sector metalúrgico, pero con un enfoque principal en las operaciones extractivas. En contraste, la información aplicada exclusivamente al sector metalmeccánico es más limitada o aún no se encuentra recopilada en referencias bibliográficas similares. Esto presenta un inconveniente pues este sector también juega un papel en los altos consumos de energía y en la liberación de emisiones de la industria metalúrgica en conjunto. En la mayoría de los procesos involucrados en tan solo el sector metalmeccánico, se requieren grandes cantidades de energía tanto cargas de tipo eléctrico como térmico. En la forja de acero, por ejemplo, proceso en el que el material es sometido a la aplicación de esfuerzos cíclicos o impactos [5], la deformación generada es severa y previamente se tiende a elevar la temperatura del material a valores que pueden superar los 800°C con el objetivo de que éste no se fracture al deformarse y además sea fácil de conformar. Como se desprende de lo anterior, la forja implica una alta demanda de energía térmica con una temperatura de operación elevada, además de energía mecánica que se traduce en una carga eléctrica.

Entonces, la industria metalmeccánica podría representar un nicho de oportunidad tanto para la aplicación de medidas de eficiencia energética como del uso de fuentes renovables de energía en esquemas de generación distribuida y con ello para la reducción de emisiones y su consecuente impacto ambiental cuyo efecto pudiera llegar a ser similar a lo observado hasta ahora en el sector metalúrgico extractivo descrito en párrafos anteriores. Entonces, para profundizar en esta posibilidad se desarrolla el presente trabajo. Tomando como eje fundamental la recolección y análisis de la información en materia de energía y emisiones del sector metalmeccánico disponible con una visión holística que permita conocer, en media de que sea posible a partir de la bibliografía, el consumo energético del subsector sector metalmeccánico en general y que también considere el panorama económico del sector y que profundice en las emisiones asociadas a este con un punto de vista nacional que sirva como base de la ingeniería conceptual de un proyecto de generación de energía renovable aplicado al sector metalmeccánico en nuestro país.

Es así como en el primer capítulo se describen los objetivos y la metodología de investigación y en los capítulos 2 a 6 se muestran los resultados de la investigación. Primero, en el capítulo 2 se delimita el conjunto de estudio (en operaciones y materiales) y se da a conocer información de interés sobre la energía en el sector metalmeccánico. Posteriormente, se presenta un panorama general del sector en México desde un punto de vista económico como energético. Continuando en el capítulo 4 con un tema crucial: establecer qué tecnologías existen y se encuentran en desarrollo en México y el mundo para construir

esquemas de generación de energía renovable distribuida para este subsector. Complementando en el capítulo posterior con algunos impactos ambientales de interés para la implementación de estos esquemas. Y, finalmente, se muestra un caso problema construido para conjuntar la información recabada.

De esta forma el trabajo que aquí se presenta, se espera que sea el punto de partida para la implementación de futuros proyectos en la industria metalmecánica mexicana que consideren el empleo de energías renovables como las perspectivas técnica, económica, ambiental y social.



# 1. Objetivos y metodología de la investigación

## 1.1. *Objetivo general y específicos*

Bajo la premisa de que el sector de la industria metalmecánica representa una gran área de oportunidad para el desarrollo de proyectos de ingeniería enfocados en la implementación de energías renovables y limpias en las operaciones asociadas a la industria, el presente trabajo tiene como objetivo el desarrollar una investigación con una visión holística sobre los usos de la energía en los procesos que requiere la industria metalmecánica mexicana, a efecto de realizar un análisis de factibilidad tecnológica (entorno técnico) para el empleo de energías renovables que pudiesen traer beneficios en materia de emisiones y ahorros económicos. Es decir, se busca resolver la pregunta de investigación ¿Es posible implementar esquemas de generación de energía a partir de fuentes renovables en el subsector metalmecánico mexicano?

En específico, este trabajo se enfocará en la industria metalmecánica de los materiales ferrosos o bien del hierro y del acero (industria metalmecánica siderúrgica). Material de gran importancia económica en sectores como el de la construcción y cuyos niveles de producción superan los relacionados con la metalurgia no ferrosa. Sin embargo, se recurre a información relacionada con esta metalurgia a modo de comparación.

Además, para la descripción del entorno técnico se trabajará en lo siguiente:

- a. Determinar el tipo y los niveles de consumo energético en los procesos básicos de la industria metalmecánica siderúrgica.
- b. Estudiar la situación económica del subsector metalmecánico siderúrgico en México.
- c. Establecer cuáles son las fuentes renovables de energía viables para abastecer el nivel de consumo energético en un esquema de energía distribuida.
- d. Determinar el tipo y los niveles de emisiones contaminantes en los procesos básicos de la industria metalmecánica siderúrgica.
- e. Desarrollar un caso problema que explore la posibilidad de aplicar un esquema de generación de energía renovable en el subsector metalmecánico siderúrgico.

## 1.2. *Metodología de la investigación*

Como primer paso, se estudiaron los procesos metalmecánicos desde el punto de vista metalúrgico y energético. Se delimitó el conjunto de procesos básicos en los que sería deseable la aplicación de energía renovable y se describió en qué consisten y cómo es utilizada la energía en éstos. Además, se brindó información sobre los niveles de demanda de energía a partir de la información de equipos industriales y de consumos específicos de energía (consumos por unidad de masa procesada) obtenidos de la bibliografía especializada.

Posteriormente, se estudió la situación del sector metalmecánico siderúrgico en México. Se exploró su distribución geográfica, estadística de interés asociada a su producción y, los recursos energéticos renovables que podrían encontrarse a su disposición en aquellos estados de mayor participación industrial.

Una vez definido el sector metalmeccánico del acero en el país, se procedió a recabar y analizar los casos de éxito existentes a nivel internacional de aplicación de energías renovables en el sector metalmeccánico siderúrgico, con el fin de explorar cuál es la tecnología actualmente disponible para este fin y en qué etapa de investigación y desarrollo se encuentran. Además, se identificó si existen estos casos dentro del territorio nacional y quiénes fueron los agentes involucrados. Durante esta etapa, la información fue clasificada de acuerdo con el tipo de referencia bibliográfica de la que proviene (artículo de investigación científica, notas periodísticas e informes corporativos o institucionales) y del tipo de energía renovable a la cual se hace referencia, creando una base de datos bibliográficos que englobará tanto casos de la última década como anteriores para demarcar la evolución de la tecnología.

Continuando con la investigación, se estableció cuáles son las emisiones atmosféricas, principalmente directas, más importantes asociadas al subsector metalmeccánico siderúrgico y sus niveles (emisiones específicas o por cantidad de material procesado) y se exploró si estas pueden ser mitigadas con la aplicación de las fuentes renovables de energía.

Finalmente, se propondrá un caso problema con el objetivo de consolidar lo establecido en los pasos anteriores de la metodología en un caso planteado para una posible aplicación de las energías renovables en el sector metalmeccánico y con la meta de comprobar la hipótesis de que, es posible implementar un sistema de autoconsumo (y bajo la modalidad de generación distribuida) por medio de energías renovables. Para ello, el caso problema se dividió en dos etapas:

1. Establecimiento de un escenario tipo tendencial (Business As Usual, BAU) en el que se seleccionarán productos siderúrgicos de interés, los procesos industriales más importante relacionados a su fabricación, los consumos energéticos específicos basados en el tipo de aleaciones a partir de las cuáles estos son fabricados y de lo reportado en las referencias bibliográficas para el procesamiento de aceros en general. También, se estableció el entorno geográfico del caso problema a partir de la estadística en materia de la industria metalmeccánica siderúrgica y de la propuesta de un radio de influencia.
2. Propuesta de uso de energía renovables. A partir de los avances tecnológicos explorados y del entorno geográfico propuesto, se plantean las características generales que puede poseer un posible esquema de generación de energía distribuida de autoconsumo para el caso problema.

El eje principal de la investigación es la revisión bibliográfica intensiva y el uso de bases de datos como la proporcionada por el software CES Edupak bajo la licencia del año 2018 que otorga información sobre consumos energéticos específicos y emisiones específicas en función del tipo de materiales y sus propiedades químicas, física, mecánicas, entre otras. El software fue desarrollado con el enfoque de apoyar la selección informada de materiales en el diseño mecánico y aunque podría decirse que éste permanece en este trabajo, la dirección tomada para la interpretación de la información fue para el análisis energético.

Los resultados de la investigación se describen en los capítulos 2 a 6 y también se profundiza la metodología.

## **2. Uso de la energía en el sector de la industria metalmecánica.**

Para cumplir con el objetivo principal de este trabajo, es necesario caracterizar el consumo de energía en este sector. En este capítulo se delimita el campo de estudio de la investigación mediante la selección de los procesos industriales de interés, y se describen estas operaciones desde dos puntos de vista: el metalúrgico y el energético. En el primer caso, se describen en qué consisten estos procesos y cuáles son sus objetivos dentro de una cadena productiva. Mientras que, en el segundo punto de vista, se abordan aspectos como eficiencias energéticas, valores de consumo energético específico y descripciones del tipo de demanda energética en cada proceso; los valores reportados fueron obtenidos de diversas fuentes bibliográficas como son artículos especializados y libros, además se recurrió al uso de la base de datos del software CES Edupak con licencia del 2018 que aporta información clasificada por tipo de material y en términos de la cantidad procesada del mismo. También, este software aporta información sobre los procesos de manufactura aquí descritos.

Como conclusión implícita de la información presentada en la introducción, la industria metalmecánica no es un sector bien delimitado para fines de estudios energéticos. Esto puede deberse a que los procesos correspondientes a esta industria son parte de cualquier cadena de producción en la que se encuentren involucrados los materiales metálicos, lo que podría implicar que en realidad se trata de un subsector.

Los procesos englobados en la industria metalmecánica pueden ser clasificados de acuerdo con su objetivo: algunos modifican las propiedades mecánicas de los materiales, otros buscan obtener un producto con una geometría deseada, otros más modifican la condición superficial de los productos (dando acabado o aplicando recubrimientos), también existen aquellos que unen dos o más componentes diferentes, entre otras aplicaciones. Como se puede notar, la industria metalmecánica engloba a una gran variedad de operaciones diferentes, todas con características particulares de consumo energético. Por ello, el estudio de esta industria se puede tornar extenso y con múltiples consideraciones conceptuales a realizar, lo que conlleva a tomar la decisión de limitar el campo de estudio.

En general, cualquier cadena de producción metalmecánica podría contar con cuatro módulos esenciales: el módulo de deformación plástica, en el que el material adquiere la forma final o intermedia del producto deseado, el módulo de tratamientos térmicos en donde se modifican las propiedades del material para obtener las asociadas al uso final o intermedio del producto, y los módulos de maquinado (acabado) y unión. En algunos casos, también se torna importante el módulo de fundición, sobre todo en la industria del hierro (y de los no ferrosos). La secuencia de operación de estos módulos puede variar e, inclusive, alguno de estos puede estar ausente: por ejemplo, las operaciones de fundición pueden preceder a la deformación plástica o bien sustituirlas puesto que en éstas ya se le da al componente su forma final. También existen operaciones transversales a todos los módulos, como es el caso de los tratamientos térmicos cuyos objetivos son diversos y pueden aplicarse a piezas procesadas por deformación, fundición, corte y hasta unidas por soldadura. En la Figura 2 se muestra la relación entre los módulos establecidos para este trabajo.

Además, en la Figura 3 se presenta un ejemplo del flujo de materiales y energía creado por Pagone et al.[6] para una industria metalmecánica enfocada en la fabricación de componentes obtenidos por fundición. Nótese, para este caso, la presencia de material de desecho a lo largo de prácticamente todas las operaciones, así como de la importante necesidad de demandar energía térmica a través de la cadena productiva, que puede perderse en las etapas que involucran que el estado del metal sea líquido por largos periodos de tiempo.

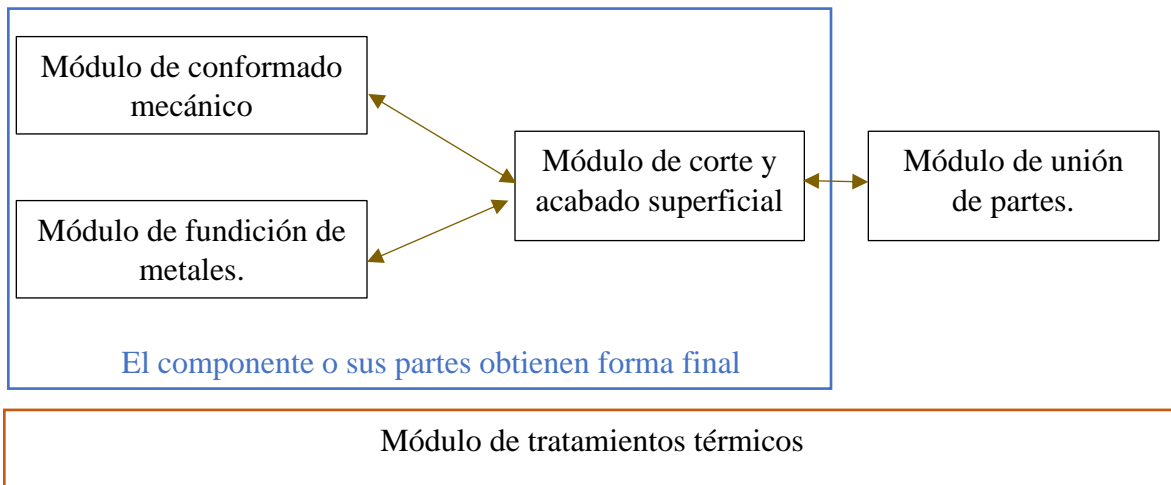
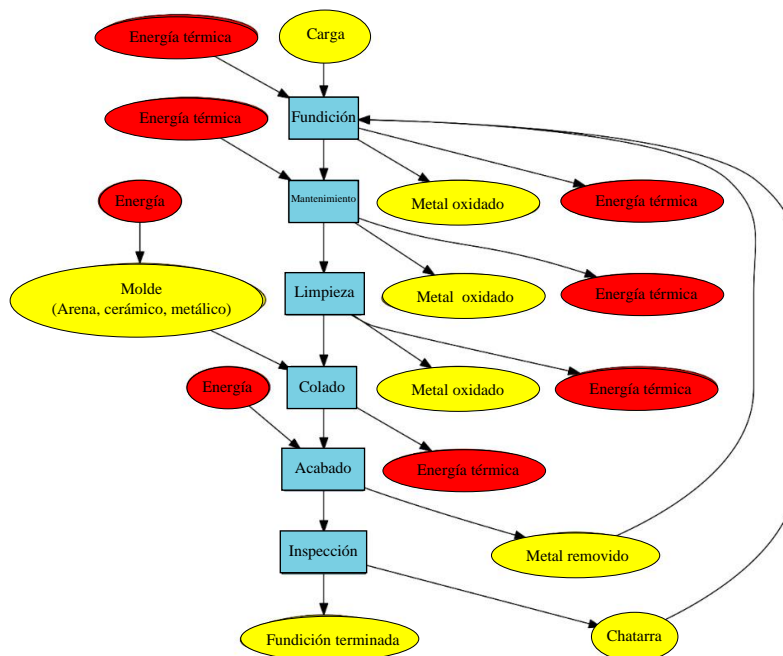


Figura 2. Módulos de operación en una planta perteneciente a la industria metalmecánica



Fuente: Diagrama propuesto por Pagone et. al[6].

Figura 3. Flujo de materiales y energía generales en los procesos de fundición.

En los siguientes párrafos, se describen cada uno de los módulos y se enfatiza en los procesos que los componen y que serán parte del campo de estudio de este trabajo.

## 2.1. *Módulo de tratamientos térmicos*

Las propiedades mecánicas de los materiales pueden ser modificadas mediante la aplicación de ciclos de calentamiento y enfriamiento conocidos como tratamientos térmicos. Los parámetros más importantes para considerar en el diseño de este tipo de operaciones son la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia a esa temperatura y la rapidez de enfriamiento. Dentro de la ingeniería metalúrgica existen múltiples tipos de tratamientos térmicos cuya principal diferencia reside en la combinación de las condiciones de estos parámetros que deben ser acopladas al tipo de material a tratar.

De forma general, es posible catalogar a los materiales metálicos de acuerdo con su composición, lo que resulta en dos tipos generales: los materiales ferrosos o base hierro, y los materiales no ferrosos cuya base son otros elementos metálicos que también son de interés en aplicaciones de ingeniería, entre ellos se encuentran el aluminio, el cobre (con aleaciones como el latón y el bronce), el titanio, el zinc.

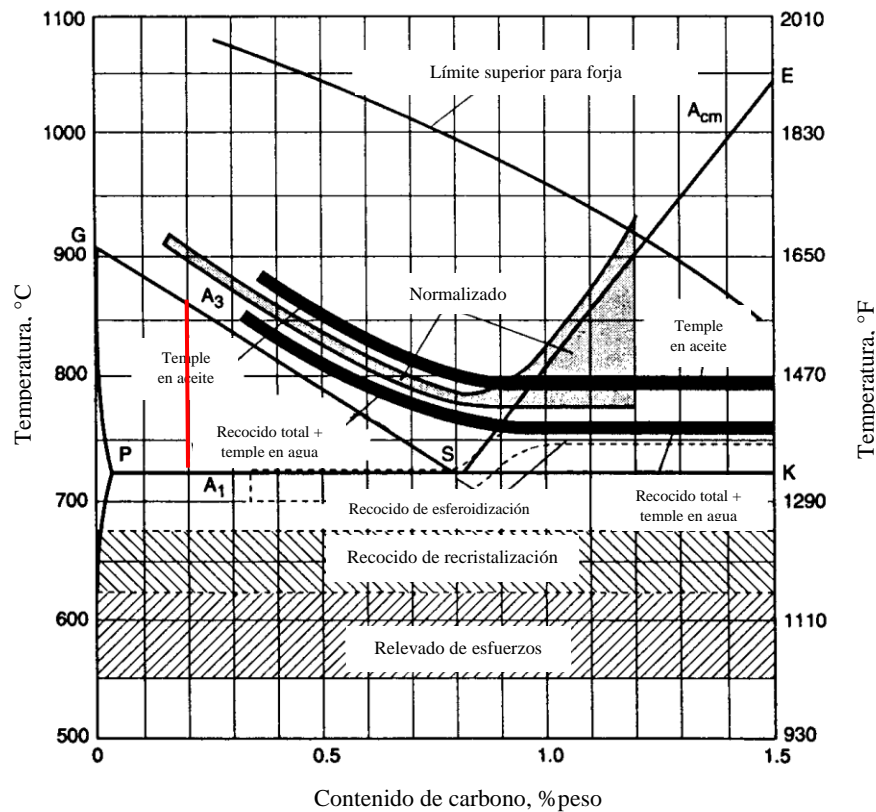
Como se mencionó anteriormente, la industria siderúrgica es la rama de la industria metalúrgica especializada en la producción del hierro y del acero: ambas aleaciones ferrosas. Los aceros son aleaciones de hierro con carbono principalmente, en contenidos de este elemento de hasta el 2.11% y con la presencia de otros elementos (Mn, Si, S, P, etc.) intrínsecos a la materia prima de la cual se obtiene (minerales o chatarra) o bien que son adicionados en la búsqueda de propiedades específicas como es el caso del cromo en altas cantidades que permite proteger a los aceros de la corrosión, creando los denominados aceros inoxidables. Dentro de la industria siderúrgica y como parte de la metalmecánica se encuentran las operaciones básicas de tratamiento térmico para los aceros; los tratamientos convencionales para estas aleaciones pueden dividirse en términos de las temperaturas de tratamiento: la temperatura de operación se elige con base en la composición de carbono del acero lo que resulta de interés dentro del marco de consumo energético. La clasificación con base en este parámetro es la siguiente:

- *Tratamientos térmicos subcríticos:* Realizados a temperaturas por debajo de los  $727^{\circ}\text{C}^2$  aproximadamente.
- *Tratamientos térmicos intercríticos:* Realizados a temperaturas que se encuentran entre el rango de  $727^{\circ}\text{C}$  y una temperatura superior definida por las líneas denominadas como  $A_3$  y  $A_{cm}$  del diagrama de fases (mostrado en la Figura 4). Por ejemplo, para un acero con un contenido de carbono de 0.2 %, un tratamiento intercrítico se realizaría entre el rango de  $727^{\circ}\text{C}$  y  $870^{\circ}\text{C}$ .
- *Tratamientos térmicos supercríticos:* Se llevan a cabo a temperaturas por arriba de las líneas  $A_3$  y  $A_{cm}$  del diagrama de fases, con valores de hasta los  $900^{\circ}\text{C}$ .

---

<sup>2</sup> Esta temperatura es conocida en el medio metalúrgico con el nombre de temperatura crítica  $A_1$ , de allí el nombre para las clasificaciones en lista. Su valor puede variar con la presencia de otros elementos de aleación diferentes al carbono, o bien con las condiciones de rapidez de calentamiento y enfriamiento. Por ello, se maneja como un valor aproximado.

Existe tanta variedad de tratamientos térmicos como de tipos de acero. La clasificación anteriormente dada, suele aplicarse sin restricciones a los aceros al carbono y a algunos aceros aleados de la denominación SAE. Los tratamientos comúnmente aplicados a este tipo de aceros son el recocido total, el normalizado, los recocidos de relevado de esfuerzos y recristalización, y los tratamientos complementarios de temple y revenido. Sus objetivos y especificaciones en temperatura se detallan a continuación, tomando como base principal la información proporcionada por Krauss [7]



Fuente: Diagrama de Krauss et. al [7].

Figura 4. Diagrama de equilibrio de fases del sistema Fe-Fe<sub>3</sub>C.<sup>3</sup>

El recocido total, tiene como objetivo el que el material obtenga las propiedades mecánicas asociadas a un material sometido a un enfriamiento extremadamente lento, de tal forma que se simule que el acero se encuentra en equilibrio termodinámico con cada cambio de temperatura. Por lo general, en este tratamiento se obtienen las propiedades mecánicas uniformes (de valor similar en toda la pieza) asociadas a durezas bajas y alta ductilidad. Las temperaturas de operación de un recocido total dependen de la composición de carbono de la aleación a tratar: las aleaciones de bajos contenidos de carbono suelen ser tratadas por arriba de los 900°C, conforme aumenta el contenido de carbono en el acero disminuye esta

<sup>3</sup> Se muestran los intervalos de temperatura de operación para los diversos tratamientos térmicos descritos. Se marca en rojo la sección correspondiente al rango de temperaturas intercríticas de operación para un acero de 0.2% en peso de carbono.

temperatura y baja hasta valores cercanos a los 750 °C (como se muestra en la Figura 4). Una vez alcanzada esta temperatura, se mantiene durante un tiempo de permanencia y se enfrían los componentes de acero dentro del horno, cuyo sistema de aislamiento térmico debe garantizar que el material se enfríe lentamente, lo que implica tiempos de inactividad del horno prolongados que, a su vez, hacen a este tratamiento poco atractivo en términos económicos.

Al igual que en el recocido total, el normalizado tiene como objetivo el obtener propiedades mecánicas parcialmente uniformes; la diferencia primordial entre ambos ciclos térmicos yace en la rapidez de enfriamiento. Mientras que en el recocido total la pieza es enfriada lentamente en el horno, en el normalizado la pieza se deja enfriar al aire, lo que da como resultado un material con mayor resistencia mecánica. Las temperaturas de tratamiento son mayores que las empleadas en el recocido total, lo que otorga un intervalo de trabajo ligeramente por arriba de los 750°C hasta los 950 °C. Es un tratamiento ampliamente utilizado y suele sustituir al recocido total cuando el tiempo es un parámetro muy importante en la cadena productiva; por ello suele ser un tratamiento térmico precedente a otros como el temple, sobre todo cuando se busca partir de un material "homogéneo" en la etapa de calentamiento.

Cuando una pieza metálica es sometida a procesos térmicos o mecánicos, se producen esfuerzos residuales en la estructura del material. Estos pueden tener como consecuencia la distorsión de las piezas, la fractura, o bien la falla del componente por debajo del esfuerzo de operación contemplado en el diseño. Los esfuerzos son eliminados mediante la aplicación de un tratamiento térmico de baja temperatura (tratamiento subcrítico) cuyo rango de operación oscila entre los 550 y 625 °C aproximadamente, sin embargo, el tiempo de mantenimiento de la temperatura puede variar desde minutos hasta horas.

El recocido de recristalización es un tratamiento térmico empleado para devolver la ductilidad a aceros trabajados en frío (deformados a temperatura ambiente o apenas por arriba de esta). Por ende, es un tratamiento típico de los procesos de laminación o de trefilado que serán descritos en el módulo de deformación plástica. El rango de temperaturas al cuál se realiza este tratamiento es ligeramente superior al descrito para el tratamiento de recocido de relevado de esfuerzos, encontrándose la temperatura de operación entre los 625 y los 675 °C. A diferencia de la eliminación de esfuerzos, en este caso si se obtienen cambios significativos sobre las propiedades mecánicas del material. Este tratamiento es de los más utilizados en la industria metalmeccánica.

El temple y el revenido, por otra parte, son dos tratamientos con condiciones diferentes de temperatura, tiempo y enfriamiento pero que se deben realizar en conjunto para obtener un acero con alta dureza, resistencia mecánica y tenacidad: lo que implica que ambos puedan ser considerados distintas etapas de una misma operación industrial. Al finalizar el temple, el acero adquiere elevada resistencia mecánica, pero, esta se encuentra asociada con una alta fragilidad. En esta primera operación, se eleva la temperatura del material hasta valores cercanos a las temperaturas de un recocido total o 50 °C por encima de estas, después de mantener la temperatura durante un tiempo determinado, el material es sumergido en un

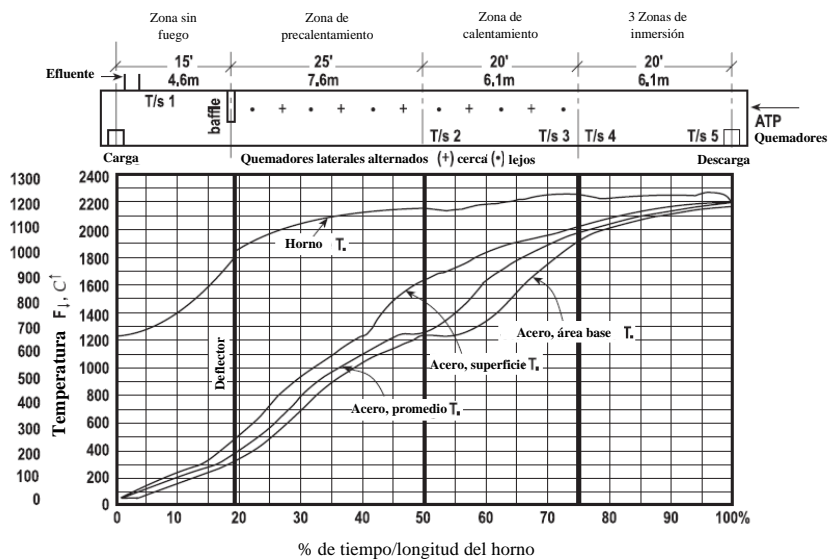


medio de enfriamiento que puede variar en composición química, temperatura y grado de agitación, propiedades que definirán su capacidad de extracción de calor y someterán al acero a diversos valores de rapidez de enfriamiento. Los medios de temple más utilizados son agua, salmuera, aceites minerales, soluciones poliméricas, entre otros. Un acero templado no es apto para utilizarse en aplicaciones ingenieriles debido a su alta fragilidad. Por ello, el material se somete a un tratamiento térmico subcrítico que consiste en un calentamiento a una temperatura determinada durante un tiempo prolongado (en comparación con el resto de los tratamientos térmicos convencionales) seguido de un enfriamiento al aire. La temperatura seleccionada puede variar de entre los 200 °C y los 700 °C, entre mayor sea ésta, menor será el tiempo de mantenimiento cuya magnitud es cercana a las horas.

Retomando el tema del tiempo de tratamiento mencionado en la descripción del último tratamiento de operación; la selección adecuada de un tiempo de tratamiento no es un aspecto trivial; en general, el tiempo asignado debe bastar para que la pieza adquiera la temperatura objetivo en todo su volumen o en la sección de interés y para que las transformaciones de fase involucradas ocurran adecuadamente. Con base en ello, se han establecido criterios empíricos para determinar el tiempo de mantenimiento; uno de ellos, por ejemplo, es el establecido para tratamientos térmicos supercríticos, en los que se considera una hora de mantenimiento por cada pulgada de sección transversal a la dirección de transferencia de calor. Este tipo de reglas son ampliamente recurridas, pero son limitadas, sobre todo porque no se toman en cuenta parámetros asociados a la tecnología del horno que se está empleando, en términos del tipo de fuente calor o si se trata de un horno del tipo *batch* o un horno continuo. Trinks et al. [8] describen una metodología para la determinación del tiempo necesario para que las piezas alcancen la temperatura deseada en un horno continuo, conocida como el método de Shannon para piezas de acero; ésta considera una gran variedad de parámetros relacionados con el horno como los materiales, la distribución/geometría de piezas, entre otros aspectos. En la Figura 5, por ejemplo, se presenta un gráfico resultante de aplicar este método para analizar un horno continuo, en el que en la zona de descarga la pieza podría alcanzar hasta 1200 °C.

Existen casos especiales, en el tiempo de mantenimiento de la temperatura puede superar los días y semanas. Esto ocurre por ejemplo en el tratamiento de relevado de esfuerzos en los que las piezas a tratar son componentes críticos cuya falla puede resultar catastrófica. También, los tiempos prolongados (pero de menor magnitud) pueden estar asociados al tratamiento de componentes masivos. En otros términos, esto se traduce en un consumo energético alto.

Si el tiempo de tratamiento depende de los aspectos tecnológicos asociados al horno, se debe abordar el tema de los tipos de hornos utilizados en la ingeniería de los tratamientos térmicos. En aspectos generales, una línea de producción de piezas tratadas térmicamente cuenta con dos módulos principales: el horno de calentamiento y el sistema de enfriamiento de piezas (baños de enfriamiento). Los hornos empleados en las operaciones de tratamiento térmico son de diferentes formas y tamaños que van acorde a las dimensiones de las piezas tratadas y a su cantidad. Es posible clasificar los hornos de acuerdo con dos criterios principales: el tipo de fuente de calentamiento o el tipo de alimentación de las piezas.



Fuente: Gráfica de Trinks et. al [8].

Figura 5. Curva típica de temperatura frente a tiempo (o avance dentro del horno) para el tratamiento de acero en un horno continuo de recalentamiento.

Para obtener la energía térmica necesaria, se recurre a tres métodos diferentes: empleando energía eléctrica, quemando algún combustible o induciendo de forma directa el aumento de la temperatura con un campo magnético. En los hornos eléctricos, se hace pasar una corriente a través de un material con una elevada resistencia eléctrica ocasionando que este aumente su temperatura y se transfiera la energía liberada a través de la pared del horno y hacia las piezas por medio de radiación. En el caso de los hornos de combustible, se aprovecha la energía de la combustión de sustancias líquidas o gaseosas, principalmente gas natural; el combustible puede ser quemado de forma directa al interior de la cámara de calentamiento utilizando quemadores, o de forma indirecta al interior de un tubo especial que eleva su temperatura y transfiere el calor por radiación a las piezas. También, como se mencionó anteriormente, se utilizan fuentes u hornos de inducción para calentar el material; utilizando corriente alterna de alta frecuencia, se genera un campo magnético con una bobina que a su vez induce una corriente eléctrica en la pieza metálica a tratar ocasionando que se eleve su temperatura en proporción a la resistencia eléctrica del material. La temperatura alcanzada con el uso de una fuente de inducción depende principalmente de la corriente suministrada a la bobina y, por ende, de la potencia de la máquina; por otra parte, el calentamiento no suele ser homogéneo y la temperatura en las superficie de la pieza es mayor que en el interior lo que puede suponer una ventaja para endurecer un material de forma superficial pero también puede tratarse de una desventaja ante la aplicación de un tratamiento convencional; la profundidad con la que penetra el calentamiento dependerá directamente de la frecuencia utilizada para generar el campo magnético. Por lo que los hornos de inducción suelen ser utilizados para la aplicación de tratamientos térmicos superficiales o localizados, principalmente de temple. Profundizando, en la Tabla 1 se presentan algunas ventajas y desventajas propuestas por Berg [9] del uso de cada uno de estos tipos de hornos.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los tipos de hornos utilizados en las operaciones de tratamiento térmico de acuerdo con el tipo de fuente de calentamiento.

Tipo de horno	Ventajas	Desventajas
<b>Horno eléctrico</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia de calentamiento<sup>4</sup> de alrededor del 85%.</li> <li>• La eficiencia de transformación energía eléctrica- energía térmica, tiene un rendimiento muy elevado. La calidad de la energía es alta.</li> <li>• Distribución uniforme de temperatura. Las condiciones de calentamiento se pueden reproducir con facilidad.</li> <li>• Proceso limpio, puesto que no se liberan emisiones directas de efecto invernadero o contaminantes.</li> <li>• Es simple adaptar una atmósfera controlada en este tipo de horno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevados costos de instalación y operación.</li> <li>• Al iniciar la operación de uno de estos hornos se puede exceder el pico máximo de energía.</li> </ul>
<b>Horno de gas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los picos de energía son fáciles de manejar.</li> <li>• Los gases de efluente en el caso de los hornos con quemadores directos pueden ser utilizados para precalentar el aire de combustión. De esta forma es posible elevar la eficiencia energética del proceso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencias de calentamiento de entre el 50 y el 70%. Siendo los hornos con tubo de calentamiento los de mayor eficiencia.</li> <li>• Sólo es posible adaptar una atmósfera controlada en los hornos de tubo de calentamiento. Los hornos con quemadores directos pueden suministrar contaminantes.</li> <li>• Altos costos de mantenimiento</li> <li>• Se generan gases de efecto invernadero con la combustión.</li> </ul>
<b>Horno de inducción.</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite realizar tratamientos térmicos localizados o superficiales.</li> <li>• Es posible calentar una pieza hasta la temperatura de tratamiento en tiempos de órdenes de pocos minutos. Lo que supone un ahorro de energía frente a los hornos eléctricos.</li> <li>• Al no requerir de aislamiento, no se pierde energía en calentar al aislante al iniciar la operación del horno, como en el caso de los hornos de gas y eléctricos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Debido a la elevada rapidez de enfriamiento, no se llevan a cabo adecuadamente las transformaciones de fase, esto implica que se deba trabajar con temperaturas más elevadas a las comunes para cada tratamiento.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia con información Berg [9].

En concordancia con la tabla anterior, Jayaraman[10] establece que para la misma cantidad de calor a suministrar a una pieza, un horno de gas suele requerir una mayor cantidad de energía que un horno eléctrico debido a las pérdidas de calor asociadas a los gases de efluente resultantes de la combustión.

Por otra parte, los hornos se pueden clasificar también de acuerdo con el tipo de alimentación de piezas que utilizan. En los hornos tipo batch, las piezas ingresan, la

<sup>4</sup> Se define la eficiencia de calentamiento para estos hornos como la relación entre el calor en las piezas y el calor en el horno.

compuerta se cierra durante el tiempo de tratamiento y por ella se retiran las piezas una vez terminado el tratamiento. También, en algunos hornos, la cámara de calentamiento se levanta y cierra para permitir el ingreso y salida de las piezas. Este tipo de hornos son utilizados con piezas poco masivas, de geometría compleja para poder ser tratadas de forma continua o con lotes de bajo número de piezas. Por otra parte, en los hornos continuos (como el analizado en la Figura 5) las piezas se encuentran en movimiento durante el calentamiento, desde la compuerta de ingreso hasta la de salida; suelen ser acoplados a procesos continuos de la industria metalmeccánica en los que las piezas son sometidas a otra operación inmediatamente después de ser tratadas (como en el caso de los procesos de conformado mecánico). Los hornos continuos son ideales para el procesamiento de piezas largas o de lotes con una gran cantidad de piezas, sin embargo, se debe tener cuidado con que el tiempo que pase la pieza en el recorrido sea el suficiente para que la pieza sea tratada correctamente, por lo que suelen destinarse al recalentamiento de pieza para el conformado en caliente.

En resumen, los tratamientos térmicos del acero implican un consumo energético que garantice temperaturas de operación que oscilen como mínimo los 200 °C y como máximo aproximado los 1000 °C. Este puede suministrarse vía eléctrica por medio de hornos de resistencia, de inducción, o bien por medio de la quema directa de gas natural. Existen variantes a lo mostrado para este módulo de operaciones, por ejemplo, algunos tratamientos requieren de una atmósfera controlada que reaccione químicamente (o no) con la superficie del material, otros de medios de enfriamiento a temperaturas específicas, entre otras. Sin embargo, lo descrito hasta el momento podría considerarse como los aspectos generales de los tratamientos térmicos de los aceros.

En el caso de los hierros, aleaciones de hierro con carbono en contenidos que superan el 2.11%, los tratamientos térmicos son distintos pero las temperaturas de operación están incluidas dentro del rango de trabajo de los aceros.

## ***2.2. Módulo de deformación plástica (conformado mecánico).***

Esta categoría engloba a los procesos de manufactura que tienen como objetivo la fabricación de productos terminados o semiterminados partiendo de materia prima sólida y modificando su forma mediante la aplicación de esfuerzos utilizando una herramienta conocida como dado. De acuerdo con Vázquez [5] existen varios criterios para clasificar los procesos de conformado mecánico, los más utilizados son: con base a la temperatura de operación o al tamaño de la materia prima.

Conforme a la temperatura, clasificación que puede resultar de interés en términos de consumo energético, los procesos de conformado se dividen en dos grupos principales: procesos de conformado en caliente y de conformado en frío. La temperatura de operación del deformado en caliente se puede fijar a partir de la temperatura de fusión del material o de su temperatura de recristalización<sup>5</sup>. Si se utiliza el primer método de selección, por lo

---

<sup>5</sup> Temperatura a la cual los efectos de la deformación en la estructura del material han sido eliminados por un tratamiento térmico de recocido de recristalización.

general, la temperatura seleccionada se encontrará entre el rango definido entre el 60 % y el 90% de la temperatura de fusión, en el segundo caso se debe determinar la temperatura de recristalización, lo que representa un problema debido a que esta varía con el grado de deformación del material. Algunos autores refieren que esta temperatura es igual o mayor a las temperaturas que se encuentran en un rango de entre 40% y 50% de la temperatura de fusión, criterio que suele ser utilizado con frecuencia. En general, para los aceros al carbono, la temperatura de conformado en caliente varía entre los 1200 y 1300 °C [5] En contraste, el deformado en frío se realiza a temperatura ambiente o a temperaturas bajas con respecto a la temperatura de recristalización del material, por ejemplo, en los aceros de bajo carbono se considera conformado en frío a la deformación realizada a 200 °C o menos. El utilizar temperaturas de operación de baja magnitud tiene consecuencias sobre el material: el metal se endurece y su resistencia mecánica aumenta por lo que será necesario aplicar esfuerzos mayores con respecto al deformado en caliente, lo que implica mayor consumo energético por la maquinaria que lleva a cabo el trabajo. Es una práctica común que el material, antes de ser deformado en frío se deforme en caliente, incorporando al producto los beneficios de ambos tipos de procesos; en la Tabla 2 se resumen algunas las ventajas y desventajas del uso de cada uno de estos tipos conformado.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del conformado en caliente y en frío.

<b>Conformado mecánico en caliente</b>	<b>Conformado mecánico en frío</b>
<b>Ventajas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ La energía consumida en el proceso disminuye con la temperatura de operación.</li> <li>▪ Se reduce el desgaste la herramienta al aumentar el flujo de material.</li> <li>▪ Se reduce la posibilidad de agrietamiento del metal deformado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ofrece mayor precisión dimensional y mejor acabado superficial.</li> <li>▪ Se eleva la resistencia mecánica de los materiales, lo que puede ser útil en ciertas aplicaciones.</li> </ul>
<b>Desventajas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Con el aumento de la temperatura, el metal tiende a oxidarse superficialmente; si la capa de óxido no es retirada antes de la aplicación del esfuerzo se verá afectado el acabado superficial del producto.</li> <li>▪ Se debe considerar tolerancias de diseño de productos más amplias debido a la oxidación, dilatación y contracción del material durante el proceso.</li> <li>▪ El dado o matriz debe ser calentado previo a realizar la deformación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El consumo energético de la maquinaria es mayor debido al aumento de la resistencia mecánica del material con la deformación.</li> <li>▪ Si se desea disminuir la resistencia mecánica del material posterior al deformado, se debe aplicar un tratamiento térmico posterior para aquellos materiales que recristalizan a temperaturas mayores al ambiente.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia con información de Vázquez [5].

En cuanto al tamaño de la materia prima, los procesos de conformado mecánico son clasificados en procesos de deformación primaria o masiva, y procesos de deformación secundaria. En la primera categoría los procesos utilizan materia prima en forma de lingotes o de tochos<sup>6</sup>, lo que implica deformaciones elevadas realizadas por lo usual en caliente,

<sup>6</sup> Nombre otorgado en el medio de la metalurgia para piezas de sección transversal cuadrada o circular de diversas dimensiones.

llevadas a cabo por maquinaria robusta y rígida. Mientras que los procesos de deformación secundaria utilizan lámina como materia prima, son realizados por lo usual en frío para asegurar un buen acabado superficial y una buena tolerancia dimensional. Dentro de los procesos de deformación masiva está la forja, la extrusión, la laminación entre otros, y en el caso del conformado secundario encontramos operaciones como el doblado y el embutido de placa.

Existe una gran variedad de procesos de conformado mecánico. En esta investigación nos enfocaremos sólo en algunos de los principales: forja, laminación, trefilado y extrusión (conformado masivo) y embutido (conformado secundario). La información presentada a continuación para cada uno de estos procesos, toma como base principal lo presentado por Vázquez et al.[5]

La forja es un proceso de conformado mecánico que tiene como objetivo el cambio de geometría de una pieza metálica mediante la aplicación de impactos o esfuerzos cíclicos.

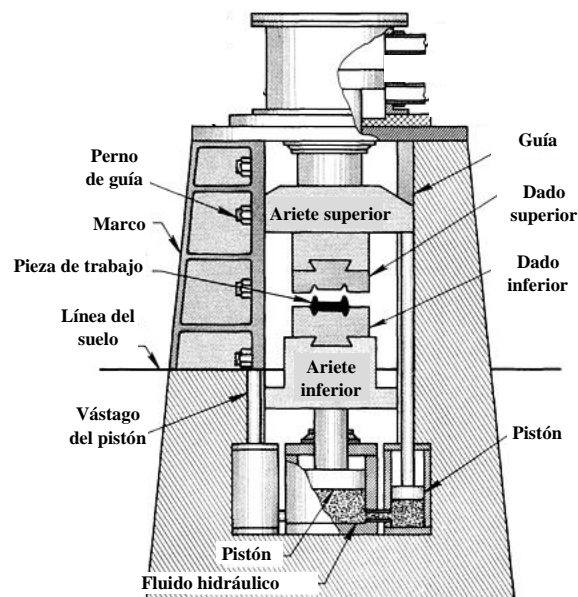
Las maquinas utilizadas en los procesos de forja, como la mostrada en la Figura 6, son básicamente martillos o prensas accionados por gravedad, hidráulica o neumáticamente. Las máquinas pueden ser de energía, carrera o fuerza restringidas, dependiendo del mecanismo con el que cuenten. En general, una máquina de forja es elegida con base en las siguientes características generales:

- La fuerza y energía que puedan suministrar. Estas deben ser superior a las necesarias para realizar la deformación de interés.
- La cantidad de golpes por minuto que es capaz de realizar la máquina, así como la velocidad con la que se desplace el martillo. Ambas especificaciones determinarán tanto el grado de productividad (cuántas piezas se pueden realizar por unidad de tiempo) como el desgaste de la herramienta.
- La precisión dimensional en el producto fabricado.

En el caso de los martillos, existen aquellos que funcionan por caída libre en los que la energía suministrada al material para lograr la deformación debe ser la misma que la energía cinética del martillo que se deja caer sobre la pieza. También existen martillos de potencia en los que la energía empleada para la deformación es resultado de la suma de energía cinética y la energía suministrada por un pistón accionado por aire, vapor o algún fluido hidráulico. El martillo de potencia permite producir piezas de mayor precisión dimensional y con eficiencias energéticas más elevadas que las reportadas para un martillo de caída libre, con valores entre los rangos de 0.75 a 0.85 y de 0.4 a 0.6 respectivamente. Sin embargo, la eficiencia de un martillo de potencia disminuye cuando se realizan pasos de acabado final que requieren fuerzas mucho menores a las empleadas para deformar masivamente, cayendo hasta un valor de 0.2 de eficiencia debido a la gran pérdida de energía durante el impacto en otras partes de la máquina (yunque y cimientos), es decir que entre menor sea el grado de deformación a lograr, menor será la energía aprovechada. Otros tipos de martillos empleados en la industria metalmecánica son los de contra golpe, en los que el material se somete al impacto de dos dados que se aproximan simultáneamente; arreglo que

aprovecha de mejor forma la energía mecánica suministrada a la pieza, logrando eficiencias de entre 0.85 y 0.9.

Como se mencionó anteriormente, además de martillos, se utilizan prensas para realizar la deformación por forja. Existen prensas de tornillo, mecánicas e hidráulica. Las primeras, utilizan fricción, un motor eléctrico o un pistón hidráulico para acelerar un volante que transfiere el movimiento a un tornillo que será el que aplique la fuerza sobre el material. En el caso de las prensas mecánicas, el ariete emplea la energía de un volante movido por un motor eléctrico que le otorga una velocidad que varía entre los 30 y los 100 impactos por minuto, además de ser una tecnología que permite trabajar piezas con bajas tolerancias dimensionales, pero únicamente para piezas finales. Por otra parte, el ariete en las prensas hidráulicas emplea pistones y cilindros hidráulicos que permiten mayor control en las velocidades de compresión.



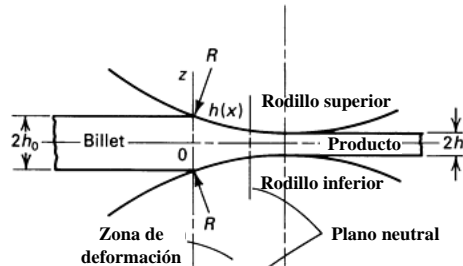
Fuente: Diagrama de Nunes et. al [11].

Figura 6. Ejemplo de máquina empleada en la forja de componentes metálicos (martillo de contragolpe).

Continuando con los procesos englobados en este módulo: La laminación (Figura 7) es el proceso de conformado mecánico en el que el material es deformado al hacerlo pasar entre rodillos que ejercen esfuerzos de compresión. También, los esfuerzos de corte generados por la fricción entre el material y los rodillos son importantes para que se puede llevar a cabo la deformación continua. Existe una gran variedad de productos que se obtienen vía proceso como son: láminas, barras, varillas, perfiles, entre otros.

Los principales componentes de un laminador (también llamado castillo) son: los rodillos, los rodamientos (chumaceras o baleros) en lo que son colocados los rodillos de trabajo, los mecanismos de ajuste para la apertura de los rodillos, la carcasa que contiene todos los elementos, y la fuente de potencia que suministra la energía a los rodillos para iniciar su funcionamiento. Los laminadores se pueden clasificar de acuerdo con la cantidad

de rodillos que utiliza, el sentido de su giro y su disposición: por ejemplo, los castillos compuestos por dos rodillos que giran en sentidos opuestos se dice que tienen un arreglo dúo, hay castillos de arreglo dúo reversible (es posible cambiar el sentido del giro de los rodillos), de disposición trío (con tres rodillos con una disposición que permiten realizar dos pasos de deformación con el mismo castillo) entre otras distribuciones posibles.



Fuente: Diagrama de Nunes et. al [11].

Figura 7. Representación esquemática del proceso de laminación.

Por lo usual, la reducción del espesor de la materia prima se realiza de forma gradual, lo que se traduce en la instalación de una serie de castillos conectados en línea con aperturas de trabajo que se reducen gradualmente hasta el espesor buscado; a este arreglo se le conoce como tren de laminación.

Debido a que las fuerzas necesarias para laminar son elevadas, se necesitan motores capaces de suministrar una alta potencia. La cantidad de energía suministrada a la maquinaria por minuto debe ser la suficiente para vencer la resistencia del material a deformar y la fuerza de fricción generada en los rodamientos, además se debe considerar las pérdidas en los reductores de velocidad y en los elementos de transmisión, así como las pérdidas asociadas a la eficiencia de los motores eléctricos. Se suele establecer que el porcentaje más alto del consumo energético de los laminadores se encuentra asociado a vencer la resistencia a la deformación del material y la fricción entre los rodillos y el material. El resto de la energía es consumida por la fricción de los cojinetes y que, el uso de baleros puede reducir significativamente. Cuando se laminan productos de bajo espesor como cintas, se utilizan bobinas de enrollado o alimentación que aplican un esfuerzo de tensión adicional sobre el material, la potencia necesaria para que los rodillos trabajen se ve afectada: en el caso de una bobina de enrollado, la potencia aplicada a los rodillos decae en proporción de la potencia de enrollado, por el contrario, cuando se utiliza una bobina de alimentación, el laminador consumirá más potencia que la básica requerida.

Cabe destacar que la laminación es un proceso que se realiza tanto en frío como en caliente, lo que agregaría la demanda de energía térmica al procedimiento cuando se recurre al segundo método. La SEMARNAT por ejemplo, reporta en la *Guía para la elaboración de la cédula de operación anual para la Industria Metalúrgica* [12] un consumo energético específico para el laminado en caliente de entre 72 y 140 kWh/ton de acero, además de un consumo adicional asociado al recalentamiento y el tratamiento térmico de entre 1.1 y 2.2 GJ/ton de material procesado. Por otra parte, reporta un consumo energético para la laminación en frío incluyendo los procesos de preparación de la materia prima y de acabado



final, en la Tabla 3 se presenta el desglose de este consumo. En cuestión de consumo eléctrico, el proceso de laminación en trenes reversibles es aquel que requiere la mayor cantidad de energía mientras que, en términos de consumo térmico, es de esperarse que el tratamiento térmico de recristalización (en específico en horno continuo) sea el proceso gobernante. Por otra parte, la SEMARNAT no especifica por qué se realiza la separación entre consumo eléctrico y térmico para el tratamiento térmico, pero se podría asumir que la energía eléctrica está destinada a la operación del horno y no como fuente de calentamiento como sería el caso de un horno de gas.

Tabla 3. Desglose del consumo energético en la cadena productiva completa del conformado en frío.

Operación	Consumo energético	
	GJ/ton acero procesado	
Decapado (limpieza)	Eléctrico	0.015 – 0.08
	Térmico	0.015 – 0.086
	Vapor	0.03 – 0.07
Laminación tandem	Eléctrico	0.02 – 0.36
	Térmico	0.001-0.036
Laminación en trenes reversibles <sup>7</sup>	Eléctrico	240 – 245
	Térmico	0.023 – 0.024
Recocido de recristalización por lotes	Eléctrico	0.6 – 0.12
	Térmico	0.62 – 0.75
Recocido de recristalización continuo	Eléctrico	0.173 – 0.239
	Térmico	0.775 – 1.483
	Vapor	0.119
Acabado final	Eléctrico	0.02 – 0.04

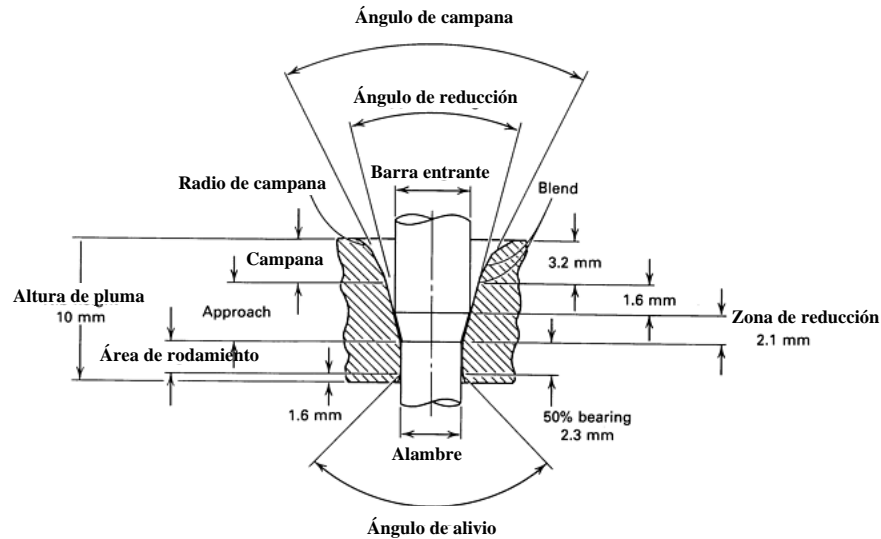
Fuente: Elaboración propia con información de SEMARNAT [12].

Otro proceso de deformación masiva es el trefilado (Figura 8): proceso de deformación plástica utilizado para la fabricación de alambre. Consiste en la reducción del diámetro de la materia prima haciéndola pasar a través de un dado (o matriz) empleando un esfuerzo de tracción. El material se deforma conservando su volumen, lo que implica que el material se alarga además de reducirse su sección transversal.

Las máquinas empleadas en el trefilado suelen aplicar esfuerzos menores que las empleadas en los procesos de conformado anteriormente descritos. Estas se componen de una bobina de alimentación que suministra el alambre al proceso, una caja de lubricación que impregna el lubricante al alambre previo a la deformación plástica en el dado, el portadados con el dado (que puede estar siendo enfriado con agua o algún otro fluido) y, por último, el cabestrante o bloque que será el elemento que aplique el esfuerzo de tracción sobre el alambre, esfuerzo que es generado por la transmisión de movimiento de un motor a través de una flecha vertical. Las máquinas pueden tener uno o varios cabestrantes, uno por cada paso de deformación o dado que se desee emplear; es así como se construye una especie de "tren de trefilado" similar al empleado en el proceso de laminación, con el mismo objetivo de realizar una deformación gradual hasta que se adquieran las dimensiones deseadas. En este caso, cada cabestrante posee un motor propio y su movimiento se encuentra sincronizado para que se lleve a cabo una deformación gradual continua lo que implica que los cabestrantes

<sup>7</sup> Consumo reportado para el conformado de aceros de baja aleación.

se muevan cada vez más rápido conforme el alambre es estirado cada vez más. La potencia consumida por esta maquinaria estará dada por el producto del esfuerzo de trefilado, del área de la sección transversal y de la velocidad del cabestrante o de deformación; la determinación del esfuerzo de trefilado no resulta trivial y existen algunos métodos de modelado físico para conocer su valor.



Fuente: Diagrama de Nunes et. al [11].

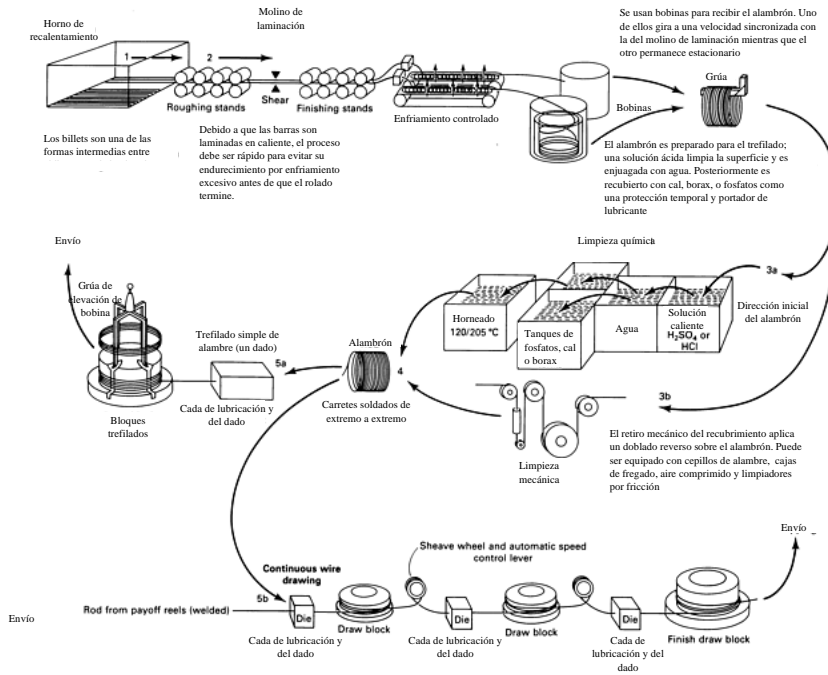
Figura 8. Esquema de sección transversal del proceso de trefilado<sup>8</sup>.

Además del proceso de deformación, el trefilado suele estar acompañado de operaciones de preparación de la materia prima como se observa en la Figura 9. Algunas podrían implicar consumos adicionales de energía como son del desbaste mecánico (energía eléctrica) y el tratamiento térmico previo de horneado (energía térmica).

En el proceso de extrusión (Figura 10), un tocho o lingote de metal confinado en una cámara, es forzado a fluir a través de un dado por medio de la aplicación de esfuerzos compresivos, de forma similar a el flujo de un fluido en una jeringa. Empleando esta operación de conformado mecánico se fabrican productos como tubos, barras, entre otros. Este proceso ha adquirido gran importancia, sobre todo para deformar materiales que no pueden ser procesados mediante laminación debido a sus propiedades mecánicas o a su estructura.

Existen tres tipos principales de extrusión, clasificados de acuerdo con la dirección de flujo del material. En la extrusión directa, el producto fluye al exterior de la caja en dirección contraria al ariete que aplica la compresión al material, en la extrusión indirecta el producto fluye a través del ariete que aplica la compresión y, por último, en la extrusión lateral el material fluye a través de una apertura que se encuentra entre el ariete y la pared de la cámara y es ideal para fabricar productos huecos. Por otra parte, los procesos de extrusión se llevan a cabo tanto en caliente como en frío.

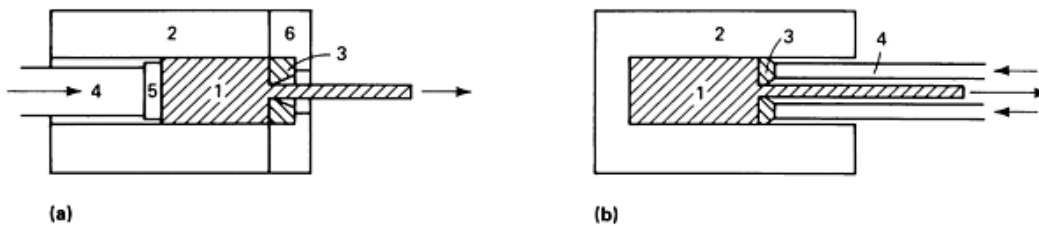
<sup>8</sup> Se muestra el dado en relieve y el material a deformar en blanco.



Fuente: Diagrama de Nunes et. al [11].

Figura 9. Esquema que muestra el conjunto de operaciones de limpieza, preparación y deformación involucradas en el trefilado de alambre.

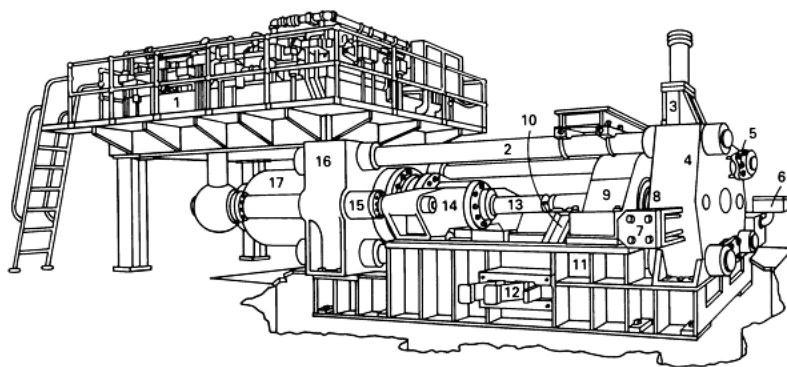
Las máquinas de extrusión son prensas de distintos tipos que pueden aplicar el esfuerzo de forma horizontal o vertical. Por lo usual, las prensas horizontales son más utilizadas debido a la facilidad con la que se pueden integrar a las líneas de producción, como es el caso de la mostrada como ejemplo en la Figura 11.



Fuente: Diagrama de Nunes et. al [11].

Figura 10. Sección transversal de los procesos de extrusión básicos: Extrusión (a)directa e (b)indirecta.<sup>9</sup>

<sup>9</sup> El material en deformación se muestra en relieve.



Fuente: Diagrama de Nunes et. al [11].

Figura 11. Ejemplo de máquina de extrusión.

Cada uno de los procesos masivos de conformado descritos en los párrafos anteriores tienen variables propias de interés a considerar para caracterizar el consumo energético. De entre ellas, el tipo de material es transversal a todas las operaciones. Es por lo que algunas bases de datos existentes suelen atribuir consumo energético por combinación proceso-material. Por ejemplo, en la Tabla 4 se compara el consumo energético en los procesos de extrusión, forja y trefilado para tres tipos de materiales de base diferentes, obtenidos mediante el uso del programa de computadora CES EduPack (2018). Los valores reportados por el software involucran a la energía necesaria para el proceso, la energía necesaria para hacer funcionar la sede industrial (compresores, ventiladores, etc.) y la energía asociada a la generación y suministro de energía para para la planta industrial. La energía del proceso incluye: la energía para elevar la temperatura del material a la temperatura de trabajo, la energía necesaria para calentar y mantener el equipo a la temperatura de trabajo, y la relacionada con la deformación a la temperatura de trabajo. Además, los valores son estimaciones y representan el procesamiento de volúmenes grandes de material.

Tabla 4. Energía específica consumida por distintos materiales metálicos en distintos procesos de conformado mecánico

<i>Material metálico</i>	<i>Consumo energético por proceso</i>		
	<i>MJ/kg de material procesado</i>		
	Extrusión	Forja/Laminación	Trefilado
<b>Acero convencional de bajo carbono</b>	4.86 - 5.37	2.57 - 2.84	17.4 - 19.3
<b>Aleaciones de aluminio envejecibles</b>	10.2 - 11.3	5.24 - 5.79	37.4 - 41.3
<b>Latón</b>	2.92 - 3.23	1.6 - 1.77	10.2 - 11.2

Fuente: Elaboración propia con información del software CES EduPack (Versión 2018)[13].

Como se deduce de lo mostrado en la Tabla 4 y, en particular respecto al caso mostrado, las aleaciones de aluminio envejecibles<sup>10</sup> consumen una mayor cantidad de energía en los tres procesos, mientras que el acero de bajo carbono posee una huella energética intermedia entre los tres tipos de materiales mostrados. En principio, esta tendencia podría contradecir los principios metalúrgicos del conformado mecánico puesto que, los aceros

<sup>10</sup> Aleaciones que se suelen endurecer mediante una serie de tratamientos térmicos conocidos dentro del medio metalúrgico como, tratamientos de solubilización, temple y precipitación.

suelen tener menor conformabilidad<sup>11</sup> en comparación con aleaciones no ferrosas, pero esto podría ocurrir debido a que el aluminio suele utilizarse en componentes con dimensiones menores lo que implica modificaciones en los procesos como ampliar los trenes de laminación o trefilado, aumentar el número de impactos en forja entre otras medidas que impactan directamente en el consumo energético estimado.

Por otra parte, en la Tabla 3 se observa que en general el proceso de trefilado implica un mayor consumo energético por cantidad de material. Esto podría deberse a que en esta operación de conformado mecánico se suelen realizar una gran cantidad de pasos de deformación para alcanzar alambres cada vez más delgados lo que podría elevar el consumo de energía. Sin embargo, esto y lo establecido en el párrafo anterior, son hipótesis planteadas considerando aspectos generales de los procesos, sería necesario profundizar en el análisis energético de cada uno de ellos y esto se encuentra fuera del objetivo de esta investigación.

El estudio de los procesos secundarios de conformado mecánico es también importante. Como parte de la delimitación de este trabajo, se incluye uno de los procesos más utilizados: el embutido de metales.

El embutido es un proceso de conformado mecánico secundario que tiene como objetivo la fabricación de productos huecos o copas, a partir de la aplicación de un esfuerzo compresivo en una lámina, obligándola a fluir a través de una matriz con geometrías diversas. Mediante este proceso se fabrican productos como tanques o depósitos de alta presión, cajas, utensilios de cocina, entre otros. Un esquema de cómo se lleva a cabo este proceso y detalles sobre las deformaciones a las que el material es sometido, se muestran en la Figura 12.

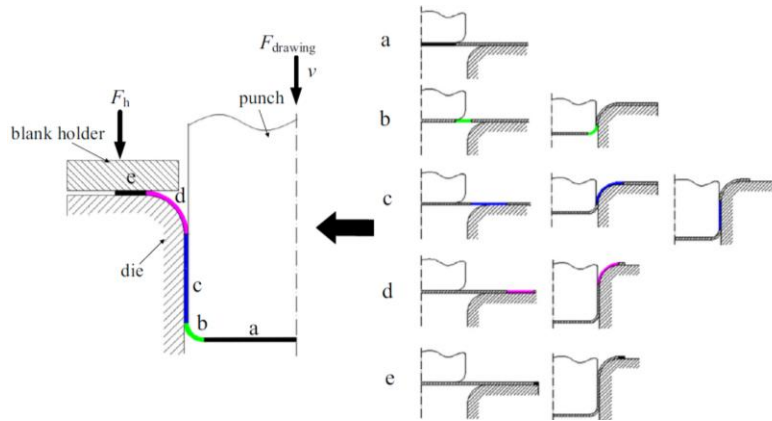
Al igual que en el caso de las máquinas para forja y extrusión, las máquinas empleadas en el embutido de metales tienen como elemento principal una prensa que suele ser vertical. Se podría decir, a muy grandes rasgos, que el embutido es una variante de la forja de productos masivos, pero utilizando láminas como materia prima. Esto último implica que las fuerzas necesarias para llevar a cabo la deformación son menores a las requeridas en una forja convencional de piezas masivas. Sin embargo, los esfuerzos son aplicados por maquinarias similares, lo que se traduce en que se consumen potencias similares, pero para generar deformaciones menos severas; impactando en la eficiencia energética del proceso que, para el embutido, pueden encontrarse incluso por debajo del 10% como lo mencionan Gao et. al [14].

Además del embutido convencional, existen procesos alternos de manufactura desarrollados por industrias como la automotriz cuyo objetivo final es el deformado de placa metálica para obtener componentes huecos variados. El consumo eléctrico de algunos de estas operaciones es examinado por Cooper et al. [15], quienes centran su investigación de estudio en 5 procesos: el embutido hidráulico, estiramiento de placa, deformado con celda fluida, deformado superplástico y conformado incremental de placa. En general, se encontró que el embutido convencional consume la menor cantidad de energía eléctrica con una eficiencia baja del 11% (similar a lo ya mencionado) mientras que la deformación

---

<sup>11</sup> Propiedad tecnológica asociada a la facilidad de deformar un material sin que este fracture.

incremental de placa presenta una eficiencia del 72% pero con un consumo más elevado. Algunos de los valores reportados por este estudio para el consumo de energía de prensas hidráulica para el embutido no superan los 2 kWh por carrera del punzón. La energía eléctrica consumida entonces, depende en mayor medida del número de carreras realizadas por el punzón que de la cantidad de material procesado



Fuente: Gao et. al [14].

Figura 12. Proceso de embutido y esquema de deformaciones ocurridas en la placa deformada.

Caracterizar el consumo de energía de los procesos de embutido requiere del uso de diversos modelos físicos que caractericen la deformación a lo largo de todo el proceso. El equipo de Gao et. al. [16] ha establecido que el consumo energético de este proceso es la suma de la contribución de tres componentes: el trabajo asociado a la tensión y compresión sometidas en el material, el trabajo de doblado y las pérdidas por fricción; por medio de actividad experimental, se logró establecer que la mayor contribución al consumo energético corresponde al trabajo de deformación plástica de tensión-compresión, seguido de las pérdidas por fricción, es decir que la mayor parte de la energía se consume propiamente en la deformación del material.

De acuerdo con Gao et al. [16] y complementando todo lo descrito para este módulo, los procesos metalmeccánicos prestan un área de oportunidad importante para la implementación de medidas de eficiencia energética debido a que su alto consumo de energía se debe principalmente, a las bajas eficiencias de proceso de estas operaciones. En su investigación, enfocada en el estudio energético de prensas hidráulicas, plantea que una de las principales soluciones posibles a este problema es la disposición en el mercado de maquinaria más eficiente puesto que en la ya existente es complicado aplicar medidas de mejora en materia energética. Para ello, se torna necesario la creación de modelos cada vez más precisos del comportamiento de la energía en los procesos de deformado.

Entonces, el consumo de energía de los procesos de conformado mecánico se encuentra asociado a la deformación plástica de la materia prima (y todas las variables implicadas en ello que cambian para cada proceso) y a las perdidas por fricción tanto en la deformación con los dados como los componentes mecánicos de la maquinaria. En caso de

que el material sea trabajado en caliente, se deberá considerar en el consumo energético el asociado a elevar la temperatura del material.

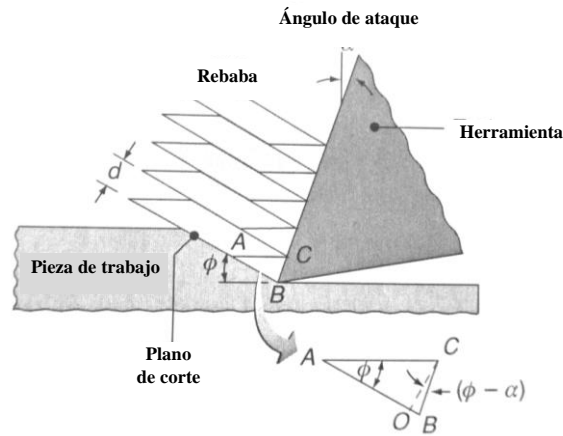
En una siderúrgica integrada, Gupta [1] establece que alrededor del 16% de la energía total es empleada en operaciones de conformado mecánico: 11% en laminación en caliente y 5% durante la laminación en frío. Un aspecto adicional quizá interesante para considerar es que sólo el 52% de la energía que ingresa a una planta de este tipo es aprovechada, el resto se pierde seguramente de forma principalmente térmica en los procesos de tratamientos térmicos, conformado, y por sobre todo en la fabricación del acero como marcan Gupta y otros autores como Zhao et al.[17] quien asegura que los efluentes gaseosos del alto horno pueden consumir hasta el 30% de la energía total de producción, efecto que se puede trasladar a los efluentes de los procesos térmicos metalmecánicos.

### ***2.3. Módulo de corte y acabado final de piezas metálicas***

Algunos procesos que dan forma a los materiales causan un pobre acabado superficial que debe ser corregido. Para ello, se recurre a procedimientos que remueven material superficial de las piezas para mejorar el acabado o, inclusive, otorgarle la forma final. Estos procesos pueden agruparse en tres categorías: existen las operaciones de corte que generan viruta al aplicar un esfuerzo en uno o varios puntos, los procesos de abrasión que utilizan partículas de materiales duros para arrancar el material, y los procesos avanzados de maquinado que involucran procesos eléctricos, químicos, térmicos, entre otros. En esta sección serán explorados tomando como eje central la información proporcionada por Kalpakjian et al. [18].

Los procesos de corte son importantes para el buen funcionamiento de la industria metalmecánica puesto que permiten, además de mejorar el acabado superficial, lograr geometrías que no son posibles de obtener mediante operaciones de conformado mecánico o de fundición y con una elevada exactitud dimensional. Sin embargo, presentan desventajas tales como el gran desperdicio de material, el gran consumo de recursos (capital, energía y tiempo) en comparación con las operaciones de conformado mecánico y, en caso de no tomarse las medidas adecuadas, es posible afectar la integridad de la superficie de la pieza. Las operaciones de corte por arranque de viruta más comunes son el fresado, el torneado y el taladrado.

De acuerdo con Bakshy et al. [19] uno de los casos más simple de modelar y determinar la cantidad de energía necesaria para llevarlo a cabo es el maquinado ortogonal de un material (Figura 13).



Fuente: Bakshi et. al [19].

Figura 13. Maquinado ortogonal idealizado

Mediante diversas consideraciones asociadas a las propiedades mecánicas del material, es posible aproximar el valor del trabajo mínimo requerido para llevar a cabo el corte a un valor aproximado a  $\frac{3}{2}\sigma_{fluencia}^{12}$ . Esta suposición es limitada ya que, además de la energía asociada a la deformación, también hay energía consumida por las máquinas debido a la fricción entre la herramienta y el material (similar a lo establecido para los procesos de conformado) lo que hace que el trabajo mínimo total aumente con respecto al calculado considerando sólo las propiedades mecánicas del material. El trabajo asociado a la operación de corte es proporcionado por el motor de la máquina y es conocido como energía específica de corte. Algunos de los rangos entre los que se encuentran los valores típicos para diferentes materiales metálicos se reportan en la Tabla 5; las aleaciones base hierro son, por lo general, los materiales que consumen la mayor cantidad de energía al ser maquinados. La cantidad total de recursos energéticos consumidos dependerá entonces del tipo de material, de la cantidad procesada y del esfuerzo máximo aplicado para alcanzar la forma requerida.

Tabla 5. Energías específicas de corte para diferentes materiales metálicos.

Material	Energía específica de corte
	kJ/kg de material cortado
Aleaciones de aluminio	140 - 360
Hierros	140 - 690
Aleaciones de cobre	160 - 360
Aceros inoxidables	260 - 625
Acero	260 - 1150

Fuente: Tabla de Bakshi et al. [19].

<sup>12</sup> La resistencia a la fluencia es el valor de esfuerzo que se debe superar para deformar permanentemente un material.



En la Tabla 6 se reportan órdenes de magnitud de los valores de uso de exergía para llevar a cabo la deformación elástica<sup>13</sup>, y la deformación elástica-plástica hasta la fractura de diferentes materiales metálicos. La mayoría del uso exergético de los procesos de corte y deformación es disipado en forma de calor, es decir, existen pérdidas de energía por la conversión a energía térmica.

Tabla 6. Uso de la exergía para la deformación elástica y plástica de materiales metálicos.

Material	Uso de exergía específico en régimen elástico	Uso de exergía específico al deformar hasta la fractura
	kJ/kg	kJ/kg
Aleaciones de cobre	$10^{-3} - 10^{-1}$	$10^1 - 10^2$
Aleaciones de aluminio	$10^{-3} - 10^0$	$10^1 - 10^2$
Aceros	$10^{-2} - 10^0$	$10^{-1} - 10^1$

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos reportados por Bakshi et al. [19].

Otra aproximación que se puede obtener de la energía asociada a los procesos de maquinado son los valores reportados por el software CES Edupack para la energía específica de corte. A simple vista, estos valores discrepan en órdenes de magnitud con respecto a los valores reportados en la Tabla 5. Una posible hipótesis de este comportamiento es que los valores del software suelen tomar como base estudios del ciclo de vida de los materiales, lo que implicaría la consideración de otros parámetros asociados al proceso y no únicamente las propiedades mecánicas; limitante del modelo en el que se basan los valores previamente reportados. En los valores de la Tabla 7, podemos notar que las aleaciones base aluminio y los aceros convencionales de bajo contenido de carbono son de los materiales enlistados con mayor consumo energético en los procesos de maquinado. Además, el orden de magnitud es similar a los valores reportados para los procesos de conformado; si bien esto podría indicar que ambos tipos de operaciones consumen la misma cantidad de energía se debe recordar que estos valores se encuentran definidos en términos de la masa procesada y en los procesos de corte la masa retirada es mucho menor a la cantidad de material que se deforma en una operación de conformado.

Si bien, las propiedades mecánicas del material influyen directamente sobre el valor de la energía específica de corte, esta puede variar con las condiciones de operación. Las investigaciones recientes establecen que entre el 6% y el 40% del consumo puede cambiarse con el ajuste de los parámetros de corte [20], en específico con la velocidad.

Además de la energía asociada al corte del material, la energía total consumida en una operación de maquinado también incluye el consumo asociado al mantenimiento de la maquinaria y al cambio de las condiciones de operación. Esta última, representa alrededor del 30 % del consumo total. Ambos tipos de carga son de tipo eléctrico.

<sup>13</sup> Cabe destacar que la deformación elástica es un fenómeno reversible, por lo que su consumo energético también lo es.

Bajo este contexto, la EIA menciona que el 20% de la energía destinada al sector manufacturero es consumida por las operaciones de maquinado; en específico, el torneado es la operación más utilizada[20].

Tabla 7. Energía específica consumida por distintos materiales metálicos en procesos de maquinado.

Material	Energía específica de maquinado
	MJ/kg de material cortado
<b>Aleaciones de aluminio para fundición</b>	4.31 – 4.76
<b>Acero ordinario de bajo contenido de C</b>	3.9 – 4.32
<b>Latón</b>	2.45 – 2.71
<b>Cobre</b>	3.25 - 3.59

Fuente: Elaboración propia con información de del software software CES EduPack (Versión 2018)[13].

Otro conjunto de operaciones contenidas en este módulo son las relacionadas con el corte de piezas metálicas a partir de láminas. De forma general, es posible agrupar estas técnicas en corte mecánico (algunas de estas pueden incluirse en las operaciones de conformado mecánico) o corte empleando haces de alta energía.

En el corte mecánico se encuentran las técnicas como el corte con sierra cinta o con discos abrasivos. También, se considera dentro de esta categoría al troquelado: operación que consiste en el corte de lámina en formas diversas mediante la aplicación de un esfuerzo cortante paralelo al espesor de la placa, esfuerzo que se aplica con un punzón sobre la placa y el material es cortado por el dado que se encuentra por debajo de él. Entre los parámetros más importantes de operación a controlar están la fuerza de punzón, la velocidad de punzonado, las dimensiones del punzón y de la matriz y el tipo de lubricación. Para cuantificar la cantidad de energía que consumirá una máquina de troquelado, el modelado físico no es tan complicado, basta con determinar la fuerza de corte necesaria para producir la figura a cortar y el avance del punzón dado por el espesor de la lámina. La cantidad de energía utilizada para cortar en este proceso es inferior a la empleada en embutido, considerando que los equipos empleados son similares se puede deducir que la eficiencia energética de este proceso es aún menor. Existen otras distribuciones de punzón y dado, sin embargo, se tiene el mismo principio de funcionamiento.

Por otra parte, dentro del corte de tipo abrasivo, se encuentra el corte con agua o maquinado hidrodinámico. En éste se aprovecha la fuerza proveniente de un chorro de agua a alta velocidad, obtenido por medio de una presión en el fluido de alrededor de los 400 MPa y un diámetro de boquilla de entre 0.05 y 1 mm. Algunas de las ventajas de usar este proceso son que no se genera calor en la pieza (lo que podría generar efectos secundarios sobre las propiedades del material) como en otros métodos de corte y es amigable con el medio ambiente. Una variante de la técnica consiste en colocar partículas abrasivas en el chorro de agua que incrementen la tasa de remoción del material. En este segundo caso, se puede cambiar el fluido por un gas como el aire seco: la mezcla de gas con partículas se impacta sobre el material para realizar el mecanizado, sin embargo, sólo se logra un efecto superficial y no se corta la lámina.

Además del corte mecánico y abrasivo, existen otras técnicas como el uso de haces de alta energía. De entre estas operaciones se encuentran las siguientes:

- Mediante el uso de un láser, se concentra energía en un punto de la superficie de la placa para derretir y evaporar al material de forma controlada para cortar la forma deseada. Algunos de las tecnologías de láser más utilizadas en esta técnica son los láseres pulsados o de onda continua de CO<sub>2</sub>, láseres de rubí, entre otras. Las propiedades más importantes para considerar del material a cortar son la reflectividad, la conductividad térmica y el calor de fusión y evaporación; el proceso es más eficiente cuando estas propiedades son mínimas. La profundidad de corte es proporcional a la potencia del láser e inversamente proporcional al diámetro del haz y la velocidad del corte. Además del corte de piezas, también es posible realizar taladrado al modificar los parámetros que dan profundidad al corte. Por su buena exactitud de corte, gran reproducibilidad y por su flexibilidad para ser automatizado por medio de sistemas a control por computadora, el corte láser se está volviendo una de las tecnologías más utilizadas a pesar de que los costos de instalación y equipamiento son más elevados que en otras técnicas.
- Mediante haz de plasma. Un haz de partículas de gas ionizado impacta sobre la superficie de la lámina, elevando su temperatura y teniendo un efecto similar al corte con láser, pero con una mayor capacidad de remoción de material.

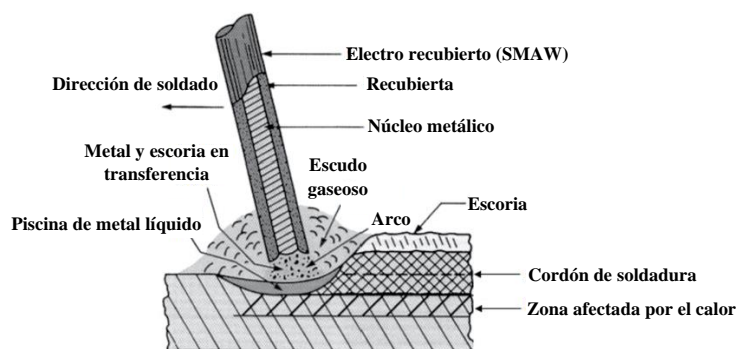
Ambas técnicas de corte requieren una inversión inicial fuerte debido a que los equipos suelen ser de precio elevado (particularmente alto en el caso del corte laser) [13] por lo que suelen ser menos utilizados con respecto a los procesos de corte mecánico y abrasivo.

En el aspecto energético, el consumo de energía dependerá de las variables de operación que, a su vez, dependen del tipo de material a cortar. Por ejemplo, Lincoln Electric México [21] comercializa equipos para corte por plasma; su línea Spirit II cuenta con potencias de entrada caracterizadas por voltajes entre 208 y 600 VCA en trifásico y con frecuencia de 50/60 Hz que pueden otorgar corrientes máximas de salida entre los 150 y los 400 A en corriente directa (DC) para el corte de placa de acero con espesores máximos de entre 1.5 y 3 in. Además de consultar los equipos disponibles en el mercado, se podría recurrir nuevamente al software CES Edupak para obtener los valores de energía de vaporización puesto que este fenómeno físico sería similar a lo ocurrido durante el corte laser o por plasma, valor que para aceros al carbono se encuentra entre el rango de 10,800-11,000 MJ/kg [13] y que supera a los valores de intensidad energética reportados anteriormente para otros procesos. Sin embargo, estos valores no son representativos en términos de consumo energético para este caso debido a que la cantidad de material que se pierde en el corte es baja y el tiempo de aplicación de la energía es corto, pero, si lo son para cuestión de límites tecnológicos, puesto que si se desea suministrar el calor necesario para el corte con un esquema de generación de energía renovable se debe tener en cuenta que esa es la cantidad de energía que se debe suministrar de forma puntual.

## 2.4. Módulo de unión de partes: Soldadura.

En esta sección se exploran los procesos utilizados para la unión de dos componentes metálicos que no involucran el uso de adhesivos o de componentes de unión mecánicas, mejor conocidos como procesos de soldadura. Es posible clasificar estos procesos en dos conjuntos diferentes: aquellos que recurren a la aplicación de calor para fundir y fusionar la interfaz dada por los dos componentes, o bien, aquellos que no requieren de la aplicación de calor para lograr la unión, pero, si se llegara a elevar la temperatura interfacial esta no sería suficiente para lograr el cambio de fase a estado líquido. Este trabajo se enfocará en los procesos de soldadura por fusión, no se profundizará en los principios de funcionamiento de cada una de las técnicas que componen a esta categoría, solamente se darán los detalles necesarios para los objetivos de esta investigación, los cuales toman como referencia principal lo descrito por Kalpakjian et al. [18].

Como se describió anteriormente, en este tipo de soldadura se realiza la fusión parcial del material a unir en la interfase (soldadura autógena) o es posible agregar un material de aporte como material unión. Para la obtención de la energía calorífica que llevará a cabo la fusión, se recurre a medios químicos, eléctricos o a haces de alta energía (como el láser empleado también en las técnicas de corte). Cuando se utiliza energía eléctrica, la soldadura se lleva a cabo produciendo un arco eléctrico (Figura 14) entre la punta de un electrodo y la pieza de trabajo, empleando una fuente de corriente eléctrica directa o alterna. Las temperaturas logradas rondan los 30,000 °C. El electrodo puede consumirse durante la soldadura y ser parte del material de aporte o no hacerlo.



Fuente: Diagrama de Kalpakjian et. al [18].

Figura 14. Esquema de funcionamiento de la soldadura por arco eléctrico con electrodo sumergido.

Un parámetro importante para considerar al utilizarse corriente directa es la polaridad del arco pues esta influye en la calidad de la soldadura. Por ejemplo, cuando la polaridad es directa la pieza de trabajo es positiva (ánodo) y el electrodo negativo (cátodo); a esta condición se le conoce también como corriente directa de electrodo negativo (DCEN por sus siglas en inglés) y permite obtener soldaduras angostas y profundas.

En la soldadura por corriente alterna, el arco pulsa debido a la variación de voltaje y da la condición adecuada para soldar secciones gruesas y utilizar electrodos de diámetros grandes. En la Tabla 8, propuesta por Kalpakjian et al. [18] se enlistan los tipos de soldadura

por arco y el tipo de corriente que utilizan, así como algunas características de uso entre las que se incluyen los valores de eficiencia térmica proporcionados por Shrivastava et al.[22] lo que permite inferir que la soldadura por arco sumergido (tecnología de amplio uso en el sector industrial) aprovecha al máximo el calor suministrado para llevar a cabo la fundición de los materiales.

Tabla 8. Algunas características de las técnicas de soldadura por arco eléctrico.

Tipo de soldadura	Características de operación	Tipo de corriente	Eficiencia térmica
<b>Arco metálico sumergido</b>	Deposición alta de material, de operación automática	CA, CD	100 %
<b>Arco metálico y gas</b>	Amplio espectro de materiales de trabajo. De operación semiautomática o automática.	CD	70 – 90 %
<b>Arco de tungsteno y gas</b>	Amplio espectro de materiales de trabajo. De operación manual o automática	CA, CD	60 - 70%

Fuente: Elaboración propia con información de Kalpakjian et al. [18] y Shrivastava et al. [22].

La cantidad de calor que es suministrado por el arco eléctrico dependen proporcionalmente del voltaje y de la corriente de salida en el equipo, y disminuye con la velocidad a la que se desplaza el arco a lo largo de la línea de soldadura (parámetro conocido como velocidad de soldado).

Las máquinas para soldadura comercializadas por Okila [23] y de la línea WELD500 cuentan entradas de potencia definidas por voltajes CA entre 90 y 400V en monofásico y trifásico, con una corriente de entrada máxima a salida nominal de entre 32 y 65 A, como se muestra en la Tabla 9. Shrivastava et al.[22] menciona que el consumo eléctrico de estos equipos debe ser la suficiente para contemplar las pérdidas por la conversión de energía, las pérdidas de calor a través de la transferencia de calor entre la fuente y la pieza, las pérdidas en el ambiente y la energía necesaria para llevar a cabo la unión; por lo que el consumo de energía se compondrá por la energía base o *standby*, la energía del equipo en estado inactivo (mientras se realizan cambios en la soldadura que no requieren calor como mover una pieza, cambiar la posición del soldador, etc.) y la energía necesaria para llevar a cabo la unión. El valor de cada una de estas componentes es específico de la maquinaria usada y del tipo de soldadura llevada a cabo. Por ejemplo, la energía unión en la soldadura por arco sumergido depende de la masa de metal de aporte empleada en los cordones de soldadura y esta a su vez depende de la longitud de soldado y de los espesores de las placas o piezas a unir. Sin embargo, en todas las técnicas, la energía específica de fusión de los materiales cobra importancia y los aceros con valores de 9.1 – 10.3 J/mm<sup>3</sup>, encabezan el listado contra materiales no ferrosos como las aleaciones base aluminio (2.9 J/mm<sup>3</sup>)

## 2.5. Módulo de fundición de metales.

A diferencia del conformado mecánico, los procesos de fundición parten del material en estado líquido para obtener productos terminados y semiterminados. La industria de la fundición involucra una gran cantidad de procesos diversos que, al igual que en el caso de los conjuntos de operaciones revisados anteriormente, pueden clasificarse desde diversos criterios. Por ejemplo, hay procesos en los que el metal líquido llena un molde con solo vaciarlo en el interior de este, otros requieren aumentar la presión del flujo del material; también hay procesos que utilizan moldes que son destruidos o consumidos cuando el material caliente ingresa a estos e incluso hay moldes permanentes que pueden ser utilizados en más de una colada<sup>14</sup>. Sin embargo, todos los procesos de fundición pueden ser descritos por una serie de pasos generales propuestos por Pagone et. al [6].

Tabla 9. Algunas especificaciones para modelos de equipos para soldadura por arco eléctrico de la empresa Okila y de la línea WELD500.

Modelo	Voltaje de entrada CA	Corriente de entrada máxima a salida nominal	Potencia de entrada calculada.	Fases	Ciclo	
	V	A	kW		Hz	
<b>ER390-PLUS</b>	220	50	11	3	50/60	
<b>TP250</b>		53	11.66	1		
<b>M251</b>		45	9.9	1		
<b>M390</b>		46	10.12	3		
<b>M502</b>		65	14.3	3		
<b>M500</b>		220 / 400	34	7.48 / 13.6		3
<b>TT200</b>		90 - 270	32	2.88 – 8.64		1
<b>M200 LCD</b>		110 / 220	38/29	4.18/6.38		1

Fuente: Elaboración propia con información del catálogo de Okila [23].

Como primer paso, el material debe ser llevado a una temperatura que supere a su punto de fusión y que le otorgue la viscosidad suficiente para llenar el molde con facilidad, además debe brindar un intervalo grande de trabajo para que el material no solidifique antes de terminar el vaciado. En este primer paso, una gran cantidad de energía térmica es consumida. De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 10 para una fundidora de aluminio este proceso representa aproximadamente el 43%<sup>15</sup> de la energía de una fundidora. Previo a esto, el material puede ser precalentado, lo que disminuye la cantidad de energía consumida en esta etapa.

En la segunda parte del proceso, se debe suministrar la energía suficiente para poder mantener al metal líquido a la temperatura seleccionada, esto con el fin de realizar

<sup>14</sup> El término colada en ingeniería de fundición, hace referencia al proceso de vaciar el metal líquido a un molde. También, se dice que un material o un producto es de colada cuando provienen o fueron fabricados a partir de un proceso de fundición y no se les aplicó algún proceso adicional de cambio de propiedades o de forma, es decir, no fueron sometidos a tratamientos térmicos ni a operaciones de conformado mecánico.

operaciones relacionadas con el mejoramiento de la calidad de los productos de colada como son: la extracción de impurezas por medio de la escorificación, la eliminación de gases disueltos (que forman cavidades en el material solidificado), el ajuste de la composición química por medio de la adición de material, entre otros. También, es durante esta etapa en la que se prepara el molde para el vaciado. El consumo de energía en esta etapa puede representar aproximadamente el 28% del total, siendo la segunda operación de mayor consumo energético.

Tabla 10. Contribución porcentual al consumo de energía en una fundidora de aluminio.<sup>16</sup>

Operación	Consumo de energía	Contribución porcentual al consumo
	GJ	%
<b>Fundición</b>	9.61	43
<b>Mantenimiento</b>	6.24	28
<b>Tratamiento térmico</b>	3.57	16
<b>Maquinado</b>	0.96	4
<b>Otros</b>	2.07	8
<b>Total</b>	<b>22.45</b>	

Fuente: Elaboración propia con información de Pagone et al.[24].

Como se observa en el diagrama de Sankey de la Figura 15, se confirma que las primeras dos etapas de las descritas previamente son las que involucran el mayor consumo energético y, también, las mayores pérdidas de energía, en específico energía térmica.

Por otra parte, las operaciones de tratamiento térmico necesarias para productos de fundición involucran el 16% del consumo energético. Esto podría esperarse ya que se llevan a cabo a temperaturas menores que los procesos de fundición. Sin embargo, esta operación aún forma parte de las principales consumidoras de energía en la producción de aluminio colado.

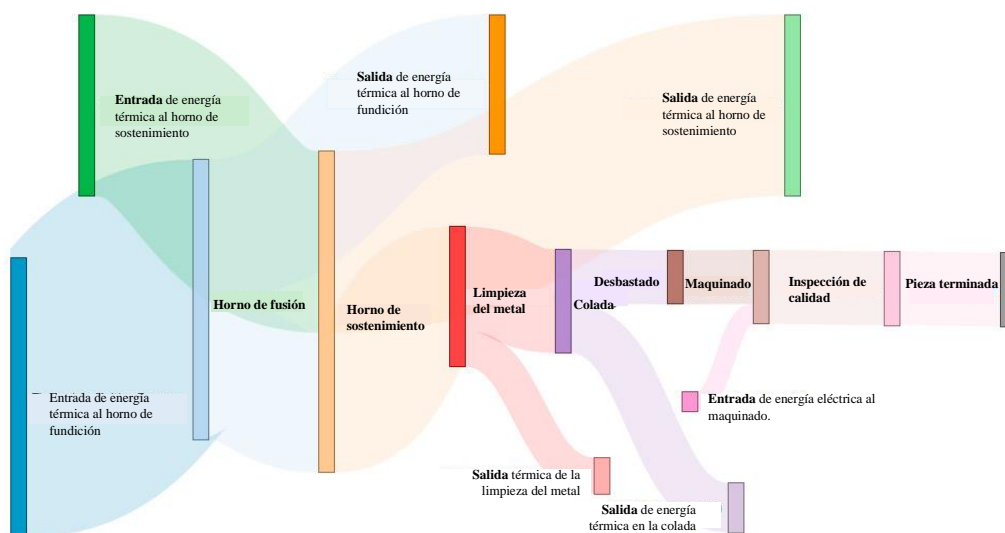
El procesado completo de una pieza de colada involucra también energía eléctrica, principalmente consumida en las operaciones de acabado final. La pieza colada es sometida a operaciones como arranque de viruta y de inspección. En esta etapa final, el material removido, así como las piezas fuera de los estándares de calidad son realimentadas al proceso de fundición. La energía consumida en el maquinado representa aproximadamente el 4% del consumo total; porcentaje que es aún menor a la suma del consumo del resto de operaciones complementaria.

En contraste, Stefana et al.[25] mencionan en su trabajo que, por ejemplo, en una fundidora de hierro entre el 55% y 80% del consumo energético está enfocado en la etapa de fundición del material. De forma complementaria, se muestran en la

Tabla 11 algunos datos recopilados con el software CES Edupack de energía específica de fundición para diversos materiales metálicos. En general, los valores de la

<sup>16</sup> Calculado a partir de una base de cálculo de 1000 Kg procesados y retirando del balance la energía necesaria para la fabricación de las materias primas.

mayoría de los metales reportados se encuentran entre los 8.63 y los 12.2 MJ por kilogramo de material procesado; encabezando esta lista se encuentran las aleaciones base aluminio de fundición, el acero al carbono y el hierro colado. A pesar de que los materiales ferrosos tienden a fundir a temperaturas mayores con respecto a las de las aleaciones base aluminio, se debe considerar que estas últimas requieren tiempos considerables de mantenimiento de la temperatura para aplicarse los diversos tratamientos al metal líquido característicos de la fundición de aluminio. Es probable que a ello se deba la diferencia observada en esta tabla y en los porcentajes establecidos por Stefana et al.



Fuente: Diagrama de Pagone et. al [6].

Figura 15. Diagrama de Sankey de los flujos de energía involucrados en cada una de las etapas de la fabricación de productos metálicos por fundición.

Tabla 11. Energía específica consumida por distintos materiales metálicos en procesos de fundición.

Material	Energía específica de fundición
	MJ/kg de material procesado
<b>Aleaciones de aluminio para fundición</b>	11 - 12.2
<b>Acero ordinario de alto contenido de carbono</b>	10.8 - 11.9
<b>Hierro colado</b>	10 - 11.1
<b>Latón</b>	8.27 - 9.14
<b>Cobre</b>	8.63 - 9.53
<b>Zinc comercial puro</b>	6.42 - 7.1

Fuente: Elaboración propia a partir del software CES EduPack (Versión 2018) [13].

Es así como en este capítulo se muestra que la industria metalmecánica demanda importantes cantidades de energía térmica para abastecer algunos de sus módulos más importantes dado las temperaturas y tiempos de trabajo de los hornos involucrados. Siendo



el módulo de fundición el de mayor interés en este aspecto, seguido por el de tratamientos térmicos. Además, requiere de energía eléctrica que dé sustento a procesos como el conformado mecánico, la soldadura por arco eléctrico y el maquinado. Ampliando, en la industria metalmeccánica, la demanda de energía eléctrica está presente horizontal, transversal o verticalmente, en casi todos los procesos, independientemente de los distintos subsectores metalmeccánicos que se analicen.

Por otra parte, se denotan los problemas en términos de eficiencia energética que presentan algunos de los procesos estudiados (como es el caso del embutido convencional) que suponen como solución inmediata, el cambio de la maquinaria por modelos más eficientes e hidráulicos principalmente en el caso del módulo de deformación plástica. Esto último se torna complicado debido a que la maquinaria que se suele tener en ese tipo de industrias suele ser trabajada al máximo de su vida útil.

Lo niveles de consumo energético para cada operación dependen no sólo de las cantidades de material procesado, también de las propiedades del material. Si bien el acero es el material de interés de este trabajo, el consumo de energía para materiales no ferrosos puede exceder al de esta aleación en algunas operaciones debido a las variantes en los procesos asociadas a estas propiedades.

Se ha explorado hasta el momento, desde una perspectiva general, en qué consiste la industria metalmeccánica y cuáles son sus necesidades energéticas para cubrir. Se prosigue a describir esta industria en el territorio nacional, así como los recursos energéticos cercanos a la misma que podrían ser importantes para el diseño de esquemas de generación de energía distribuida para este sector.

### **3. La industria metalmecánica siderúrgica en México y los recursos energéticos.**

Ahora que se ha definido y limitado el concepto de industria metalmecánica desde el punto de vista tecnológico y de procesos, es necesario describir el panorama de la industria metalmecánica en México que se ha comenzado a vislumbrar en la introducción de este trabajo. Abordando algunos indicadores económicos relacionados con el sector y la distribución geográfica de las unidades industriales que lo constituyen. Aunado a ello, se complementa la investigación con una descripción breve de la distribución de los recursos energéticos en los estados de interés para este sector industrial. De tal forma, que la intersección de ambos conocimientos permita concluir al final de este capítulo cuál sería el recurso energético (o recursos) que podrían ser base de la instalación de sistemas de generación de energía renovable para autoconsumo.

Para la investigación realizada para la escritura de este capítulo, se emplearon documentos y bases de datos oficiales del gobierno de México, principalmente del INEGI. Además, se toma información de organismos industriales como la CANACERO y la CMIC y de organizaciones internacionales, como la IRENA, que aportan información sobre el país

#### **3.1. *Industria metalmecánica siderúrgica en México***

##### **3.1.1. Distribución geográfica y estadística de interés.**

El INEGI (principal sistema de información económica del país) clasifica las actividades económicas del país en sectores/subsectores y a ninguna de estas categorías pertenece de forma exclusiva la industria metalmecánica. Algo que podría esperarse puesto que, de acuerdo con los procesos que hemos ya detallado, las operaciones que la componen son transversales a diferentes tipos de industria como son la automotriz y la fabricación de productos electrónicos. Sin embargo, es posible establecer cuáles son los sectores que se encuentran más relacionados con esta actividad económica.

El sector principal o raíz corresponde a la industria manufacturera que, hasta noviembre del año 2019, contaba con 244,612 industrias asociadas. El INEGI, contempla 21 subsectores que componen a este sector; de entre ellos, los más importantes para esta investigación son las actividades económicas asociadas con las industrias metálicas básicas (sector 331 en la notación marcada por INEGI) y la fabricación de productos metálicos (332). Entre las actividades enlistadas en estos subsectores están, por ejemplo, la fabricación de productos de hierro y del acero, fabricación de herramientas de mano y la fabricación de herrajes y soldaduras. Las actividades asociadas al subsector de productos metálicos dependen a su vez de las englobadas en las industrias metálicas básicas, por lo que delimitaremos este estudio a este último subsector.

Las industrias metálicas básicas comprenden a la industria básica del hierro y el acero, fabricación de productos de hierro y acero (como tubos y postes), a la industria básica del aluminio, las industrias de metales no ferrosos, excepto aluminio y el moldeo por fundición de piezas metálicas. Como se ha delimitado hasta el momento, es de interés de esta investigación el enfocarse en la industria del hierro y del acero, es decir la industria

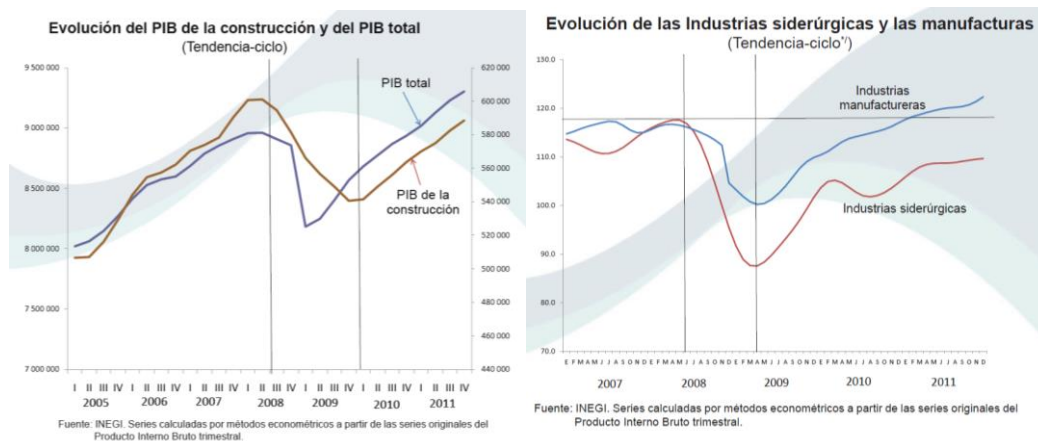
siderúrgica. El perfil de la industria del hierro y el acero en México, publicado por el INEGI en el año 2016 [26], reporta algunos datos interesantes que enmarcan de mejor forma la importancia de las actividades de esta industria. De acuerdo con el valor de producción, la industria siderúrgica ocupó el lugar número 12 de las 86 ramas que componen a la industria manufacturera con una contribución al valor de producción total del 1.9%. Por otra parte, este sector se encuentra entre las once primeras actividades manufactureras con mayor capacidad para generar excedentes brutos de operación, en el 2014 representaba el 2.5% del valor de los excedentes de las manufactureras.

En el aspecto de comercio internacional, la industria del hierro y del acero se encuentra ubicada entre las 20 primeras ramas con mayor valor tanto en la venta como en la compra de productos en los mercados extranjeros. Sin embargo, una desventaja, es que los productos exportados son de menor valor monetario en comparación con los insumos comprados en el extranjero.

En cuanto a las relaciones entre otros sectores nacionales, la industria del hierro y del acero requiere de insumos suministrados por 153 ramas de las 259 que componen a la matriz de insumo-producto y le vende insumos a 118 de las ramas, seis de las cuales compran el 79.4% del total de bienes intermedios producidos por el sector. Del valor total de la producción, el 29.2% es destinado a demanda final (de la cual el 86.1% es exportada), mientras que el 70.8% funge como materias primas para el mercado intermedio. Como es de esperarse, las principales ramas industriales que proveen de insumos al sector son la minería de metales ferrosos y de no metálicos (44% de los insumos) y la generación de energía eléctrica (6.3%); también las transacciones entre las unidades económicas pertenecientes al mismo sector son significativas, al representar el 19.2% del total de insumos, lo que demarca un grado de interdependencia en la industria básica del hierro y del acero. En general, cerca del 60% de los insumos totales son de origen nacional, sin embargo, el sector depende en 19.3% de insumos importados de minerales metálicos, 50.1% en minería de carbón mineral, 52.8% en insumos pertenecientes a la propia industria básica del hierro y el acero, y una elevada dependencia del 95.1% de maquinaria y equipo importados para la industria metalmeccánica. En el aspecto energético, el sector es independiente en materia de energía eléctrica al ser suministrada el 99.8% de su demanda por generadores nacionales; pero, en materia de derivados del petróleo y carbón aún hay una fuerte dependencia de insumos extranjeros con un porcentaje del 72.1%.

Por otra parte, las unidades dedicadas a la fabricación de productos metálicos son las que cubren el 32.7% de la demanda de la producción del sector, además la industria de la construcción es también un cliente principal al cubrir con cerca del 30% de la demanda. Como se observa en los gráficos proporcionados por INEGI y recopilados en la Figura 16, el PIB de los sectores siderúrgico, manufacturero de y de la construcción presentan el mismo comportamiento a lo largo del tiempo, con una evolución positiva con cada año a partir del 2010, justo después de la crisis manufacturera del año 2008 que ocasionó una caída drástica del PIB total y una menos severa del PIB sectorial de las tres actividades económicas. La recuperación positiva de estos sectores se relaciona entre sí debido a que el sector siderúrgico es productor de la materia prima de ambos sectores. Lo que implica que el uso de esquemas

de generación de energía distribuida renovable, podría impactar de forma directa o indirecta en ambos sectores.



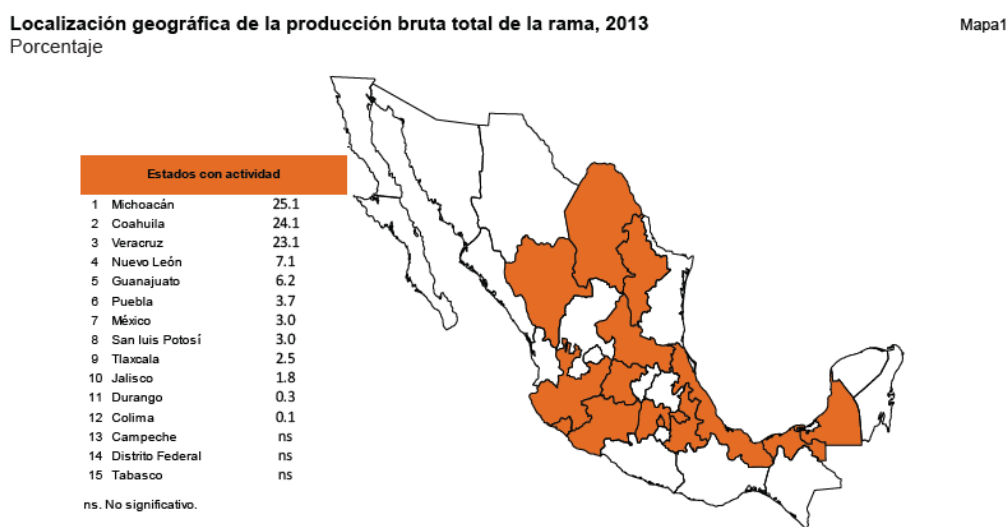
Fuente: Gráficos de INEGI [27], [28].

Figura 16 Evolución del PIB total y de la construcción

Las unidades pertenecientes a la industria del hierro y del acero se encuentran distribuidas en 27 municipios del territorio nacional. De éstas, el 44.7% pertenecen al grupo de industrias de baja producción y nivel de ocupación (de tamaño micro y pequeño como demarca el INEGI) y el 55.3% son industrias grandes que cubren casi el 100% de la producción total del país. Éstas últimas se hallan principalmente en las 5 entidades federativas que aportan el mayor valor de la producción siderúrgica: Michoacán, Coahuila, Veracruz, Nuevo León y Guanajuato. Otras entidades con participación importante en orden descendente son Puebla, Estado de México, San Luis Potosí, Tlaxcala y Jalisco, como se denota en la Figura 17. A su vez, las tres primeras entidades de la lista, ocurre un fenómeno interesante: en Michoacán la actividad siderúrgica aporta el 46% de la producción total manufacturera del estado y ocupa por ello el primer lugar de la rama manufacturera en la entidad, por otra parte, en Coahuila y Veracruz la producción siderúrgica representa menos del 10%, pero, siguen conservando uno de los primeros cinco lugares locales de la rama. En el resto de los estados nombrados en el listado, la matriz manufacturera se diversifica y se reduce el impacto local del sector, a pesar de ello, estados como Nuevo León, Guanajuato y Puebla destacan también por su contribución a la producción siderúrgica nacional. En específico, poco más de la mitad del valor de la producción generada por este sector, la generan 5 municipios: Lázaro Cárdenas en Michoacán, Monclova en Coahuila, Villagrán en Guanajuato, San Miguel Xoxotla en Puebla y Ramos Arizpe en Coahuila (ordenados de mayor a menor producción bruta total)

Además del INEGI, otra organización nacional que aporta información sobre la industria del acero en México es la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y del Acero (CANACERO). Un "órgano autónomo reconocido oficialmente por el Gobierno Federal que promueve el desarrollo de prácticas comerciales éticas, sustentables y responsables; y que agrupa a las empresas productoras y transformadoras de acero en el país y a aquellas estrechamente vinculadas" [29]. La cámara cuenta con información de acceso público que

brindan un panorama holístico sobre este sector industrial; resaltan diversas infografías en su sitio web con datos de interés para este proyecto de investigación. En la Figura 18 se coloca un extracto de la infografía *Radiografía de la industria del Acero en México 2019* que consiste en un mapa que ubica a los principales actores del sector siderúrgico en el territorio nacional (socios de la cámara) catalogándolos a su vez de acuerdo con las actividades que desempeñan y la tecnología que utilizan. Por ejemplo, las empresas productoras de acero (que sus operaciones incluyen metalurgia extractiva) son identificadas según el método de fabricación de la aleación, ya sea por medio de alto horno u horno eléctrico. Por otra parte, se encuentran los laminadores<sup>17</sup> fabricantes de tubos y fundidores que, en principio podrían tratarse de las empresas de mayor interés para esta investigación puesto que sus operaciones industriales se enfocan exclusivamente en los módulos descritos en el capítulo anterior; sin embargo, son también de considerar los productores de acero puesto que estas plantas cuentan también con operaciones metalmecánicas en su línea de producción.



Fuente: Mapa de INEGI [26].

Figura 17. Localización geográfica de la producción bruta total de la rama siderúrgica en 2013.

En primera instancia, de la información recabada en la infografía, se puede notar que, si relacionamos directamente la participación de los estados en la industria siderúrgica por la cantidad de entidades industriales en su territorio, de inmediato resaltan los estados de Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí y Veracruz con al menos cinco unidades. Esto podría contrastar con la información del INEGI que coloca a Michoacán como el estado de mayor participación en el sector siderúrgico y que en este mapa se muestra una sola unidad participante en su territorio; pero, la organización coloca a este estado como el segundo productor de acero líquido a nivel nacional lo que implica que este nivel de producción recae principalmente en una sola entidad. En la Tabla 12, se colocan algunas de las empresas

<sup>17</sup> Si bien este término podría hacer suponer que estas entidades sólo aplican un tipo específico de operación de conformado, en realidad emplean una variedad de procesos correspondientes a este módulo.

participantes en cada uno de estos estados y se compara el "ranking" del INEGI y de la CANACERO, resultando en diferencias mínimas.



Fuente: Mapa de CANACERO [30].

Figura 18. Distribución geográfica de la industria siderúrgica en México en 2019.<sup>18</sup>

De entre todas las empresas mencionadas en la Tabla 10, los productores más importantes de acero en el país son, en orden descendente: ArcerlorMittal México (perteneciente al principal productor de acero a nivel mundial), Altos Hornos de México (AHMSA) y Deacero. Por otra parte, los principales laminadores en el país son Posco México, Galvasid y Outokumpu Mexinox, ubicado el primero en el estado de Tamaulipas que, en contraste, no figura entre los ocho principales estados productores de acero. Los principales fabricantes de tubo son Tubacero, Procarsa y Tubería Laguna, esta última ubicada en Durango que no es incluido en la lista de los principales productores de acero. Además, en el listado aparecen empresas productoras de piezas fundidas como *Fundición y mecánica Susano Solis* y Frisa Forjados. Complementando la información relacionada con los laminadores: de acuerdo con INEGI y CANACERO [26], del total del acero producido, la mayoría se destina a la laminación de productos de acero.

Otro aspecto informativo interesante proporcionado por la CANACERO es la ubicación de los principales comercializadores del sector siderúrgico, las cuáles se encuentran principalmente en Nuevo León, Ciudad de México y al oeste del país en Colima, Zacatecas y Guanajuato. Estas ubicaciones implican transportes de material, asociados a radios de influencia y a consumos energéticos que podrían ser suministrados mediante recursos renovables.

<sup>18</sup> Se realiza la distinción de las operaciones realizadas en cada entidad mediante un código de colores

Definida ya la distribución geográfica del sector, así como algunos datos económicos relevantes, a continuación, se profundiza en los aspectos relacionados con la producción del sector con el fin de responder la pregunta: ¿cuáles son los productos más fabricados en el país y que podrían resultar de interés para la instalación de un sistema de autoconsumo energético renovable?

Tabla 12. Principales entidades participantes en el sector siderúrgico (miembros de CANACERO) por entidad federativa.

Estado	Lugar en producción de acero		Entidad de la industria siderúrgica	
	INEGI	CANACERO	Productoras de acero (acereras)	Laminadores y productores de tubo.
<b>Michoacán</b>	1°	2°	ArcelorMittal México	-----
<b>Coahuila</b>	2°	1°	Altos Hornos de México (AHMSA) Deacero (2 unidades)	Pytco ConduIt Procarsa
<b>Veracruz</b>	3°	4°	Tyasa Tenaris TAMSA	Tubacero Autlan Fundición y Mecánica Susano Solis
<b>Nuevo León</b>	4°	3°	Ternium México (2 unidades)	Tubacero Grupo Forza Steel Tubería Nacional-Villacero Galvasid AB Tube Zinacero-Villacero Ladesa Signode México Frisa Forjados (2 sedes)
<b>Guanajuato</b>	5°	5°	ArcelorMittal México Deacero	-----
<b>Puebla</b>	6°	7°	Ternium México Grupo Simec	-----
<b>México</b>	7°	9°	Gerdau Corsa	Aceros Camesa Peasa Cominox
<b>San Luis Potosí</b>	8°	6°	Grupo Simec	Outokumpu Mexinox Peasa Tubesa Fischer mexicana.

Fuente: Elaboración propia con información de INEGI [31] y CANACERO [32].

### 3.1.2. Características de la producción metalmecánica siderúrgica.

Las principales productoras de acero mexicanas generan una gama amplia de productos que se enlistan en la Tabla 13. De entre ellos resaltan por la cantidad de industrias que los producen, la palanquilla, la varilla, el alambión, las barras y los perfiles comerciales y estructurales. Además, todos estos productos se encuentran entre la gama de los fabricados por las tres acereras de mayor producción (de forma diversificada puesto que cada uno es producido en particular por una unidad). En el caso de los laminadores, el catálogo de productos es 36% más reducido pero diversificado en cuestión de producción puesto que el 50% de las unidades fabrican un sólo producto en específico; Posco México, por ejemplo, se especializa en la producción de lámina galvanizada, pero, este producto también es fabricado por tres laminadores más. Por último, los productos de los fabricantes de tubo son clasificados por CANACERO en dos tipos basados en el tamaño del tubo: mayor e igual o menor a 406 mm. El mayor fabricante de tubos de México, Tubacero, produce tubos por arriba de este diámetro.

Tabla 13. Productos siderúrgicos fabricados por acereras y laminadores en México.

Productoras de acero		Laminadores	
Producto	Porcentaje de productores de acero en México que lo producen <sup>19</sup>	Producto	Porcentaje de laminadores en México que lo producen <sup>20</sup>
	%		%
Planchón	37.5	Lámina galvanizada	40
Palanquilla	75	Cintas y flejes	10
Placa	25	Varilla	10
Lámina caliente	25	Inoxidables	10
Lámina fría	25	Desplegada	10
Lámina galvanizada	12.5	Barras	10
Lámina cromada y estañada	12.5	Alambre y derivados	20
Varilla	75	Perfil comercial	20
Alambión	62.5	Perfil estructural	20
Alambre y derivados	12.5		
Barras	50		
Perfil comercial	62.5		
Perfil estructural	62.5		
Tubos	37.5		

Fuente: Elaboración propia con información de CANACERO [32].

Si bien CANACERO otorga dentro de su información de acceso público un listado de productos fabricados por el sector siderúrgico y las entidades que los producen, no proporciona a libre acceso información sobre los niveles de producción de éstos en su portal web. Nos valemos entonces de la información proporcionada por el INEGI en su documento "La industria siderúrgica en México"<sup>21</sup> [31] cuya versión más reciente corresponde al año 2012 y recopila información del periodo dado entre 2006 y 2011 de diversos aspectos del sector y de entre ellos destaca para esta investigación la numeraria relacionada con la

<sup>19</sup> Basado en un total de 8 productores de acero mexicanos.

<sup>20</sup> Basado en un total de 10 laminadores mexicanos.

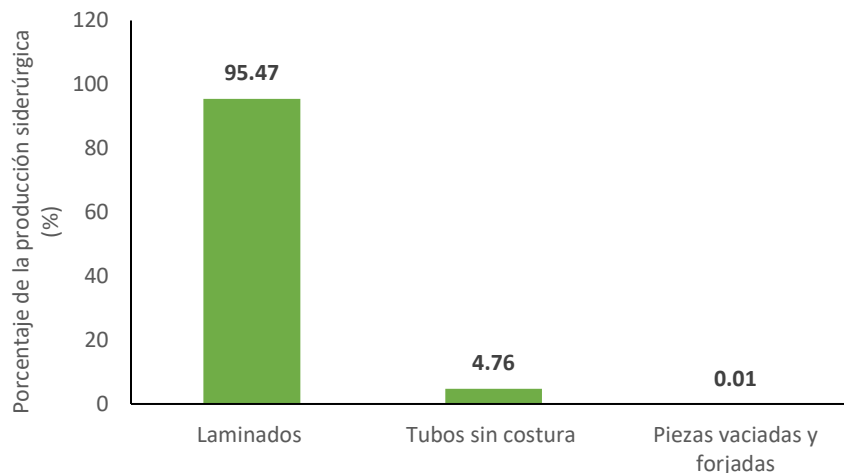
<sup>21</sup> Si bien el documento es propiedad del INEGI las cifras presentadas son propiedad de CANACERO.



producción siderúrgica. El informe clasifica a los productos siderúrgicos en tres tipos: laminados, tubos sin costura y piezas vaciadas y forjadas, cuya contribución porcentual en la producción siderúrgica total se muestra en Figura 19. La primera categoría corresponde a aproximadamente el 96% de la producción siderúrgica en el país. A su vez, dentro de esta categoría se encuentran dos subgrupos de productos: planos y largos, cuyos niveles de producción son similares entre sí, apenas superando con un 53% de la producción la gama que comprende a los productos planos (placa y lámina). La lámina<sup>22</sup> conformada en caliente lidera la producción del conjunto. Por otra parte, el producto más representativo por nivel de producción de los largos es la varilla corrugada, empleada en la industria de la construcción para las estructuras de concreto reforzado.

En el caso de la fabricación de tubos (que representan el 4.76 % de la producción siderúrgica) los tubos sin costura gobiernan la producción y se fabrican a un nivel similar del total de productos largos. El 68.2% de los tubos sin costura producidos se destinan para ademe petrolero (*cassing*). Los tubos con costura no se incluyen como una categoría más de la producción siderúrgica debido a que son derivados de los productos planos<sup>23</sup>. Esto también implica que no son sumados en las cifras de producción de los tubos sin costura.

Las piezas forjadas y vaciadas (o coladas) representan un porcentaje muy bajo de la producción total siderúrgica, estando inclusive por debajo del 1%. El documento no muestra cuáles son los productos englobados en esta categoría. Sin embargo, es probable que la producción de esta categoría podría estar gobernada por las piezas forjadas.



Fuente: Elaboración propia considerando la información del periodo 2006-2011 de INEGI [31].

Figura 19. Contribución porcentual promedio de cada producto en la producción total siderúrgica.

<sup>22</sup> Producto plano cuyo espesor es menor o igual a 3/16 de pulgada.

<sup>23</sup> Los tubos con costura se producen a partir de la soldadura de lámina y son destinados a aplicaciones de baja presión. El diámetro de clasificación utilizado por INEGI a partir de lo establecido por CANACERO es de 115 mm. En cambio, los tubos sin costura se producen a partir del conformado en caliente y se destinan a aplicaciones de alta presión.

Una vez explorado el sector con cifras económicas, de distribución geográfica y en materia de producción, se procede ahora a profundizar en el comportamiento energético específico para el sector siderúrgico en México.

### ***3.2. Consumo energético en el sector siderúrgico en México.***

En la introducción a este trabajo, se mencionaban algunas de las cifras más importantes relacionadas con la energía en el sector siderúrgico desde una visión internacional. A continuación, se presentan algunas cifras establecidas desde un punto de vista nacional.

CANACERO en su página web [30] establece que: en el año 2016 la intensidad energética del sector estuvo 17.3% por debajo del promedio mundial de 20.2 GJ/ton de acero [2], lo que da como resultado un valor aproximado de 16.71 GJ/ton. De acuerdo con la CANACERO, el sector contó con apenas un 6% de participación de las energías renovables en el consumo eléctrico de la industria, y se ha reducido el uso de combustóleo en un 98%, porcentajes que se buscan modificar con la exploración realizada en esta investigación.

En otras cifras nacionales, el Sistema de Información Energética (SIE) no establece un apartado único para el sector metalmeccánico siderúrgico dentro del Balance Nacional de Energía [33]. Pero, si se reportan cifras para el sector siderúrgico en su conjunto, sector que en el año 2017 consumió 248.054 PJ de energía que constituyen el 13% de la energía total consumida por el sector industrial y el 29.2 % de la energía total consumida por el país. El SIE reporta que la mayor parte de la energía consumida por la industria básica del hierro y del acero es el coque metalúrgico, asociado a los procesos de metalurgia extractiva, mientras que se consumen alrededor de 20.463 PJ de energía eléctrica cuyo origen depende de la matriz energética nacional y que se distribuirá tanto en operaciones extractivas como metalmeccánicas.

Si consideráramos a todas las unidades involucradas en el sector como siderúrgicas integradas (hipótesis limitada pues no todas las unidades del sector cuentan con un alto horno pero que funciona para planear un ejemplo) y se toma en cuenta la información presentada por Gupta [1] aproximadamente el 2.1% del consumo industrial total podría corresponder al sector metalmeccánico siderúrgico al cual aún se debería adicionar el consumo del sector manufacturero de productos metálicos.

Conociendo parte del panorama de consumo energético en el sector, cabe ahora responder a la pregunta ¿cuáles son los recursos energéticos renovables disponibles en los estados más importantes en producción siderúrgica que permitan crear estrategias para elevar el 6% de participación?

### ***3.3. Energía renovable en las entidades con mayor actividad metalmeccánica siderúrgica.***

México cuenta con un amplio potencial en materia de energía renovable. La IRENA, estableció en su informe *Renewable Energy Prospects: México* [34], que el país tiene el potencial de generar 280 TWh de energía eléctrica renovables para el año 2030, lo que implica una ventaja en materia de diversificación de la matriz energética. Los recursos

energéticos se distribuyen a lo largo del territorio nacional de forma heterogénea, es decir, que en una misma región pueden ser aprovechados uno o más recursos que se encontrarán limitados por las características geográficas del lugar.

En el caso eólico, por ejemplo, el norte y sur del país cuentan con zonas con alto potencial de aprovechamiento; la IRENA establece tres regiones principales: El istmo de Tehuantepec, el estado de Tamaulipas y la península de Baja California, regiones cuyo potencial se maximiza en las zonas cercanas a las costas. Existen otros autores como Vega de Kuyper et al [35]. que identifican otras zonas de alto potencial eólico como es el Altiplano norte y centro del país, así como la península de Yucatán.

El recurso solar por otra parte puede ser muy bien aprovechado en todo el territorio, principalmente en la región noroeste. En cuanto al recurso geotérmico (cuyo aprovechamiento ha sido clave en el país pues actualmente ocupa el cuarto lugar a nivel mundial en la producción de electricidad por este medio) las regiones de mayor potencial son la central, asociada al cinturón volcánico mexicano, la delimitada por la Sierra madre occidental, algunas regiones al norte y sur de Baja California y el norte de Chiapas, aunque, el recurso en sí se encuentra distribuido a lo largo de todo el territorio nacional.

Continuando con el listado de recursos, la hidroenergía ha mostrado un alto potencial en el país tanto para la construcción de grandes centrales hidroeléctricas como de pequeñas, mini y micro. El recurso hidrológico se encuentra distribuido alrededor de todo el país en las 1471 cuencas hidrográficas, agrupadas en 37 regiones hidrológicas [36]. De acuerdo con el atlas del recurso hídrico del inventario nacional de energías limpias [37] la mayor parte de las plantas generadoras de electricidad que utilizan este recurso se encuentran ubicadas en la región centro del país (incluyendo oriente y occidente) y se extienden a la sección cercana de la región noroeste. Las grandes centrales hidroeléctricas se localizan en las regiones hidrológicas administrativas IV Balsas, VIII Lerma Santiago y XI Frontera Sur [38].

Por último, la biomasa potencial para la generación energética se encuentra disponible en todo el territorio nacional; es el tipo de ésta el que cambia según la región y que será acorde a los recursos animales y vegetales disponibles y aprovechados en las actividades agropecuarias. Por ejemplo, el Atlas Nacional de Biomasa [39], muestra que en gran parte del altiplano se cuenta con recurso residual de la ganadería bovina (estiércol) y es posible emplear esta base de datos para encontrar zonas con recurso residual agropecuario de otro tipo o recurso como residuos industriales y urbanos que también pueden ser aptos para su aprovechamiento en un esquema de generación de energía. También los residuos sólidos urbanos son aprovechados en estos esquemas.

En el diseño de un esquema de generación de energía a partir de fuentes renovables, es importante establecer la ubicación geográfica del consumidor debido a que esta definirá los recursos energéticos disponibles. En la primera sección de este capítulo se definió que los estados de mayor participación siderúrgica son: Michoacán, Coahuila y Veracruz, por lo que, en los siguientes párrafos se, describirá el potencial energético de cada uno de estos estados tomando en consideración la información relacionada con las regiones con mayores

potenciales de aprovechamiento de los distintos recursos energéticos y algunos casos de éxito de aplicación reportados en la prensa.

Comenzando con Michoacán, estado de mayor actividad siderúrgica, el Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL) reporta que, hasta el año 2016, la entidad contaba con desarrollo energético en materia de Hidráulica (2,477.06 GWh/año), Geotermia (1,647.78 GWh/año) y Biomasa (22.75 GWh/año), siendo la primera tecnología la que representa casi el 60% de la generación renovable del estado. El Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2018-2032 [38] en el estado existen centrales 13 hidroeléctricas y una central geotermoeléctrica (Los Azufres) además de que en el año 2015 se otorgaron concesiones para evaluar el recurso geotérmico en la entidad.

En cuestión de recurso solar, Zarco et. al [40] establece en su artículo para la revista pv magazine que el estado de Michoacán se encuentra entre los estados de recurso solar medio con una radiación global media diaria de 5.0 y 5.1 kWh/m<sup>2</sup>. Hasta la fecha, no se reporta algún proyecto de aprovechamiento en gran escala de este tipo de energía, pero, si se informa del uso del recurso en esquemas de generación distribuida para empresas, como es el caso reportado por el mismo autor de un sistema de generación de 249.60 kWp compuesto por 768 paneles de 325 W de potencia que proporciona energía eléctrica a la firma Resinas Sintéticas.

Por otra parte, Michoacán no se caracteriza por poseer un recurso eólico aprovechable para el establecimiento de grandes proyectos de generación eólica, sin embargo, existe el interés por establecer si es posible emplearlo para pequeños esquemas de generación. Este interés se muestra en el artículo de la Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico [41] en la que se menciona que el especialista Norberto García Barriga de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo establece que podría existir un recurso "modesto" que podría ser de utilidad para proveer electricidad a comunidades alejadas.

Coahuila, segundo estado de mayor producción siderúrgica, cuenta con un excelente potencial solar. De acuerdo con el gobierno estatal citado en la nota de Vázquez [42], la entidad cuenta con el primer lugar en materia de capacidad instalada para la producción de energía solar fotovoltaica, sustentado en un potencial de radiación solar del orden de los 5.4 kWh/m<sup>2</sup>, grandes extensiones de terreno libres de uso y una red de interconexión para la energía generada. Muñoz [43] establece que la Asociación Mexicana de Energía Solar (Asolmex) comentó que en 2018 el estado generaba el 50% de la energía solar fotovoltaica generada por los miembros de su asociación con una producción de 1000 MW dividida en tres proyectos. De acuerdo con la Secretaría de Energía [44], el estado es el hogar del parque solar más grande de Latinoamérica diseñada e instalada por la compañía italiana Enel y cuya capacidad es de 754 MW, con una producción anual de 1,700 GWh repartida en 2.3 millones de paneles fotovoltaicos que ocupan una extensión de 2400 hectáreas. El aprovechamiento del recurso continuará con proyectos como el reportado por González [45] quien señala que un parque solar de 64 hectáreas será instalado en el municipio de Parras de la Fuente en el estado, el cuál llevará el nombre de "FV Palia I" y generará 27 MW para uso residencial, industrial y comercial.

Por otra parte, Valdés [46] reporta, basándose en la información compartida por el vocero de la AMDEE (Asociación Mexicana de Energía Eólica) que Coahuila se encuentra entre los cinco estados de mayor generación eólica. Balderas [47] menciona en su nota para Cobertura 360 que el inventario Nacional de Energías Limpias establece que el estado tiene un potencial para generación de energía eólica de 1494 GWh/año que representa el 19.78% del potencial en generación eólico de todo el país. La entidad cuenta con dos parques eólicos operando con una capacidad instalada de 396 MW [46]. Uno de estos proyectos es el parque eólico "Eólica de Coahuila" que se encontrará en los municipios de General Cepeda y Ramos Arizpe y que la página web del proyecto [48] y del Banco de Desarrollo de América del Norte[49] (quienes financian su instalación) afirma que abarcará una extensión de poco más de 4700 hectáreas y una potencia instalada de 199.5 MW cuya energía generada será adquirida por Industrias Peñoles, parte del sector metalúrgico pero con operaciones enfocadas a la metalurgia extractiva.

El resto de los recursos en materia de energías renovables en Coahuila no han sido tan ampliamente aprovechados debido a la baja disponibilidad de estos. No existen plantas geotermoeléctricas y la única hidráulica en operación es la presa binacional de la Amistad cuya capacidad instalada es de 66 MW y su generación anual (en el periodo 2010-2013) que es dividida entre ambas naciones a partes iguales, fue de casi 121 GWh/a [50] En el caso de la bioenergía, el INEL [51] estableció en el año 2016 de 13.78 GWh/a en el estado. El potencial del aprovechamiento de la biomasa en la entidad reside en los residuos ganaderos, por ejemplo, Corral [52] establece que Coahuila contaba en 2017 con casi 1,900,00 cabezas de ganado que generan 38,760 toneladas diarias de estiércol. En otro aspecto relacionado con el aprovechamiento de la biomasa, la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol) estima que la generación de residuos sólidos urbanos en la entidad se encuentra entre 501 y 1 000 miles de toneladas de los cuáles, aproximadamente entre el 90.1 y el 95 % son recolectados.

Veracruz, tercer estado en producción siderúrgica, contaba hasta el año 2016 con producción energética renovable en materia de biomasa e hidráulica. El Inventario Nacional de Energías Limpias (INEL) [53] marca generaciones de 582.71 GWh/a y 575 GW/a respectivamente. En el primer caso, el gobierno local ha mostrado interés en el aprovechamiento de la biomasa disponible por el cultivo de caña: en el año 2008 el gobernador formó una comisión especial cuya función fue la promoción de la producción de etanol a partir de cultivos de caña además el Prodesen [38] marca la importancia del estado en materia de bioenergía ya que, en conjunto con los estados de Jalisco y San Luis Potosí concentran el 53.9% de la capacidad total del país para aprovechar de la biomasa impulsado principalmente por el aprovechamiento de los residuos orgánicos de los ingenieros azucareros y que el INECC respalda en su catálogo de tecnología de biomasa a energía [54] como el sector industrial en el que se concentra la producción de energía a partir de este recurso con operaciones como la quema de bagazo en calderas de vapor con turbinas de contrapresión y la producción de biogás a partir de estiércol en lagunas anaeróbicas. Por otro lado, la Sedesol estima que en el estado se generan entre 2 001 y 6 000 miles de toneladas de RSU con una recolección de entre 90.1 y 95 %. En el segundo caso, el INEL en su atlas hidroeléctrico nacional [37] muestra que para el año 2016 se contaba con 12 centrales

hidroeléctricas las cuales, en su mayoría, se tratan de centrales de minihidroeléctricas y 5 de éstas se encuentran operando bajo un esquema de autoabastecimiento. IRENA [34] estableció que México cuenta con un gran potencial en materia de energía minihidráulica (3.2 GW aproximadamente) y los ríos de Veracruz son parte de este. De Luna [55] menciona en su nota periodística que el Prodesen proyecta la construcción de 27 centrales hidroeléctricas en un periodo de 14 años.

En términos de energía Solar, el estado de Veracruz no cuenta con el mejor recurso disponible en el país, sin embargo, es suficiente para establecer proyectos de energía solar fotovoltaica. De acuerdo con Morales [56], actualmente se encuentra en construcción una planta solar a manos de la empresa TW Solar en el municipio de Perote cuya capacidad instalada será de 100 MW, y se busca la instalación de una segunda planta de 250 MW en el mismo municipio. Otro recurso que se ha comenzado a explorar es el eólico, en el año 2015 La Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico [57] daba a conocer la construcción del parque eólico Papaloapan en el municipio de Alvarado que contaría con veinte aerogeneradores con capacidad de 40 MW distribuidos en una extensión de 1,732 hectáreas y en 2017 Vázquez [58] confirmaría esta información.

Por último, la entidad del Golfo no figura dentro de los estados de interés para la explotación del recurso geotérmico señaladas en el Prodesen.

Este fue un panorama general de los recursos energéticos que podrían estar disponibles para su aprovechamiento en esquemas de autoabastecimiento para la industria metalmeccánica siderúrgica en sus estados de mayor actividad económica. En general, todos los recursos renovables pueden ser aprovechados en distintos niveles en el sector, sin embargo el recurso solar resulta el más llamativo debido a su amplio potencial en al menos dos de las entidades federativas de interés.

En conjunto con lo establecido a lo largo de este capítulo, fue posible construir parte del entorno de aplicación de la idea del establecimiento de esquemas de generación de energía renovable en el sector metalmeccánico siderúrgico. Parte de la visión holística que se desea mantener a lo largo de esta investigación.

Con el abordaje técnico y económico de este sector, ahora ya es posible explorar cuáles son las tecnologías existentes y en desarrollo para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en las operaciones metalmeccánicas del hierro y el acero.

## **4. Tecnología para la generación de energía renovable aplicada al sector metalmeccánico**

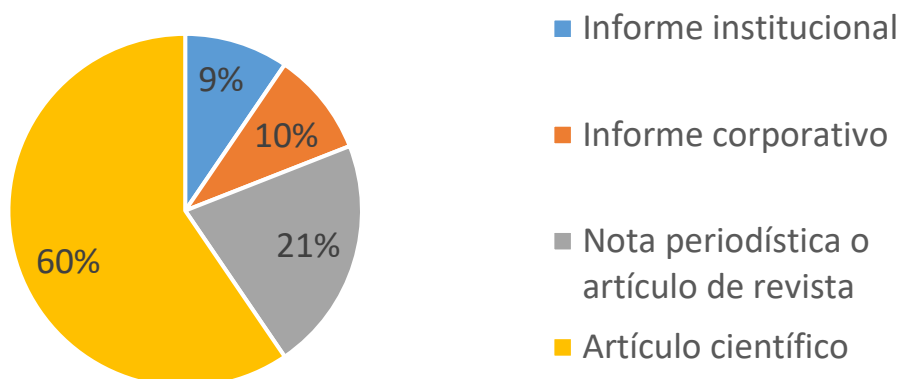
Una de las ideas base que podemos establecer hasta este momento, es que la industria metalmeccánica (e inclusive la metalúrgica en todo su conjunto de operaciones) se trata de una industria importante para el desarrollo tecnológico tanto en nuestro país como a nivel internacional. Además, es una industria de alta intensidad energética dada la naturaleza de las condiciones de proceso que involucran sus operaciones. En conjunto, ambos hechos apuntan a que el sector es clave en el marco del desarrollo sostenible. En específico, se espera que sea partícipe en los objetivos del desarrollo sostenible planteados por las Naciones Unidas y de las acciones planteadas por los países donde residen para cumplir con los tratados internacionales que miran hacia la reducción de las emisiones de efecto invernadero. Empresas como ArcelorMittal, Tenaris Tamsa y otras de las mencionadas en el capítulo anterior, se encuentran bajo el ojo y escrutinio internacional para que implementen acciones en sus procesos siderúrgicos que entren en concordancia con el combate al cambio climático. La tecnología empleada en sus procesos poco ha cambiado a lo largo del tiempo; y si bien, el remplazo de equipo por otros más eficientes en términos energéticos y de emisiones luce como una de las acciones clave, es deseable que se complemente con acciones que han aplicado otros sectores como es el uso de energías renovables o limpias. Haciendo de esto último un objetivo de interés para los productores de componentes metálicos más importantes de México y el mundo. Pero, aquí surge la pregunta ¿Es posible utilizar este tipo de energías en los procesos de la industria metalmeccánica en un sistema de autoconsumo? ¿Es viable tecnológicamente? En este capítulo se muestran algunos de los diversos casos que existen reportados en medios de difusión científica, corporativos y periodísticos en los que se ha intentado responder estas preguntas y que han llevado al desarrollo de nuevas tecnologías en materia de energía renovable.

### **4.1. *Clasificación de la literatura consultada***

Antes de comenzar con la presentación y análisis de los casos, se mencionan algunas características de la bibliografía consultada. Todas las referencias consideradas en esta investigación fueron aquellas en las que se encontró o bien un caso de éxito de aplicación de energía renovable en el sector metalmeccánico o relacionado con el sector (por ejemplo, aplicaciones en metalurgia extractiva) o un posible indicio de aplicación de estas tecnologías en el sector. También, aquellas que aportan algún dato que pudiese ser de interés para la aplicación de energías renovables y que queda fuera de la temática de los dos capítulos anteriores. Cabe destacar que lo presentado aquí abarca sólo a la literatura reportada en español e inglés, por lo que si hubiese reportes en otros idiomas estos han quedado descartados.

Es posible clasificar la literatura en cuatro grupos: artículos de investigación científica (no se realiza división entre ciencia básica y ciencia aplicada o ingeniería), informes institucionales o bien de organizaciones no empresariales, informes empresariales (principalmente aquellos orientados hacia el impacto ambiental o desarrollo sostenible de las empresas) y, por último, notas periodísticas o artículos de revistas no científicas. En la Figura

20 se presenta una ponderación sencilla de la representación porcentual de cada tipo de referencia bibliográfica dentro de la base de datos de un total de 30 fuentes consultadas. Como puede notarse, la mayor parte de la información encontrada se encuentra reportada en artículos científicos.



Fuente: Elaboración propia.

*Figura 20. Tipo de referencia bibliográficas consultadas y su contribución porcentual.*

Los artículos científicos consultados profundizan en dos aspectos diferentes: investigaciones de ciencia básica que buscan responder si es posible aplicar este tipo de energía desde un punto de vista tecnológico, realizando estudios por ejemplo de modelación como en el caso de Rodríguez et al. [59] o bien aplicando la tecnología como los casos reportados por Fernández et. al. [60]. Por otra parte, existen investigaciones que consideran la calidad metalúrgica de los productos obtenidos, aplicando pruebas de dureza, metalografía, entre otras, como en el caso reportado por García et. al [61], aspecto importante ya que estas investigaciones permiten validar si la calidad de las piezas fabricadas empleando energía renovable se ve afectada positiva o negativamente. En particular, este último tipo de investigaciones se encuentran enfocadas en el aprovechamiento de la energía solar térmica. En general, es en este tipo de energía en el que se enfocan la mayor parte de las investigaciones científicas consultadas, seguido por el aprovechamiento de la biomasa. Por otra parte, sólo un mínimo porcentaje de estas investigaciones concluyen en un prototipo o planta piloto.

En contraste, las notas periodísticas y los informes corporativos presentan casos de éxito aplicados en la industria tanto en operación como en pruebas piloto. Entonces, si bien la mayoría de las posibles aplicaciones se encuentran en fase experimental, la presencia de este segundo tipo de información señala interés por las entidades que comprenden al sector en aplicar esquemas de generación energética utilizando fuentes renovables.

Una vez revisado el panorama general de la literatura consultada para esta investigación, se procede a la profundización de la información.



#### **4.2. Aspectos relevantes nacionales e internacionales de la literatura consultada.**

La IRENA establece en su informe *Potential for industry*[62] el potencial de aplicación de las energías renovables en el sector manufacturero. En términos de energía térmica, la organización clasifica las actividades relacionadas con el sector metalmeccánico o siderúrgico como aplicaciones de alta temperatura. Considerando esto, además de las tecnologías existentes hasta el momento de elaboración del informe, se vislumbra un panorama poco prometedor para el sector puesto que el enfoque que las industrias manufactureras han dado al uso de las energías como la solar y la bioenergía ha sido a procesos de baja y media temperatura como son los asociados, por ejemplo, a la fabricación de alimentos. A pesar de ello, en el texto se menciona la posibilidad de utilizar tecnologías como la quema directa de carbón vegetal o biomasa en el sector. Entonces, una oportunidad para la bioenergía se comienza a observar aquí. ¿Qué ocurre con el resto de los tipos de energía provenientes de fuentes renovables?

Bajo el contexto de lo planteado en este informe y de la información proporcionada por Vega et. al [35] en el año 2014, la energía geotérmica como proveedora del calor necesario para los procesos metalmeccánicos parece tener bajo potencial. En primera instancia, se encuentra la limitante asociada a la distancia entre el proveedor y el consumidor puesto que entre mayor sea ésta se vuelve más complicado el transferir el recurso geotérmico sin pérdidas de temperatura. Por otra parte, están las limitantes tecnológicas dadas de forma intrínseca por el sector metalmeccánico: los requerimientos de temperatura superan la capacidad de proveerla del recurso geotérmico aplicado a procesos térmicos (baja y media entalpía) además de que, de existir una posible aplicación como podría ser el precalentamiento de cargas en fundición, el recurso geotérmico no podría entrar en contacto con los materiales al ser corrosivo, lo que implica adecuaciones. En el caso del recurso geotérmico de alta entalpía, se destina principalmente la producción de electricidad y considerando que actualmente México ocupa el tercer lugar de producción de energía geotermoeléctrica el enfoque en el uso de este recurso es claro. Por esa razón, la alternativa viable para el aprovechamiento de este tipo de energía renovable sería el suministrar parte de la electricidad generada en estas centrales a través de convenios industriales lo que beneficiaría principalmente a las industrias cercanas al recurso geotérmico de alta temperatura ubicada en su mayoría en la zona volcánica del país, como es el caso de la industria del sector en Michoacán y Guadalajara. A pesar de esto, aún se buscan potenciales de aplicación de este tipo de energía en algún punto de la cadena de producción siderúrgica, como es el uso de hidrógeno producido en centrales geotérmicas para la reducción del mineral de hierro y sustituir con ello al alto horno, procesos de alta intensidad de emisiones. Sin embargo, estas alternativas no se exploran aquí debido a que el enfoque principal de este trabajo son los procesos metalmeccánicos, aunque para otro tipo de fuentes de energía, mencionaremos casos de éxito en operaciones de metalurgia extractiva cuya aplicación si pudiese ser trasladada a las operaciones descritas en los módulos del primer capítulo de este trabajo.

Continuando con el listado de opciones posibles de generación de energía con fuentes renovables se revisa el caso de la energía hidroeléctrica. El informe de la IRENA[62]

establece que, en países como Islandia, Noruega y Brasil, los fundidores de aluminio ubican sus industrias cerca de centrales hidroeléctricas porque les proveen de energía barata y de forma constante. Entonces, la principal opción de aplicación de este tipo de energía yace en el suministro de electricidad bajo la condición geográfica de existir cercanía entre la fuente y la empresa metalmeccánica, similar a lo propuesto para la energía geotérmica. Si bien el caso hace referencia a industria no ferrosa, esto se podría aplicar también a la industria metalmeccánica del hierro y del acero, considerando los factores de escala correspondientes puesto que, como ya se mencionó, la fundición de estos metales implica un consumo energético distinto.

En forma paralela, la industria metalúrgica también conserva un papel importante en el desarrollo y fabricación de la tecnología necesaria para la generación de energía por medio de fuentes renovables o limpias. Sin el suministro adecuado de aleaciones, los proyectos energéticos no podrían concretarse. Un claro ejemplo de ello es la alta dependencia material de los generadores de energía geotérmica al acero inoxidable puesto que las condiciones de operación proporcionan un medio corrosivo que daña la vida útil de la metalografía de la planta. Otro papel importante de este material en el sector se ubica en la energía eólica: el director de *British Stainless Steel Association*, Nigel Ward [63], estableció el alto potencial de la industria del acero inoxidable ante el aumento progresivo del uso de energías alternativas como la eólica y la nuclear. Es así como la energía eólica ha comenzado a ingresar en el abastecimiento de energía eléctrica para el sector metalúrgico. La planta industrial Montpellier en Iowa, E.U.A. que procesa 1.4 millones de toneladas de chatarra de acero para la fabricación de productos como alambre y placa, plantea que para el año 2021 la planta funcionará al 100% con energía renovable, en específico, con energía generada a partir de aerogeneradores de los parques eólicos de la compañía MidAmerican Energy [64]. Además de proyecciones o proyectos futuros como el mencionado, existen ya casos de aplicación como el reportado por ArcelorMittal en su primer reporte de acción climática [65] mencionando que cuentan con un sistema de autoabastecimiento de energía en Ghent, Bélgica, con 10 aerogeneradores (de capacidad no establecida) que suministran energía a su planta ubicada en el lugar.

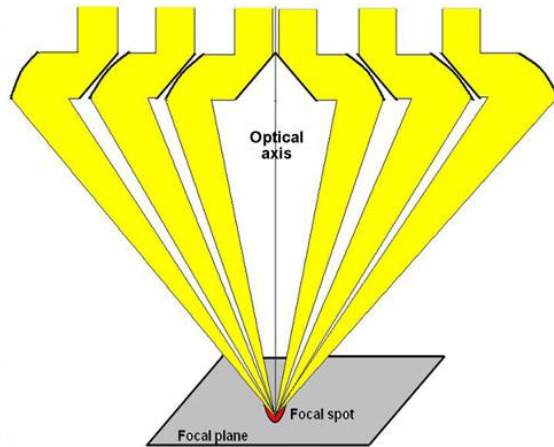
A pesar de lo mencionado en el informe de la IRENA, existen múltiples avances en aprovechamiento de la energía solar térmica y fotovoltaica. En el primer caso, Fernández et al. [60] mencionan en su trabajo recopilatorio que las investigaciones asociadas al uso de energía solar térmica en el área de la metalurgia y los materiales data del siglo pasado cuando se logró fundir metales como el hierro (base del acero) cuyo punto de fusión es cercano a los 1600 °C. Inclusive, para el año 2010 se logró alcanzar el punto de fusión del platino de 1768°C. Con la exploración del uso de esta energía en el sector metalúrgico también han surgido aplicaciones en el área de la metalurgia extractiva. Por ejemplo, se plantea su aplicación (acoplada también a un esquema de generación solar fotovoltaico) en la obtención de aluminio primario a partir del proceso Hall-Herault; proceso electroquímico energéticamente intensivo. Esta gama de posibilidades en cuestión de temperaturas de operación hace surgir la pregunta ¿Será posible aplicar esta tecnología a los procesos metalmeccánicos? En principio, y de acuerdo con los antecedentes históricos, se podría asumir

que presenta potencial de aplicación en las operaciones del módulo de fundición, sin embargo, se deben explorar a profundidad esta y otras opciones.

La energía solar térmica puede ser aprovechada en el procesamiento de metales con una alta eficiencia energética debido al amplio espectro de absorción de energía de los metales, lo que hace que este tipo de energía sea competitiva en aplicaciones de alta temperatura: mostrando gran potencial en el área de tratamientos térmicos, procesos de modificación de superficies e, inclusive, el sinterizado de piezas metálicas (operación no considerada en los módulos de este trabajo) Por ejemplo, Kaddou y Abdul-Latif [60] estudiaron la aplicación de la concentración solar para el relevado de esfuerzos. También, en la década de los noventas el equipo de Rodríguez et al. ya se encontraba realizando investigaciones enfocadas en el endurecimiento de aceros empleando energía solar térmica concentrada, tanto del punto de vista de modelamiento matemático por medio de elemento finito [59] como del experimental mediante el endurecimiento superficial de acero [66]. Otra investigación de interés en materia de tratamientos térmicos fue la realizada por Llorente et al. [67] quienes en el año 2006 desarrollaron un concentrador solar de doble reflexión con lentes Fresnel para el tratamiento térmico de aceros con un factor de concentración de 1000x (Figura 21), lo que se traduce en una densidad máxima de potencia de  $100 \text{ W/cm}^2$  en el foco ante una irradiación solar de  $1000 \text{ W/m}^2$  y con un diámetro de foco de 20 mm. Uno de los puntos más importantes de esta investigación yace en la caracterización de la distribución de temperatura lograda en el foco para poder decidir qué tipos de tratamientos térmicos se pueden aplicar, lo que los llevó a seleccionar como candidato al tratamiento de temple y revenido en piezas cilíndricas de acero al carbono que son desplazadas con respecto al eje óptico durante el tratamiento y cuyas dimensiones en diámetro son de 20 mm como máximo y una altura máxima de 100 mm. Se midió la calidad metalúrgica y se estableció que se logró endurecimiento tanto superficial como del material en bulto. Algunas de las ventajas establecidas por Llorente et al. de este concentrador son: el tamaño, bajo costo y fácil acceso al punto focal, sin embargo, no se proporciona información técnico-financiera que respalde esta aseveración.

Una de las ventajas que podría ofrecer el uso de energía solar térmica en las operaciones de tratamientos térmicos es que ha sido posible trabajar con atmósferas controladas que impiden la oxidación del material tratado o bien que aportan un elemento químico para alguna reacción de endurecimiento superficial y que son particularmente empleadas en algunos hornos de resistencia eléctrica. Esta oportunidad tecnológica se aprovecha en investigaciones como la llevada a cabo por Rodríguez et al [68] que consistió en el nitrurado de alta temperatura ( $900^{\circ}$ - $1200^{\circ}$  °C) de la aleación Ti6Al4V en una cámara con atmósfera reactiva colocada en una instalación solar de bajo costo basada en lentes Fresnel con una densidad máxima de potencia de  $250 \text{ W/cm}^2$  en su foco. En esta misma investigación se realiza una comparativa entre el nitrurado convencional en horno eléctrico tubular y el realizado con energía solar concentrada, concluyendo en una reducción importante del tiempo necesario de nitrurado para alcanzar las mismas propiedades mecánicas (reducción de hasta un 97%). Si bien el material tratado no es base hierro, este

éxito abre una ventana de exploración para la aplicación de tratamientos de nitrurado en aceros.



Fuente: Fotografía y diagrama de Llorente et. al [67].

Figura 21. Fotografía del concentrador solar empleado por Llorente et al y esquema que ilustra la concentración solar en el dispositivo.

Un caso de éxito similar al anterior se reporta en la investigación de Fernández et al. [69] que consistió en el revestimiento de acero 4140 (piezas de 35 mm de diámetro y alturas entre 15,25 y 35 mm) con aleación de níquel en polvo empleando concentración solar y una atmósfera no oxidante. En términos metalúrgicos, el resultado fue un recubrimiento de buena calidad. La experimentación fue realizada en la Plataforma Solar de Almeria (PSA) al sureste de España, en un horno de eje horizontal con una potencia de 60 kW. En este caso de éxito se rastrea problemas con el uso de densidades de potencia de alrededor de los  $250 \text{ W/cm}^2$  (utilizada en la aplicación anterior) que puede favorecer la alteración de las propiedades del acero y no sólo del recubrimiento, por ello se recomiendan potencias entre los 600 y  $800 \text{ W/cm}^2$ . Es así como se plantea con esta investigación, la modificación en los parámetros de operación de un sistema de generación de energía limpia para autoconsumo en beneficio de la calidad de las piezas, dando un paso importante de la pregunta ¿es posible? al planteamiento de medidas de mejora de proceso.

En contraste, una de las desventajas del uso de energía solar térmica es que, si bien los metales cuentan con un amplio espectro de absorción, también cuentan con una alta reflectancia que podría complicar el calentamiento lo que se debería combatir con medidas como el ennegrecido de las superficies de las piezas como se ha llevado a cabo en la investigación de Karalis et. al (2005) [70] al cubrir con pintura negra piezas de aluminio 7075-T6 soldadas exitosamente en un concentrador solar de 2 kW.

Profundizando en las aplicaciones posibles en el módulo de fundición, la investigación de Selvaraj et al.[71] propone una solución interesante para el precalentamiento de la carga<sup>24</sup>. El precalentamiento de la carga en los procesos de fundición es una operación

<sup>24</sup> El término utilizado en el medio metalúrgico para hacer referencia al material a fundir.

importante para reducir el consumo de energía en la fundición de chatarra o material proveniente de metalurgia extractiva primaria. De acuerdo con Beeley et al.[72] en el precalentamiento se evapora la humedad y las sustancias orgánicas (como pinturas y aceites) de la superficie de las piezas que componen la carga; además, desde el punto de vista energético, se reduce la cantidad de energía consumida en el horno principal ya que se evita elevar la temperatura del material desde la temperatura ambiente hasta por arriba de su punto de fusión partiendo el calentamiento desde una temperatura por lo menos por arriba de los 100 °C. Selvaraj et al. decidieron explorar la aplicación de colectores solares parabólicos (tecnología capaz de lograr una temperatura por arriba de los 400 °C) en esta etapa de la cadena de producción de piezas fundidas. En su estudio, se ha logrado aplicar esta tecnología para el precalentamiento de chatarra metálica hasta temperaturas cercanas a los 160 °C con una eficiencia máxima del 70% y una mínima del 40% asociada al espesor de la chatarra procesada. Además, el diseño y aplicación durante esta investigación se acompaña de cálculos que muestran un ahorro del 8% del consumo total de energía en los procesos de fundición de la planta que fungió como sitio de aplicación, ubicada en Pollachi, India.

También, en la investigación de Fernández et al.[60] menciona que la energía solar térmica concentrada presenta una relación costo/eficiencia competitiva ante la gama de tecnologías existentes para aplicaciones industriales que emplean haces de alta energía como las implicadas en los módulos de soldadura y de corte discutidos en el primer capítulo de esta investigación. En la investigación de Romero et al. [73] se establece que en un experimento llevado a cabo en el horno de solar PROMES-CNR ubicado en Romen- Odeillo, Francia, se ha logrado soldar acero de herramienta e inoxidable en diferentes configuraciones geométricas<sup>25</sup> con un haz de energía solar concentrada que logró una temperatura local en el metal de poco más de 3500 °C. La concentración solar se realizó con un colector parabólico cuya densidad de potencia es de 16 MW/m<sup>2</sup> mientras el recurso solar varió entre 500 y 990 W/m<sup>2</sup>. La velocidad de soldado que se logró emplear fue de entre 0.3 mm/s y 1.2 mm/s. Otros casos de éxito en soldadura es el ya mencionado anteriormente por Karalis et. al (2005) [70] con el soldado de aluminio y el reportado por el equipo también de Romero et. al. [74] en el que se realiza el soldado de placa de Ti6Al4V en las instalaciones de Romen-Odeillo, logrando encontrar una condición de variables de operación para una soldadura libre de defectos (1000 W/m<sup>2</sup> y una velocidad de soldado de 0.15 mm/s). Entonces, no hay una limitación relacionada con la temperatura en la aplicación de esta tecnología en procesos de soldadura, sin embargo Fernández et al. [60] plantean que para el caso de las tecnologías de unión, la energía solar concentrada podría no ser aplicable en industrias de la manufactura que trabajen 24 horas los 365 días del año como es el caso de la industria automotriz. Sin embargo, se propone su uso en la fabricación de productos de alto valor agregado o de producción limitada, lo que se podría extender para prácticamente todas las operaciones exploradas aquí.

---

<sup>25</sup> Con el término "configuraciones geométricas", se hace referencia a la forma final de la pieza soldada..

Como parte adicional, se enlistan en la Tabla 14, dos investigaciones más que implican otros casos de éxito de aplicación de la energía solar térmica concentrada pero que se encuentran fuera de los módulos de interés establecidos en el primer capítulo.

Tabla 14. Algunas investigaciones relevantes adicionales relacionadas con el aprovechamiento de la energía solar térmica.

Autores	Tipo de horno solar	Investigación	Referencias.
<b>García et al.</b>	Concentrador parabólico de eje vertical de 2 kW en PROMES–CNRS Four Solaire (Font Romeu-Odeillo, France)	Sinterización de espumas de titanio, logrado a una temperatura menor y en tiempo más corto que el método convencional. Se midió la calidad de los materiales obtenidos y resultó ser óptimo para aplicaciones de ingeniería de tejidos.	[61]
<b>Kováčik, J., et al</b>	Concentrador solar de eje vertical con una potencia que puede superar los 5 kW a una razón de concentración por arriba de los 6000 kW. Horno solar ubicado en Plataforma Solar de Almería, España.	Sinterización de titanio en una atmósfera inerte argón a temperaturas entre 1192 y 1572 °C por hasta 30 min Se midió la calidad del material obtenido, encontrado ventajas como baja porosidad y desventajas como el encogimiento axial a altas temperaturas debido a problemas de transferencia de calor.	[75]

Si bien, se alcanza a vislumbrar varias oportunidades tecnológicas para la aplicación de la energía solar térmica, existen algunas desventajas específicas de su uso que han sido ya mencionadas pero también algunas transversales a todos los posibles proyectos de ingeniería que busquen incursionar en sistemas de autoabastecimiento de energía térmica por este medio: la intermitencia ya inherente al recurso solar que limita su potencial a horas pico, ocasiona que la competitividad de las siderúrgicas o manufactureras que funcionen con este tipo de energía no sea la misma que aquellas que cuentan con un suministro convencional de energía. Además, otro factor importante que ocasionaría la caída de la productividad es el hecho de que estas tecnologías procesan una cantidad de material hasta 5 veces menor que las tecnologías convencionales como plantea Fernández et al.[60] para el caso de la extracción de aluminio, que si bien no es un proceso metalmecánico se puede extender esta desventaja a los procesos que si son parte de este conjunto y que se confirma con las dimensiones de las piezas trabajadas en algunas de estas aplicaciones. Son estos motivos los que han ocasionado que esta tecnología sea probada a nivel laboratorio y aún no sea explorada a nivel industrial. Hasta el momento de realización de esta investigación, no se ha encontrado alguna nota periodística o informe industrial que muestre el interés de alguna siderúrgica o metalmecánica en la aplicación de alguna de estas tecnologías. ¿Enfrentará este mismo problema la tecnología solar fotovoltaica?

A diferencia de la energía solar térmica, la fotovoltaica cuenta con algunos casos de éxito del acoplamiento de esquemas de generación eléctrica para el sector metalmecánico. De acuerdo con Kelley [76] en Nueva Zelanda, por ejemplo, se ha instalado un parque solar con 1016 paneles solares de 310 W y una extensión total de 1660 m<sup>2</sup> para abastecer de energía a una fundidora ubicada en Thames, perteneciente a la compañía A&G Price bajo un esquema híbrido que almacena energía en baterías. Esto con el objetivo de reducir su consumo

monetario eléctrico anual en \$100,000 además de vender parte de la energía no utilizada a la red de suministro del país.

En E.U.A., de acuerdo con Plunger et al. [77], Midwest Metal Products, una fundidora de acero y hierro se encuentra funcionando por completo con energía solar fotovoltaica, es decir, por este medio suministra el 100% de su carga base. Esta empresa procesa mediante calentamiento por inducción alrededor de 1,270 kg de material por carga, especializándose tanto en componentes de alta demanda como en piezas de producción ocasional. La carga energética anual de la fundidora es de aproximadamente 2.7 MW. A partir de las condiciones establecidas en un programa energético local, la empresa se volvió el consumidor principal de 4 parques solares que iniciaron su operación en febrero del 2018. Desde aquel momento *Midwest Metal Products* ha podido vender energía excedente a la red nacional estadounidense, lo que otorga una ventaja adicional a la implementación de estos esquemas de generación de energía. Además, reporta que no han presentado problemas con la calidad y cantidad de la energía suministrada por los parques.

La empresa más importante en materia siderúrgica a nivel internacional, ArcelorMittal, no se ha quedado atrás con la búsqueda de la aplicación de energía solar fotovoltaica en sus procesos extractivos y metalmecánicos. Middelbeek [78] plantea en su nota periodística que las políticas alemanas asociadas a cambios en la matriz energética a afectado directamente a las industrias de alta intensidad energética como es el caso de la siderúrgica. Durante el año 2013, Arcelormittal Alemania enfrentaba problemas ante la imposición de un impuesto asociado al consumo de energía renovable y, también, frente a la desnuclearización del país que apunta sustituir la energía generada por centrales nucleares por energía renovable. Ambas acciones representaban un riesgo para poder producir acero a precios competitivos lo que impulsaría a la corporación a buscar soluciones basadas en el nuevo tipo de energía prioritario; soluciones que se trasladarían a otras de sus sedes a nivel internacional. De acuerdo con su *Revisión integrada anual del año 2018* [79], ArcelorMittal cuenta con 15 hectáreas de paneles solares (de potencia desconocida) en Eos-sur-Mer, Francia. Por otra parte, en el año 2018, se ha llegado a un acuerdo en España para obtener energía de dos granjas solares cuya generación anual se esperaba que sea de 8.8 GWh. Por el momento, no cuenta con proyectos ya instalados en su sede mexicana, pero, hay otras empresas en el territorio nacional que ya han mostrado interés por aprovechar los recursos energéticos del país.

En México, Camargo [80] reporta que la siderúrgica Deacero (identificada en el capítulo anterior como el tercer principal productor de acero en el país) ha firmado un contrato por 20 años con la firma energética IEnova para que le sea suministrada energía limpia proveniente de un parque solar de 100 MW llamado *Prima Solar* y ubicado en Caborca, Sonora. Se plantea que la central proveerá el 100% de su capacidad a la productora de acero. Cuando el parque alcance operación comercial podrá producir más de 500 MW de energía renovable y 141 MW adicionales se encontrarán bajo construcción. De forma complementaria, y de acuerdo con el artículo escrito por Mentado [81], Deacero fue la primera empresa del sector industrial mexicano en participar, de manera directa y sin intermediarios en el Mercado Eléctrico Mayorista como usuario calificado tras firmar un

contrato con el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Articulación realizada ante el interés de la empresa por adquirir energía eléctrica a precios competitivos y proveniente de fuentes de energía renovables.

Otro caso nacional es el reportado por Zarco et al. [82] en la revista *pv magazine* para la empresa Gerdau Corsa que también tiene una participación importante en el sector siderúrgico mexicano; la empresa anunció en el 2019 que su planta ubicada en Tultitlán operará al 100% de su capacidad con energía solar fotovoltaica a finales de ese año. Para ello la compañía firmó un acuerdo con ENGIE para adquirir energía de una central solar al norte de Sonora mediante una inversión de 111 millones de dólares. La central se encuentra equipada con 400 paneles con una capacidad total de generación de 100 MW, con los que cubrirán la demanda de fábrica y el excedente lo inyectarán a la red. El 90% del consumo energético de la planta se destina al proceso extractivo.

Es así como la energía solar fotovoltaica presenta un amplio potencial de aplicación, confirmado por casos de éxito nacionales e internacionales. Continuando con el listado, se explorar la posible contribución de la bio-energía en el sector metalmeccánico.

Uno de los aspectos que hacen al uso de la energía proveniente de la biomasa como uno de los de mayor interés para ampliar la matriz energética es la capacidad que ofrece para el aprovechamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos o bien de los residuos industriales. Por ello, industrias intensivas en materia de residuos orgánicos como la industria alimenticia, han puesto interés en el diseño e implementación de sistemas de autoabastecimiento de energía basados en biomasa. En contraste, la industria siderúrgica y específicamente el sector metalmeccánico no se tratan de actividades económicas intensivas en este tipo de residuos por lo que, en principio, de encontrarse interesados en implementar este esquema de generación energética la energía primaria tendrá que provenir de fuentes externas; lo que se confirma en algunas de las investigaciones que se citarán posteriormente. Sin embargo, comienzan a aparecer tecnologías que podrían aprovechar la bio-energía con un enfoque distinto, basado en los residuos del proceso de fabricación del acero. Ambas alternativas se exploran en los siguientes casos.

Estudios como el realizado por Elsayed et al. [83] ya han explorado las posibles aplicaciones de la energía basada en biomasa para el sector siderúrgico, pero, con enfoque en la fabricación del acero, es decir en la metalurgia extractiva. Elsayed et al. recopila en su investigación los potenciales de aplicación en las áreas de coquización, sinterización y alto horno. En este último caso, por ejemplo, sugiere la sustitución parcial del coque metalúrgico por biomasa. Dentro de las conclusiones de su investigación menciona que las opciones aún no pueden competir económicamente con los combustibles convencionales, además sugiere que debe existir una colaboración entre los sectores bio-industriales y el sector siderúrgico. A pesar de ello, existe ya interés industrial por disminuir la intensidad de emisiones de la fabricación de acero mediante el uso de la bioenergía.

De acuerdo con la revisión integral anual del 2018 [79] y el reporte de acción climática de ArcelorMittal[65], esta corporación se encuentra interesada en la sustitución del coque metalúrgico por combustibles como carbón pulverizado en sus procesos extractivos



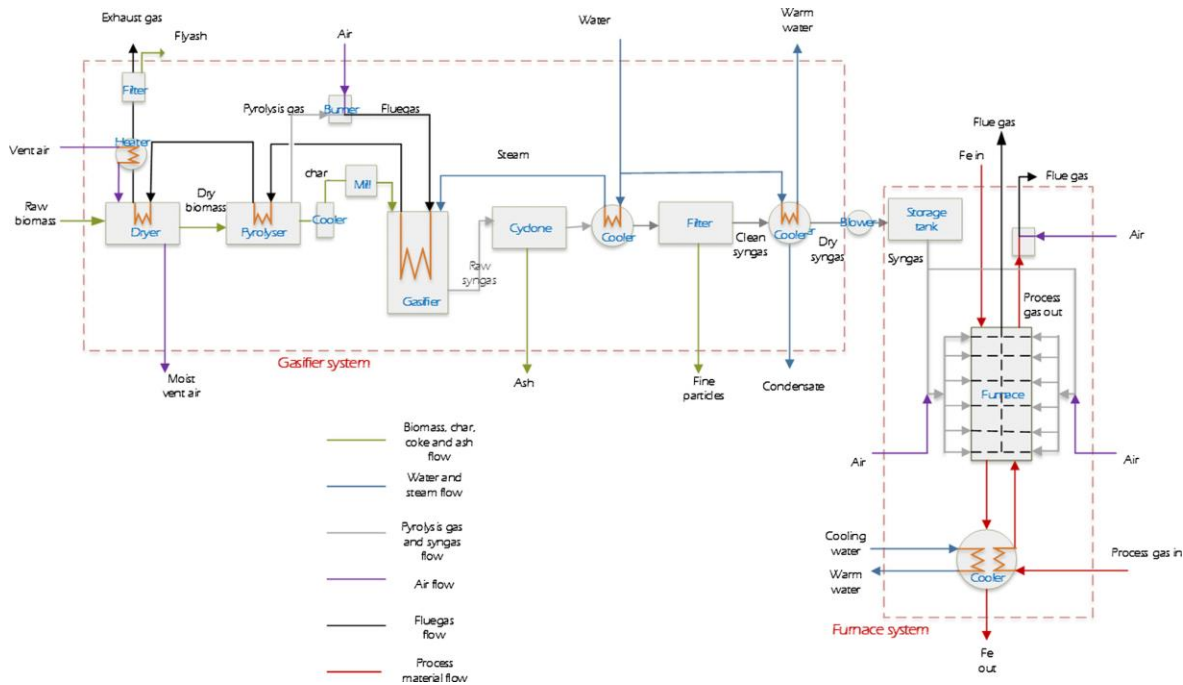
para reducir el impacto ambiental asociado a la liberación de emisiones. Para ello implementa acciones basadas en la "ruta circular del carbono", es decir, en el uso del carbono de desecho proveniente de sus plantas industriales (como es la biomasa residual y los plásticos) para reintroducirlo en la operación del alto horno y, lo que es aún más interesante, en la recuperación de masa orgánica residual del propio alto horno: hecho que implicaría disminuir la obtención de recursos de fuentes externas. Por ejemplo, en un proyecto conjunto con LanzaTech, se ha instalado una demostración a escala industrial en Gent, Bélgica de un proceso para la conversión del monóxido de carbono proveniente del alto horno en bio-etanol a partir de su bioprocesamiento. También, la tecnología IGAR desarrollada por la compañía en Dunkirk, reforma el carbono proveniente de los gases del alto horno para producir un agente reductor que se reintroduce al proceso y participe en la reacción metalúrgica. Por otra parte, dentro de las acciones tomadas empleando biomasa de fuentes externas, el proyecto Torero en Gent, ha sustituido parte del carbón metalúrgico utilizado en el alto horno por biomasa proveniente de residuos forestales.

En cuestión de consumo energético y de emisiones, la parte extractiva de la siderurgia es la gobernante y de ello proviene el interés de tomar acción en materia de bioenergía para esta operación. ¿Qué ocurre en el caso de las operaciones metalmeccánicas? En principio, se podría plantear la opción de emplear una fracción de los biocombustibles generados de los residuos del alto horno para cubrir la demanda térmica de las operaciones de tratamientos térmicos y conformado mecánico. Opción que tendría que ser analizada una vez que los proyectos se encuentren consolidados y sus primeros objetivos alcanzados. Además de ello, existe la oportunidad de emplear biocombustibles gaseosos como sustitución del gas natural suministrado para las operaciones metalmeccánicas.

El gas de síntesis (syngas) presenta un gran potencial para utilizarse en los hornos continuos de recalentamiento para el conformado mecánico o bien para tratamientos térmicos. Algunos estudios han comenzado a surgir en línea con este enfoque y trabajando en temáticas como la afectación de la calidad metalúrgica de las piezas sometidas a procesos térmicos en hornos alimentados con este tipo de biocombustible. Por ejemplo, una de las preocupaciones es que las impurezas que contiene el combustible pudieran causar corrosión en las piezas procesadas de acero, es por ello que en la investigación de Liu et al. [84] se realiza el modelado termodinámico del efecto de estas impurezas a lo largo de las distintas zonas de calentamiento de un horno continuo.

Posteriormente, Gunarathne et al. en el año 2016 [85] presenta un modelado del acoplamiento de un sistema de suministro de gas de síntesis a un horno de tratamiento térmico de polvo de hierro (Figura 22) utilizando el software Aspen Plus. Tomando como base en un horno de cadena (o continuo) de la planta Hogänäs de Suiza en el que el polvo es sometido a un recocido en una atmósfera reductora. El horno cuenta con una capacidad de aproximadamente 3 ton/hora; el polvo es calentado hasta una temperatura de 900 °C con un consumo de energía estimado de 1.1 MW, lo que se traduce en un consumo de 100 Nm<sup>3</sup>/h de gas natural (proveniente de la red nacional) y un flujo de gas efluente de 50-90 Nm<sup>3</sup>/h. El gas de síntesis es generado a partir del proceso Cortus WoodRool® que consta de las etapas de secado, pirólisis y gasificación de biomasa que, para este caso, proviene de residuos

forestales. Se plantean diversos escenarios, en los que se destaca la implementación de la recuperación de calor de baja y alta temperatura de los gases efluentes del horno para mejorar la eficiencia energética del proceso de fabricación de gas de síntesis y de la eficiencia energética total que, para el mejor caso se espera sea del 32% con una reducción en emisiones de 74 kg CO<sub>2</sub>/ton de acero. Las variables de operación de la generación del gas de síntesis se comprobaron con datos experimentales (del proceso sin acoplarse al horno). De entre las conclusiones más importantes establecidas en la investigación se destaca que el proceso puede llevarse a cabo sin cambios mayores en la tecnología del horno, de combustión y de extracción de los gases de efluente. El mayor reto será la renovación del sistema de quemadores y la introducción del sistema de recuperación de calor de los gases de combustión.

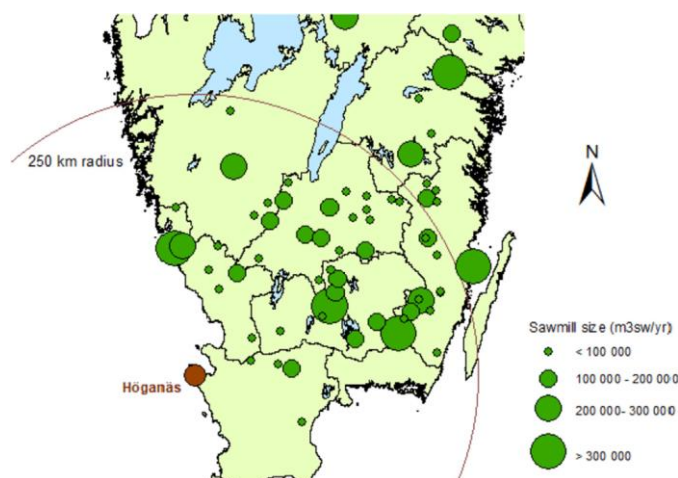


Fuente: Diagrama de Gunarathne et al. [85].

Figura 22. Diagrama general del modelo de generación de energía por medio de gas de síntesis para un horno de tratamiento térmico de polvo de acero.

La investigación en esta planta fue continuada por Nwachukwu et al. en el año 2020 [86] con la evaluación de alternativas de aplicación de biomasa tomando como base otro horno continuo para el recocido del polvo de hierro que opera a 900 °C con una demanda energética de 10.9 MW. En específico se consideran dos escenarios: la incorporación de un sistema de generación de syngas en la empresa siderúrgica para suministrar el horno de recocido (similar a lo establecido por Gunarathne et al.) o bien el suministro de bio-SNG por parte de una empresa de procesamiento de madera. Ambos casos obtienen la biomasa a procesar de residuos forestales y se considera la cadena de suministro completa al considerar un radio de influencia (como se muestra en la Figura 23) retomando la investigación anterior para proponer la recuperación de calor de los gases de efluente que compensa la necesidad de calor para producir el propio Syngas. El uso de bio-syngas es más económicamente

atractivo al tener los costos de capital más bajos. En el caso de bio-SNG, un tamaño adecuado de producción podría abatir los costos de capital. Los autores otorgan con su metodología un modelo para la evaluación de otras opciones de biomasa que podría plantearse para el caso mexicano.



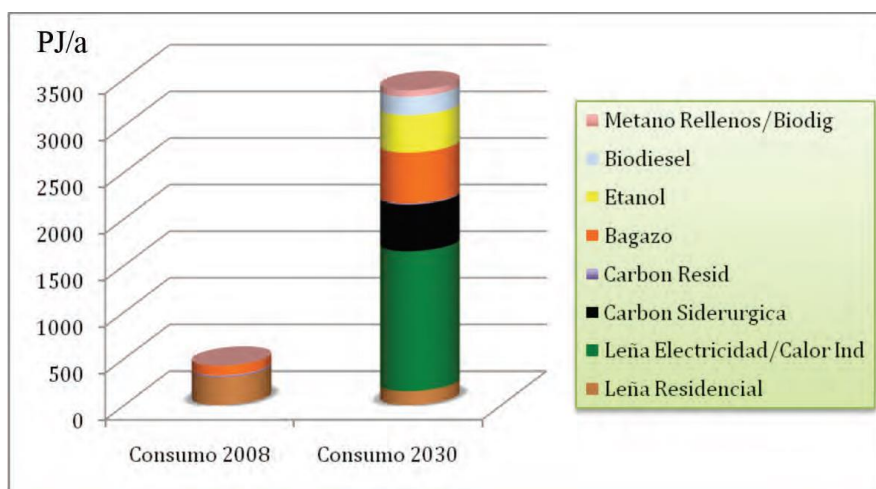
Fuente: Nwachukwu et al [33].

Figura 23. Distribución de los aserraderos en un radio de 250 km con respecto a la planta de polvo de acero en Höganäs.<sup>26</sup>

Hasta el momento en el que se realiza esta investigación, no se ha encontrado un caso nacional de acoplamiento de bioenergía en el sector siderúrgico o metalmeccánico. Sin embargo, si se considera su posible aplicación en algunos informes. De acuerdo con La Red Mexicana de Bioenergía A.C. (REMBIO) a través de lo descrito por Prehn et. al, [87], en México el carbón vegetal no se destina a los procesos siderúrgicos. Establece que el elevar la calidad del carbón vegetal podría promover su uso industrial, substituyendo importaciones de coque metalúrgico y mitigando emisiones de CO<sub>2</sub>. La REMBIO, ahora a través de lo planteado por Masera et al. [88] establece que los biocombustibles sólidos pueden ser utilizados como combustibles/reductores en las siderúrgicas y plantas de silicio, substituyendo al coque de carbón. También se menciona que en el estudio "México: estudio sobre la disminución de emisiones de carbono"(MEDEC) se plantea un escenario para la reducción de las emisiones en 477 MtCO<sub>2</sub>e para el año 2030 con respecto a una línea base. En el cual las intervenciones en bioenergía contribuyen con el 9.6% del total de la mitigación; de entre las acciones en esta área se encuentra la creación de hornos eficientes para la producción de carbón vegetal, con el fin de abastecer el 75% de la demanda de coque industrial. De cumplirse esta y el resto de las acciones planteadas, el consumo de bioenergía aumentaría y se diversificaría como se muestra en la Figura 24. Por otra parte, en el año 2016, la Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt [89] estableció que México solo podrá lograr sus metas de mitigación para 2030 y 2050 con una importante participación de la bioenergía en diversos sectores entre los que se encuentra el industrial. Las aplicaciones consideradas

<sup>26</sup> La capacidad de producción se representa con marcas verdes y en metros cúbicos que de madera aserrada por año.

en los distintos estudios incluyen el uso de pellets para generación de calor en la industria y el uso de carbón vegetal en la industria siderúrgica, entre otras. Estas intervenciones, muestran el genuino interés que existe en incorporar la bioenergía en la matriz energética del país y, en particular, en las operaciones extractivas de la industria siderúrgica, lo que abre las puertas para implementar investigaciones como las realizadas en Suiza.



Fuente: Gráfico de la Red Mexicana de Bioenergía A.C. [87].

Figura 24. Contribución actual y futura de las opciones bioenergéticas para la generación de energía en México.

En aspectos tecnológicos no específicos de algún tipo de fuente renovable de energía, existen algunos avances que pudieran facilitar la inclusión de las energías renovables en esquema de generación distribuida de energía. Por ejemplo, el departamento de investigación y desarrollo de Arcelormittal en Maizières Global, Francia, se ha enfocado en la producción de acero por vía electrolítica como sustitución a los procesos pirometalúrgicos convencionales [65]; tecnología de gran potencial energético puesto que se ha demostrado que requiere menor consumo energético que el asociado para la producción de hidrógeno a partir de la electrólisis de agua. Si bien esta tecnología aún se encuentra en desarrollo, en un futuro podría permitir el suministro de energía eléctrica por fuentes renovables cuyo impacto en términos de emisiones es menor al del coque metalúrgico empleado en los procesos de alto horno. Además, el esquema de generación se podría acoplar a los procesos metalmeccánicos de una siderúrgica, puesto que la mayor parte de la energía demandada será de origen eléctrico (mientras que las operaciones de tratamientos térmicos operen con hornos de resistencia eléctrica o inducción). Esto último también es aplicable a las siderúrgicas que obtienen su acero a partir de chatarra y empleando el horno de arco eléctrico.

Es así como en este capítulo se ha demostrado dos aspectos importantes. El primero es que existe tecnología en desarrollo para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en el sector siderúrgico-metalmeccánico; tecnología tanto en fase de laboratorio como en pruebas industriales y ya consolidada en sistemas de generación de energía distribuida. En segundo lugar, se resalta el interés de los participantes del sector por el aprovechamiento de este tipo de fuentes de energía en sus procesos, lo que abre oportunidad a su implementación.

## **5. Impactos ambientales relevantes del sector metalmecánico.**

Las emisiones contaminantes pueden ocasionar daños en el ambiente a nivel mundial nacional y local. En particular, a nivel local, se vuelven especialmente importantes los efectos a la salud de las personas que viven en el área aledaña a las fuentes de emisión o que laboran en éstas, considerando que las unidades industriales, sin importar el sector, son consideradas de fuentes fijas de contaminantes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) [90], establece que algunos de los efectos a la salud que se pueden estar asociados a las emisiones contaminantes atmosféricas son el cáncer de pulmón, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, infartos cardiovasculares y respiratorios y la ocurrencia de mortalidades en los grupos poblacionales más sensibles como los adultos mayores y los niños menores de 5 años. Por ello, el atender la reducción de estas emisiones se vuelve una estrategia de cuidado de la salud de los trabajadores y poblaciones aledañas a la unidad industrial.

Por otra parte, aun a nivel local, las emisiones contaminantes pueden implicar daños a los equipos de la propia cadena de producción. En muchas ocasiones, las especies químicas liberadas a la atmósfera son participes de fenómenos corrosivos que afectan a la metalografía de los equipos utilizados en la planta. Entonces, la reducción en la liberación de emisiones contaminantes puede tener también un efecto positivo en la vida útil del instrumental y equipo.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el uso de energías a partir de fuentes renovables y limpias de energía en el sector metalmecánico puede implicar una reducción de emisiones atmosféricas, lo que entonces podría impactar positivamente tanto en la mitigación del calentamiento global como en la salud de los trabajadores del sector y de las personas que habitan los estados de mayor actividad metalmecánica siderúrgica. Sin embargo, es importante reconocer cuáles son las emisiones asociadas al sector y que, además, pueden verse afectadas con la implementación de un sistema de generación de energía limpia. Tomando este aspecto como parte del desarrollo de la visión holística de este proyecto de investigación, en el presente capítulo se caracterizan las emisiones asociadas a la industria siderúrgica metalmecánica. Tomando como base la información proporcionada por el inventario nacional de emisiones, la CANACERO, la SEMARNAT y de los valores reportados en el software CES Edupak de emisiones específicas de CO<sub>2</sub> de los distintos procesos.

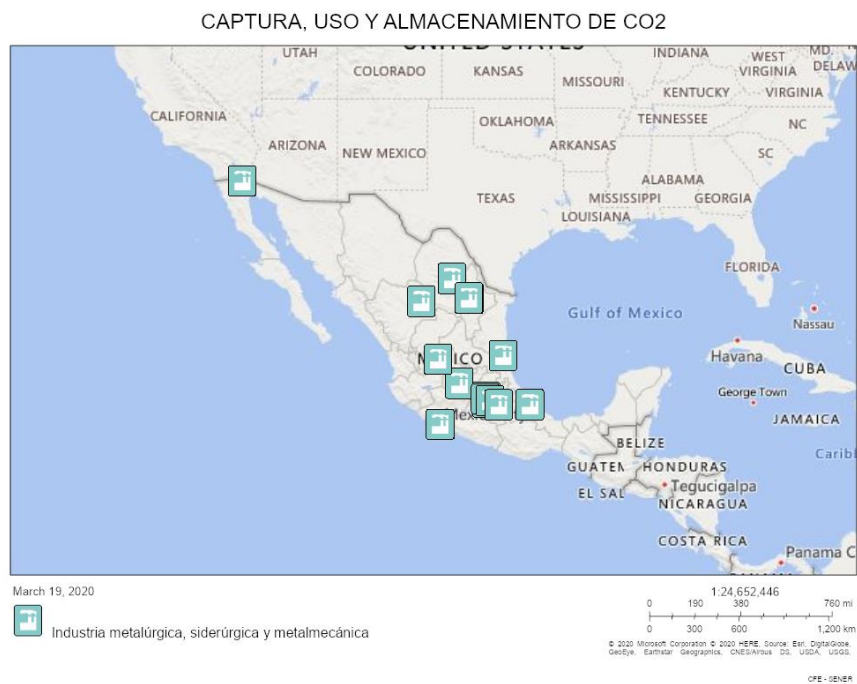
El Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero de 2015 [91] realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) reporta que la industria de la manufactura y de la construcción produce el 9.3 % de las emisiones de efecto invernadero generadas en México; el 0.6% de las emisiones está relacionado con el procesamiento de hierro y acero.

También, el INECC [92] establece algunos valores de emisiones de CO<sub>2</sub> para los procesos siderúrgicos, pero sólo desde el punto de vista extractivo. Por ejemplo, el sistema industrial alto horno-horno básico de oxígeno tiene una intensidad de emisión de 2.5 ton de

CO<sub>2</sub> por cada tonelada de arrabio líquido procesado (tAL), mientras que el uso del reciclaje de chatarra en el horno de arco eléctrico disminuye el impacto ambiental a 0.6 tCO<sub>2</sub>/tAL

Por otro lado, la CANACERO [30], establece que durante el periodo definido entre 2008 y 2016 el sector siderúrgico había reducido su intensidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en un 3%. Además, en el último año del periodo las emisiones del sector se ubicaron 29.5% por debajo del promedio mundial de 103 ton CO<sub>2</sub> por ton de arrabio [2], es decir, el sector operó con una intensidad de 72.62 ton de CO<sub>2</sub>/ton de arrabio. También la cámara asegura que, en el 2016, poco más de 220 mil toneladas de CO<sub>2</sub> fueron capturadas y enviadas a otros procesos industriales.

La SENER en su base de datos disponible al público sobre captura, uso y almacenamiento de CO<sub>2</sub> [93] identifica las principales fuentes de emisión en el sector industrial y las cataloga por tipo de industria con el fin de ofrecer un panorama de cuáles serían las unidades en las que se podría considerar colocar un esquema de aprovechamiento de este gas de efecto invernadero. La Secretaría considera que el sector de la *industria metalúrgica, siderúrgica y metalmecánica* (nombre que le asigna) es de interés para el uso de tecnología de aprovechamiento de CO<sub>2</sub> y muestra la ubicación de sus principales emisores (Figura 25) que coincide con los estados de mayor actividad siderúrgica identificados en el segundo capítulo de esta investigación.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Captura, Uso y Almacenamiento de CO<sub>2</sub> de SENER [93].

Figura 25. Mapa de fuentes de emisión fijas más importantes del sector de la Industria metalúrgica, siderúrgica y metalmecánica.

En los tres estados de mayor participación metalmeccánica del hierro y del acero, el sector contribuye de diferente forma a los inventarios de emisiones estatales según reporta el Programa de gestión para mejorar la calidad del aire (Proaire) de cada entidad. En Michoacán [94], el sector metalúrgico es el responsable del 24% de las emisiones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), del 7% de las emisiones de material particulado tanto del menor a 10 μm (PM<sub>10</sub>) como del menor a 2.5μm (PM<sub>2.5</sub>). Continuando, en el estado de Coahuila [95], la industria metalúrgica es considerada el primer emisor de partículas con porcentajes del 43% y 59% del total de emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> respectivamente. Además, este sector industrial funge como el segundo emisor de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y SO<sub>2</sub> con participaciones porcentuales del 21% y 2%, quedando detrás del primer emisor de ambos contaminantes, lugar que corresponde al sector de generación de energía eléctrica. También, es en este territorio en el que la industria metalúrgica es responsable del 8% de las emisiones de monóxido de carbono (CO).

En el caso del estado de Veracruz [90], el informe del programa cuantifica las emisiones tomando en cuenta la clasificación de subsectores industriales dada por INEGI y reportan los valores de emisiones de la Tabla 15 para los dos subsectores de interés para esta investigación. Esta información en particular aporta detalles importantes pues, es posible discernir entre las emisiones generadas principalmente por los procesos de extracción del acero y su primer procesamiento (industria metálica básica) y las producidas por la fabricación de productos metálicos que involucraría exclusivamente operaciones metalmeccánicas. Es posible notar que la contribución en emisiones del segundo grupo de operaciones es notablemente menor de acuerdo con las diferencias porcentuales calculadas y reportadas también en la Tabla 15; mostrando que para la mayoría de contaminantes (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Carbono negro o CN, CO, NO<sub>x</sub>, COV's, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>) las emisiones causadas exclusivamente por la fabricación de productos metálicos son menores al 1% de las generadas por la industria metálica básica (destacando el hecho de que las emisiones de carbono negro se consideran no significativas para las operaciones metalmeccánicas). Esto puede deberse a las características intrínsecas de los procesos, pues los procesos metalmeccánicos generarían emisiones principalmente de la quema de combustibles fósiles para operaciones como los tratamientos térmicos, que se realiza en volúmenes menores en comparación al uso de estos en los procesos extractivos de la industria metálica básica. Sin embargo, hay un aspecto a considerar: los valores numéricos reportados para la fabricación de productos metálicos aún representan grandes cantidades de emisiones, considerando que se tratan de toneladas emitidas por año en unidades hasta de miles de magnitud, como en el caso del CO<sub>2</sub>, o bien que pueden contribuir con más del 50% del sector completo considerando las cifras para las emisiones de SO<sub>2</sub>. Por ende, el subsector sigue representando un potencial importante de reducción de emisiones tanto en materia de volumen como de la perspectiva de coadyuvar en la descarbonización del sector industrial en este estado y a nivel nacional. Además, es importante recordar que las operaciones metalmeccánicas se encuentran involucradas también en el subsector de la industria metal básica, por lo que la implementación de estrategias de reducción de emisiones podría impactar positivamente en también en éste.

Tabla 15. Emisiones por subsector de interés en el estado de Veracruz.<sup>27</sup>

Subsector	Emisiones									
	ton/año									
	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	CN	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	COV's	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
<b>Industria metal básica</b>	64	23	4.9	7	269	302	390	10	7	407,412.00
<b>Fabricación de productos metálicos</b>	0.2	0.1	N/S	4.5	1.4	2.9	0.1	0.1	s/n	3,267.00
<b>Diferencia porcentual</b>	99.69	99.6	----	35.7	99.5	99.0	100.0	99.0	----	99.20

Fuente: Elaboración propia con información de Proaire de Veracruz [90].

De lo establecido en los reportes de Proaire, se concluye que los contaminantes más importantes son el material particulado y los gases como el SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO y CO<sub>2</sub>. Es importante analizar de que operaciones metalmecánicas provienen estas emisiones. Se pondrá particular atención en las emisiones de gases asociadas a la generación de la energía para estos procesos por lo que identificar las fuentes de material particulado no será prioritario pues, en su mayoría, proviene del desgaste de los materiales involucrados en la cadena de producción como se establecerá más adelante. En la Tabla 16, se enlistan algunos de estos procesos y se señala cuáles son las emisiones que generan cada uno de ellos de acuerdo con la SEMARNAT [12] y su *Guía para la elaboración de la cédula de operación anual de la industria metalúrgica*. Si bien, algunos de los impactos no se encuentran señalados para ciertos procesos, esto no los vuelve enteramente excluyentes de liberar estas emisiones pues, con investigaciones futuras o ajenas a lo reportado por la secretaría de gobierno, se podrían asociar estos impactos no contemplados a los procesos señalados; entonces, la información proporcionada funciona como una guía (principalmente cualitativa) de identificación de los impactos ambientales y no representa una identificación absoluta de los mismos. En los siguientes párrafos, se profundizará en algunos de los impactos ambientales por módulo de operaciones metalmecánicas definidos en el primer capítulo de esta investigación y tomando como base la investigación de SEMARNAT.

Durante la aplicación de los tratamientos térmicos, las emisiones generadas dependen tanto del combustible utilizado en el horno, del tipo de horno y de las condiciones de temperatura y tiempo dadas por el tipo de tratamiento térmico. Por lo que, la secretaría señala que los factores de emisión pueden variar considerablemente entre operaciones, inclusive, entre aquellas que implican la fabricación del mismo producto metálico. Durante la laminación en caliente, se estima que el elevar los materiales a la temperatura de trabajo puede generar emisiones de: NO<sub>x</sub> de entre 80 a 360 g/ton procesada de acero (ton acero), 0.3 a 600 g/ton acero de SO<sub>2</sub>, 5 a 850g/ton acero de CO y un máximo de hasta 6g/ton acero de hidrocarburos totales. No se reportan las emisiones de CO<sub>2</sub> para este proceso. En el caso del recocido de recristalización realizado después de la laminación en frío, se estima que el impacto ambiental puede variar dependiendo de si este se realice por lotes o de forma continua, en el primer caso se estiman emisiones de 0 a 41g/ton acero de SO<sub>2</sub> y de 9 a 900g/ton acero de NO<sub>x</sub>; en el recocido continuo las emisiones de NO<sub>x</sub> se conservan en el mismo nivel mientras que en el caso del SO<sub>2</sub> pueden conservarse también o pueden elevarse

<sup>27</sup> Se mantiene la notación N/S para aquellos valores que se reportan como "no significativo".



en casos extremos hasta un máximo en el rango de 194 g/ton acero; aspecto que podría parecer discrepante con respecto a los valores de energía consumida reportados por la misma entidad y que fueron mencionados en el primer capítulo pues se podría esperar que al requerir mayor energía calorífica, el recocido continuo implicara mayor generación de emisiones de gases contaminantes provenientes de la combustión y no sólo en "casos extremos". Otro tipo de emisiones que se ha identificado que provienen de la quema de combustibles para la aplicación de tratamientos térmicos son compuestos orgánicos como el benceno y el antraceno, así como metales pesados; emisiones que se han visto en reducción por el uso de gas natural. El suministro de energía renovable sí podría entonces repercutir positivamente en la reducción de emisiones directas.

En el caso de las operaciones exclusivamente de deformación plástica los impactos ambientales no implican liberación de gases. Durante la laminación en caliente per se, las emisiones a la atmósfera incluyen polvos generados en los trenes y emisiones fugitivas de aceite de lubricación, las cuales aumentan con la velocidad de procesado del material y el área de material en contacto con los rodillos. Por ende, la conexión de estas operaciones a sistemas de generación de energía limpia no tendrá un impacto importante sobre sus emisiones directas sino en sus emisiones indirectas relacionadas con su consumo energético y cuya cuantificación se encuentra fuera de los límites de este trabajo de investigación.

En cuanto a las operaciones de fundición, como se muestra en la Tabla 15, las emisiones liberadas dependerán del tipo de horno empleado pues de este depende el tipo de combustible suministrado para el calentamiento, aspecto que comparte con el módulo de tratamientos térmicos además del hecho de que el uso de energía renovable permitiría la reducción de sus emisiones directas. La SEMARNAT no reporta valores de rangos de emisiones para estas operaciones, pero sí identifica las especies químicas emitidas. En general, es posible encontrar emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y compuestos orgánicos volátiles (COV's) en los procesos que implican combustión (hornos de cubilote y reverbero) y en el horno de arco eléctrico; mientras que en la fundición por medio de horno de inducción únicamente se ha identificado la liberación de (COV's), lo cual implica una ventaja ante la idea de implementar una tecnología con la finalidad de reducir emisiones a la atmósfera y de efecto invernadero.

Para las operaciones pertenecientes a los módulos de corte y unión (soldadura), las emisiones de interés pueden provenir también de la quema de combustibles por lo que se esperaría la presencia de CO, CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> así como residuos de gases como son gas natural, etileno y argón. Sin embargo, es importante recordar de las características descritas para estos procesos al comienzo de esta investigación que no todas las operaciones de ambos módulos implican necesariamente la quema de combustibles como es el caso de la soldadura por arco eléctrico sumergido. Se podría establecer que su acoplamiento a sistemas de generación de energía renovable impactaría positivamente en sus emisiones directas o indirectas de acuerdo con el tipo de proceso empleado de este módulo.

Tabla 16. Algunas de las emisiones identificadas para distintos procesos metalmecánicos.

Operación metalmecánica	Tipo de emisión						
	Material Particulado	SO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	COV's	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>
Laminación en caliente (incluye elevación de la temperatura)	✓	✓	✓	✓			
Laminación en frío (incluye recocido de recristalización)	✓	✓		✓			
Fundición en horno de cubilote		✓	✓	✓	✓		✓
Fundición en hornos de reverbero			✓	✓	✓		✓
Fundición en hornos de inducción	✓				✓		✓
Fundición en horno de arco eléctrico			✓	✓	✓		✓
Corte y maquinado	✓		✓	✓		✓	✓
Tratamientos térmicos	✓	✓	✓	✓			✓
Soldadura	✓		✓	✓			✓

Fuente: Elaboración propia con información de SEMARNAT [12].

En otra instancia, el software CES Edupak 2018 [13] considera las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> dentro de su listado de eco-atributos asociados al procesamiento de los materiales. De acuerdo con el manual proporcionadas por el software, el valor para cada proceso representa el CO<sub>2</sub> producido de forma local por la operación el cual, a su vez, se encuentra asociado con: la operación de los equipos involucrados en el proceso, la energía consumida para mantener la industria en operación (iluminación, ventilación, compresores, etc.) y las emisiones relacionadas con la denominada energía "tácita" descrita por el desarrollador como la relacionada con la propia generación y suministro de la energía consumida por la unidad industrial. Dentro de los tres ejes contemplados, las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la operación de los equipos se estiman a partir de la energía requerida para el calentamiento del material y de la maquinaria a la temperatura de trabajo, y la empleada en la deformación de los materiales. En resumen, se podría plantear que los valores calculados para alimentar la base de datos considerarían tanto emisiones directas como indirectas de cada proceso metalmecánico, pero, no es posible hacer la disgregación de las cifras para indicar qué participación porcentual tiene cada uno de estos grupos en el valor reportado. Además, en el caso de los valores asociados a operaciones que implican el calentamiento del material, como en las operaciones de fundición, no se indica si éste se realiza a partir de la quema de combustibles o por inducción por lo que sólo queda establecer que la variación en las emisiones debido al tipo de tecnología usada se encuentra representada en los rangos que reporta el software.

En otro aspecto relacionado con el software, los valores reportados son estimaciones que consideran grandes volúmenes de producción empleando balances de entradas y salidas (input/output) basadas en algunos datos reportados por el sector industrial que son escalados y diferenciados para cada uno de los materiales de la base de datos empleando factores que consideren las propiedades de interés para el proceso de análisis, tales como el punto de fusión, la maquinabilidad, entre otras. Por ejemplo, si se cuenta con las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la fundición para algunas aleaciones de aluminio, se emplea este valor y se escala para aleaciones de hierro considerando que estas últimas poseen un punto de fusión mayor y

esto podría implicar que las emisiones sean mayores dado el aumento en el consumo de energía del proceso. Esto es extrapolable a pensar que, entre mayor sean las temperaturas de operación, los esfuerzos aplicados y el tiempo de procesamiento, mayores serán los consumos energéticos y, por ende, mayores serán las emisiones generadas por la operación.

Además, de acuerdo con la descripción del desarrollador del software, no es posible considerar que los factores de emisión reportados estén en términos de CO<sub>2</sub> equivalente ya que en las notas para el usuario no se menciona que se involúcren las emisiones de otros gases de efecto invernadero ni sus respectivos valores de poder de calentamiento global (GWP) en las estimaciones realizadas para las emisiones de CO<sub>2</sub>. Detalle que sería recomendable considerar en las actualizaciones futuras de la base de datos pues, como se estableció anteriormente en este capítulo, otros gases de efecto invernadero son liberados a la atmósfera como es el metano residual (CH<sub>4</sub>) proveniente de la quema de gas natural en las operaciones de tratamientos térmicos.

A pesar de las limitaciones descritas, los valores reportados por el software pueden funcionar para describir un panorama general en materia de emisiones para los procesos involucrados en el sector metalmeccánico. En la Tabla 17 se reportan rangos de intensidad de emisiones para aceros con distintos contenidos de carbono, procesados vía distintas operaciones metalmeccánicas. Estos datos permiten visualizar lo establecido con respecto a las estimaciones: entre mayor es el contenido de carbono del acero<sup>28</sup>, y por ende mayor su resistencia mecánica, mayor será la huella de carbono pues los procesos de deformación plástica, maquinado y desbastado necesitarán una mayor cantidad de energía para procesar estas aleaciones. En contraparte, entre mayor es el contenido de carbono, el punto de fusión de los aceros es menor lo que implica que la energía requerida para la fundición también es menor y por ende disminuirán las emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>. Otro aspecto relevante que se puede extraer de los datos reportados en esta tabla 16 es el hecho de que la operación metalmeccánica más intensiva en emisiones será el trefilado con huellas de carbono por arriba incluso que los procesos de fundición que pueden involucrar la quema de combustibles. Retomando lo discutido al principio de esta investigación, el trefilado es un proceso energéticamente intensivo, lo que explicaría sus altos niveles de emisiones.

Otro impacto ambiental que podría resultar de interés para el aprovechamiento de esquemas de generación de energía es el uso del agua en el sector. De acuerdo con la CANACERO [30], en el año 2016 el 27% del agua consumida en procesos de enfriamiento provenía de plantas de tratamiento, La SEMARNAT[12] también identifica el consumo de agua de enfriamiento en operaciones metalmeccánicas; por ejemplo, en el caso de la laminación en frío de aceros baja aleación en laminador tándem (exclusivamente para la etapa de deformación) reporta un consumo de agua de refrigeración de entre 5 y 6.5 m<sup>3</sup>, de agua desmineralizada para el dado de 0.0014 a 0.04. Además, para el mismo proceso reporta emisiones de aguas residuales de 0.003 – 0.01 m<sup>3</sup> y de agua de refrigeración de 0.003 – 0.01 m<sup>3</sup> ambos por tonelada de acero procesado. El agua residual en particular podría ofrecer un

---

<sup>28</sup> El contenido se indica en los últimos 2 dígitos de la notación para cada acero en centésimas de porcentaje. Es decir, el acero 1020 tendrá un contenido promedio de carbono de 0.2%

área de oportunidad para la generación de bioenergía, sin embargo, no se reporta la calidad de ésta en términos del contenido de materia orgánica que sería el recurso energético, ni de la presencia de elementos nocivos para la biodigestión que, dada la naturaleza de estos procesos, hay una gran probabilidad de que se encuentren agentes nocivos como metales pesados. Esto podría otorgar explicación al porqué no se han reportado casos en el capítulo anterior de aprovechamiento de agua residual de los procesos metalmecánicos para la generación de energía y se recurre mejor a adquirir recursos bioenergéticos desde sedes externas o de los procesos extractivos del acero.

Tabla 17. Emisiones de CO<sub>2</sub> para aceros al carbono con distintos contenidos del principal elemento de aleación procesados en operaciones metalmecánicas.

Proceso metalmecánico	Emisiones específicas de CO <sub>2</sub> por proceso							
	g/ton de material procesado							
	1020		1040		1060		1095	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>Fundición</b>	0.826	0.913	0.819	0.906	0.821	0.908	0.782	0.864
<b>Laminación/Forja</b>	0.199	0.22	0.233	0.258	0.245	0.271	0.25	0.276
<b>Extrusión</b>	0.377	0.416	0.446	0.492	0.469	0.519	0.48	0.53
<b>Trefilado</b>	1.35	1.5	1.61	1.78	1.7	1.88	1.75	1.93
<b>Maquinado grueso</b>	0.0623	0.0688	0.0674	0.0745	0.0692	0.0765	0.07	0.077
<b>Maquinado fino</b>	0.302	0.334	0.354	0.391	0.372	0.411	0.38	0.42
<b>Desbastado</b>	0.568	0.628	0.672	0.743	0.707	0.782	0.72	0.79

Fuente: Elaboración propia con información del software CES Edupak (Versión 2018) [13].

En conclusión, en este capítulo se han explorado algunos de los aspectos relevantes para la reducción de emisiones que podría lograrse con la implementación de esquemas de generación de energía renovable. Si bien algunos de los impactos positivos se podrán observar en las emisiones directas (en el caso de los módulos de tratamientos térmicos, de fundición y de unión por soldadura) teniendo una repercusión inicial a nivel local, en la mayoría de las operaciones que no involucren el calentamiento de las piezas durante su operación, este impacto se dará en sus emisiones indirectas. A pesar de ello, es importante aclarar que ambas acciones suman a la meta de reducción de emisiones y, por ello, no pueden perderse de vista.

## 6. Planteamiento de un caso problema de generación de energía limpia aplicada al sector metalmecánico mexicano.

Retomando el objetivo de la investigación y la metodología, a continuación, se propone un caso de estudio con el objetivo de consolidar lo establecido en los capítulos anteriores en un ejemplo de posible aplicación de las energías renovables en el sector metalmecánico siderúrgico y con el fin de comprobar la hipótesis de que, es posible plantear la implementación de un sistema de autoconsumo (bajo la modalidad de generación distribuida) por medio de energías limpias para una unidad de este sector industrial. Teniendo en cuenta que el objetivo de esta investigación estriba en realizar el análisis de factibilidad tecnológica (entorno técnico) para el empleo de energías renovables en la industria metalmecánica mexicana y efectuando una aproximación metodológica tipo *Bottom-up* de los consumos energéticos que se presentan en esa industria.

Desde una perspectiva tradicional de Administración de Proyectos de Ingeniería, lo que se plantea en el presente capítulo correspondería a algunas etapas del paquete de ingeniería conceptual [96], aunque, desde otra perspectiva de administración de proyectos, también pudiera corresponder a la primera compuerta (G1) de la metodología FEL (*Front-ending limit*) [97].

Los alcances de esta investigación no buscan dar una respuesta puntual o realizar la ingeniería de detalle para distintos casos de aplicación, puesto que ello es ajeno a los fines académicos que se persiguen, máxime considerando que los casos de aplicación requieren de información contextual y datos técnico-económicos específicos de la aplicación, lo cual usualmente es reservado a los tenedores de la aplicación y, por tanto, no es asequible en investigaciones académicas como la presente. Esta investigación pretende entonces definir un mecanismo de análisis y tener una prospectiva sobre la factibilidad y algunos beneficios de emplear energías limpias en el sector, es decir otorgar líneas de pensamiento para aquellos participantes en esta industria que busquen implementar esta idea.

### 6.1. *Construcción de un escenario base o tipo Business As Usual (BAU)*

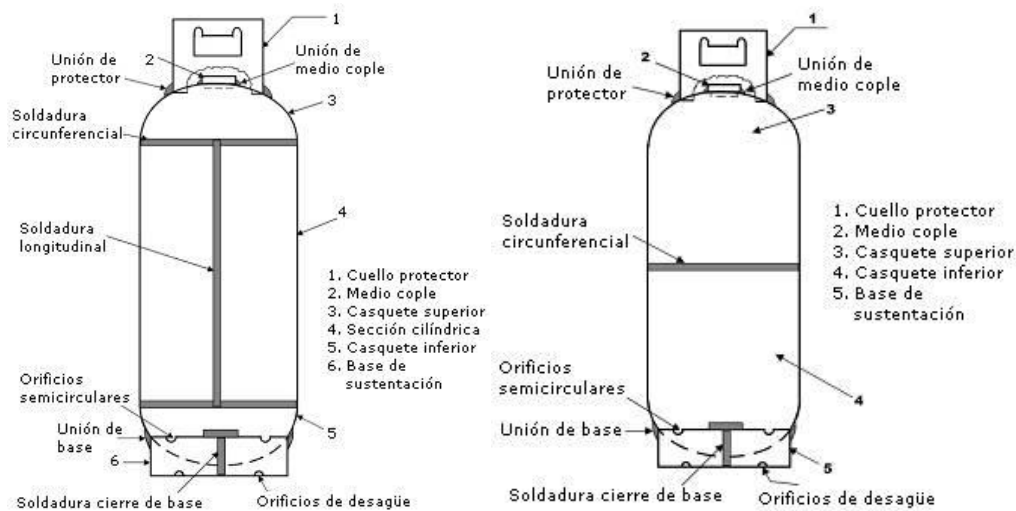
#### 6.1.1. Selección de materiales y operaciones involucradas.

Como primer paso, tomando en cuenta la información económica presentada en el segundo capítulo de esta investigación, se procede a seleccionar tres productos de la industria metalmecánica siderúrgica cuyas características o procesos de fabricación contaran con alguna particularidad del sector que pudiese resultar de interés, los cuáles son:

- *Varilla corrugada de acero para refuerzo de concreto*: Producto siderúrgico seleccionado pues se trata del más producido en el país como se estableció en el capítulo 3. De acuerdo con Martínez [98], se puede obtener a partir de tres tipos de procesamiento, uno de ellos es la laminación en caliente de palanquilla en un rango de temperaturas de operación de entre 1000 y 1200 °C. Cuando las dimensiones de las varillas ya han sido ajustadas, ésta se deja enfriar al aire.
- *Válvulas industriales de fundición gris*: Producto siderúrgico de colada seleccionado como representante de los procesos de fundición. Si bien estos no son responsables de una gran porción de la producción siderúrgica, en el tercer capítulo de esta investigación fue posible trazar el buen potencial que estas operaciones presentan

para poder ser adaptadas a un esquema de generación de energía renovable. Las válvulas se pueden producir a partir de la fundición en moldes de arena en verde.

- *Envases transportables de gas L.P.:* Producto siderúrgico elegido con el fin de considerar otras operaciones metalmeccánicas que han quedado fuera al enfocarse en la producción de varilla y que forman parte de la fabricación de este producto. En general, los también conocidos como cilindros transportables de gas L.P., son armados a partir de dos piezas embutidas y, a veces, de una tercera pieza de lámina doblada que son rectificadas y soldadas (principalmente mediante soldadura por arco eléctrico) para obtener cualquiera de las geometrías que se muestra en la Figura 26, siempre y cuando se trate de un cilindro clase 1. Posteriormente, son sometidos a un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos a 625°C y a operaciones de acabado final.



Fuente: Imágenes de la NOM-008-SESH/SCFI-2010.

Figura 26. Recipientes transportables para contener Gas L.P. clase 1 a) tipo común y b) tipo semicapsulado.

Con el fin de estimar un aproximado el consumo energético que podría conllevar la fabricación de estos productos, se recurre al software CES EDUPAK para consultar los posibles valores de energías específicas para los procesos unitarios involucrados. Dada la naturaleza de la base de datos del software, es necesario establecer cuál es el material del que se podrían encontrar fabricados los productos. Para ello, se recurrió a la normatividad nacional e internacional relacionada con la fabricación de éstos. Si bien algunas de las normas no señalan una composición química exacta para los aceros y fundiciones, si marcan las propiedades mecánicas que estos deben tener y estas pueden funcionar como criterio de selección. En la Tabla 18, se muestra la normatividad utilizada para cada producto y los materiales disponibles en la base de datos del software que fueron contemplados en concordancia con esa normatividad. Los materiales elegidos se basan en la disponibilidad de datos del software por lo que, de existir otros materiales compatibles con la normatividad estos son descartados.

El software otorga información del procesamiento de los materiales de acuerdo también a su condición de tratamiento térmico. Por ejemplo, para el acero 1015 existen

valores de intensidad energética, de otros indicadores y propiedades para cuando éste se encuentra en estado de recocido total o de normalizado. Esta separación es importante en términos de las operaciones de conformado mecánico puesto que, bajo aspectos teóricos que están fuera del límite de estudio de este trabajo, los aceros pertenecientes al segundo grupo consumirán mayor energía al ser deformados que los primeros. Para los casos de fabricación de varilla corrugada y de tanques de gas L.P. se tomaron en consideración los materiales en su estado de normalizado pues, este es el que más se acerca al estado en el cual se suele encontrar la materia prima que será sometida a deformación<sup>29</sup> y que es el procesamiento base de ambos productos. En contraste en el caso de las válvulas no fue necesario hacer una distinción entre materias primas procesadas de distinta manera puesto que los hierros, son principalmente obtenidos de procesos de fundición y directamente colados para formar las piezas, consecuentemente el software únicamente reporta datos de cada fundición en un solo estado. Aunado a ello, los rangos de energías específicas construidos de la selección de materiales se obtuvieron a partir de los mínimos y máximos absolutos del conjunto de datos por producto metalúrgico.

Tabla 18. Materiales seleccionados para cada producto con base en la normatividad.

<b>Producto</b>	<b>Normatividad</b>	<b>Materiales considerados</b>
<b>Varilla corrugada</b>	NMX-B-506-CANACERO-2011	Aceros de bajo y medio contenido de carbono denominación AISI-SAE 1015, 1020, 1030, 1040 y 1050
<b>Válvulas</b>	ASTM A126-95, Standard Specification for Gray Iron Castings for Valves, Flanges and Pipe Fitting.	Fundiciones grises con la denominación: EN GJLA XNiMn 13.7, EN GJL 100 EN GJL 150, EN GJL 200 EN GJL 250.
<b>Cilindros para gas LP</b>	NOM-008-SESH/SCFI-2010, Recipientes transportables para contener Gas L.P. Especificaciones de fabricación, materiales y métodos de prueba.	Aceros de medio contenido de carbono <sup>30</sup> con denominación AISI-SAE 1045 y 1030.

Fuente: Elaboración propia con información del software CES Edupak (Versión 2018) [13].

Por otra parte, para seleccionar los valores de interés de energía específica de procesamiento debe definirse las operaciones principales de procesamiento en cada uno de los productos y que serán las que se buscará suministrar con energía renovables. En la fabricación de la varilla corrugada, se considera la operación de laminación en caliente y el recalentamiento del material para llevarlo a su temperatura de operación. En cuanto a la fabricación de las válvulas, el proceso principal seleccionado es la fundición puesto que, como se estableció en el primer capítulo de esta investigación, dentro de una fundidora esta operación es la de mayor consumo energético. Por último, en la fabricación de recipientes transportables para gas se consideran las operaciones de embutido, soldadura y tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, otorgando así diversidad en el conjunto de operaciones

<sup>29</sup> El estado al que se hace referencia en este párrafo es a que la materia prima, principalmente palanquilla, fue sometida a laminado en caliente durante el proceso de fabricación.

<sup>30</sup> La NOM-008-SESH/SCFI-2010 se refiere a estos materiales como "aceros microaleados" concepto que en el lenguaje metalúrgico corresponde a aceros especiales con bajos contenidos de carbono pero que esta norma utiliza para referirse a aceros al carbono con contenidos bajos y medios del principal elemento de aleación.

analizadas. Sin embargo, no todos estos procesos se encuentran considerados dentro de la base de datos de CES Edupak, lo que ha llevado al uso de información reportada anteriormente por SEMARNAT y otras fuentes para el sector para realizar ajustes matemáticos lineales apoyados también en conocimiento metalúrgico.

El software, reporta un valor único de energía específica de procesamiento para los procesos de forja y laminación. La forja suele ser un proceso que se lleva a cabo en caliente, por lo que se infiere que la laminación considerada por el desarrollador también es en esta modalidad de conformado y el valor reportado incluiría tanto la energía consumida en la deformación como la empleada en el recalentamiento. Inclusive, al comparar los valores de energía específica con los reportados por SEMARNAT [12] estos son mayores hasta por casi 1.6 unidades. Es por lo que, se realiza un reajuste del rango de energía específica del software para disgregarlo y establecer cuánta energía se consumiría por kg de material procesado en cada una de las operaciones involucradas en el conformado en caliente. Conservando la contribución porcentual con la que cada operación participa en el consumo energético total del conformado en caliente de acuerdo con los valores reportados por SEMARNAT. En la Tabla 19 se muestra la comparación entre la numeraria reportada por ambas fuentes, así como los resultados para las energías específicas de recalentamiento y laminado en caliente que se considerarán para construir el BAU.

Tabla 19. Cálculo de la energía específica de recalentamiento y laminado en caliente.

Operación	SEMARNAT			
	Energía específica de procesamiento		Contribución porcentual en la energía consumida en el conformado en caliente	
	MJ/kg		%	
	Min	Max	Min	Max
<b>Recalentamiento</b>	1.1	2.2	83.59	83.97
<b>Laminado en caliente</b>	0.216	0.42	16.41	16.03
<b>Total</b>	1.316	2.62		
<b>CES EDUPAK</b>				
<b>Laminado/Forja</b>	2.92	4.1		
<b>REAJUSTE</b>				
<b>Recalentamiento</b>	2.4	3.4		
<b>Laminado</b>	0.5	0.7		

Fuente: Elaboración propia con información de la SEMARNAT [12] y del software CES Edupak (Versión 2018) [13].

Una vez que se cuenta con el valor de energía específica de recalentamiento, es posible partir de éste para establecer una aproximación del rango de esta propiedad para el relevado de esfuerzos, pues el software no reporta energías específicas del procesamiento por medio de tratamientos térmicos. Se calcula entonces la energía específica del relevado de esfuerzos a partir de un ajuste lineal tomando como base la diferencia en temperaturas de operación; se fija la temperatura de recalentamiento en su límite máximo de 1200 °C reportado por SEMARNAT [12] y confirmado por Vázquez [5] mientras que el material la temperatura de relevado de esfuerzos considerada es la reportada en la NOM-008-SESH/SCFI-2010 de 625°C. Es así como el rango de energía específica de recalentamiento



se multiplica por un factor de 0.52 para obtener el rango de energía específica de relevado de esfuerzos.

En el caso del proceso de fundición el valor de energía específica reportado en el software se mantiene sin reajuste. Se emplea también este valor para el caso de soldadura pues en este proceso el objetivo es también superar el punto de fusión del material, pero considerando el material de fabricación para los cilindros de gas L.P. El valor empleado inclusive, es similar al reportado en el caso de estudio para soldadura por arco eléctrico reportado por Shrivastava et al [22].

Otra de las operaciones que ha quedado fuera de lo considerado por el software es el embutido profundo implicado en la fabricación de tanques de gas. Para ello se recurre al rango de energía por caída de punzón reportado en la investigación de Cooper et al. [15] de 0.36 a 0.72 MJ. El autor asegura que el consumo de energía en cada caída del punzón es independiente de la cantidad de masa procesada por embutido, por lo que para este proceso podría carecer de sentido el calcular un valor de energía específica y mejor proceder directamente al cálculo del consumo energético en el proceso, sin embargo, se toma la decisión de si considerar un valor para preservar la metodología de cálculo de los consumos energéticos anteriores. Se obtiene entonces un rango de entre 0.05 y 0.11 MJ/kg considerando que el 25% de la masa total de los tanques de 30 kg (6.65 kg) es procesada por esta vía.

Dada la variedad de productos y de procesos involucrados, se plantea que la unidad industrial se tratara de una relaminadora - fundidora. Es decir, la planta no contará con procesos extractivos del acero y hierro, y se dedicará exclusivamente a operaciones metalmecánicas. Además, se plantea una base de cálculo de:

- 1000 toneladas de carga de acero para fabricación de varilla al año.
- 1300 kg de acero por carga de fundición (similar a lo reportado para la fundidora Mildwest). Considerando una cantidad de 5 cargas al mes, se obtiene una cantidad aproximada de 780 toneladas al año.
- 399 toneladas de acero procesado para la fabricación de tanques gas al año, lo que representa alrededor de 15,000 tanques fabricados de 30 kg de capacidad.

El establecimiento de las bases de cálculo permite finalizar el cálculo de los consumos energéticos anuales que se reportan en la Tabla 20. Se puede observar que las operaciones que demandan la mayor cantidad de energía son aquellas que implican una carga térmica para elevar la temperatura del material.

Por otra parte, como se estableció en el capítulo anterior, es importante explorar también los valores de las emisiones de CO<sub>2</sub> involucradas en las operaciones metalmecánicas consideradas en este caso de estudio. Para ello se sigue el mismo procedimiento que el llevado a cabo con los consumos energéticos anuales, partiendo de los datos del software CES Edupak y realizando algunas modificaciones a partir del resto de la bibliografía, particularizando en los valores para el relevado de esfuerzos. Los resultados muestran que las operaciones que involucran elevar la temperatura del material como es el recalentamiento y el tratamiento térmico de relevado de esfuerzos implican una mayor cantidad de emisiones liberadas.

Tabla 20. Rangos de energía específica de procesamiento y de consumo energético para cada uno de los procesos principales de fabricación de los productos seleccionados para el caso problema.

Producto	Proceso	Masa procesada anualmente	Energía específica de procesamiento		Consumo energético anual	
			MJ/kg de material procesado		MJ	
		Ton	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
<b>Varilla</b>	Laminación	1000	0.5	0.7	479,270.52	657,251.91
	Recalentamiento	1000	2.4	3.4	2,440,729.48	3,442,748.19
<b>Válvula</b>	Fundición	780	10.1	11.2	7,878,000	8,736,000
<b>Recipientes transportables para gas L.P.</b>	Embutido	399	0.05	0.11	21,600	43,200
	Soldadura	5.8	11	12.3	64,072.49	71,644.69
	Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos	399	0.6	1.2	239,400	478,800

Fuente: Elaboración propia con información del software CES Edupak (Versión 2018) [13] y fuentes diversas citadas anteriormente.

Tabla 21. Rangos de emisiones específicas de CO<sub>2</sub> de procesamiento y de emisiones de CO<sub>2</sub> para cada uno de los procesos principales de fabricación de los productos seleccionados para el caso de estudio.

Producto	Proceso	Masa Procesada anualmente	Emisiones específicas de CO <sub>2</sub>		Emisiones anuales de CO <sub>2</sub>	
			g/ton de material procesado		g	
		Ton	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
<b>Varilla</b>	Laminación	1000	0.209	0.301	209	301
	Recalentamiento	1000	7.9	1,335.5	7,856.1	1,335,540.88
<b>Válvula</b>	Fundición	780	0.751	0.843	585.8	657.5
<b>Recipientes transportables para gas L.P.</b>	Embutido	399	0.179	0.253	71.421	100.947
	Soldadura	5.8	0.751	0.843	4.4	4.9
	Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos	399	4.092	695.594	1,632.60	277,542.08

Fuente: Elaboración propia con información del software CES Edupak (Versión 2018) [13] y fuentes diversas citadas anteriormente.

Para cerrar la construcción de este escenario, ahora es posible establecer la contribución porcentual al consumo total metalmecánico de cada una de estas operaciones a partir de los consumos calculados. Pero, es posible aplicar un segundo reajuste lineal que nos indique porcentajes aproximados a las tendencias de consumo energético reportada en la bibliografía especializada consultada en el primer capítulo de esta investigación. Para que esto sea más sencillo el conjunto de operaciones completo se dividen en dos grupos basándose en dos referencias bibliográficas que los consideran en sus reportes de consumo energético y que a partir de sus datos es posible aplicar el reajuste:

1. Conformado mecánico: Incluye las operaciones de laminación en caliente (incluyendo el recalentamiento) y embutido. Su reajuste toma en cuenta las proporciones reportadas en la numeraria de la SEMARNAT [12].

2. Tratamientos térmicos y fundición: Incluye las operaciones de fundición, tratamiento térmico de relevado de esfuerzos y soldadura. Su reajuste toma en cuenta las proporciones reportadas en la numeraria de Pagone et al. [24].

Es así como se obtienen los porcentajes de consumo ajustados presentados en la Tabla 22. Debido a que los valores de consumo han sido trabajados en rangos, se obtienen dos casos distintos considerando para el primero aquellos valores mínimos y para el segundo los máximos. Para visualizar mejor la contribución porcentual al consumo total metalmecánico de cada una de estas operaciones y se trazan los gráficos de pastel correspondientes a las figuras 27 y 28.

Tabla 22. Porcentajes del consumo total de energía que representan cada uno de los procesos contemplados en la relaminadora planteada para el caso problema .

Proceso principal de fabricación	Porcentaje del consumo total de energía que representan.	
	%	
	Caso 1	Caso 2
Laminación en caliente	3.0	3.4
Recalentamiento	15.2	17.8
Fundición	50.2	47.2
Embutido	8.3	9.6
Soldadura	4.7	4.4
Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos,	18.7	17.6

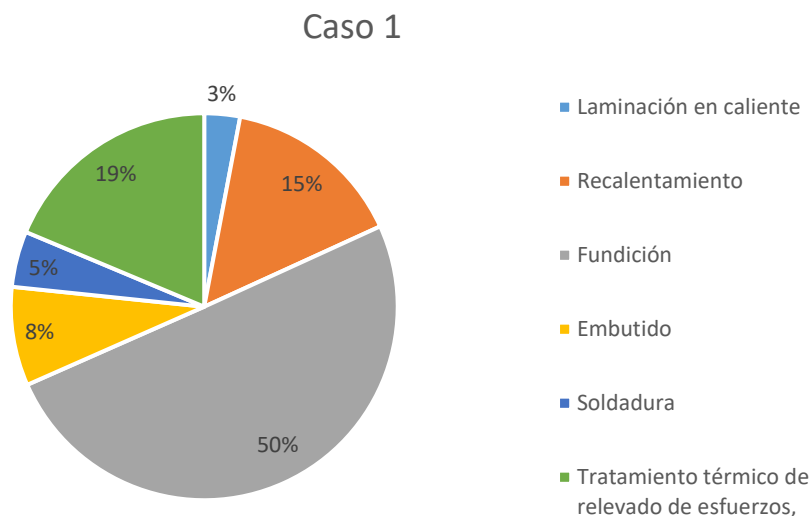


Figura 27 Gráfico de distribución porcentual de la energía en el caso problema planteado al considerar los valores de consumo energético anual por operación mínimos (Caso 1).

## Caso 2

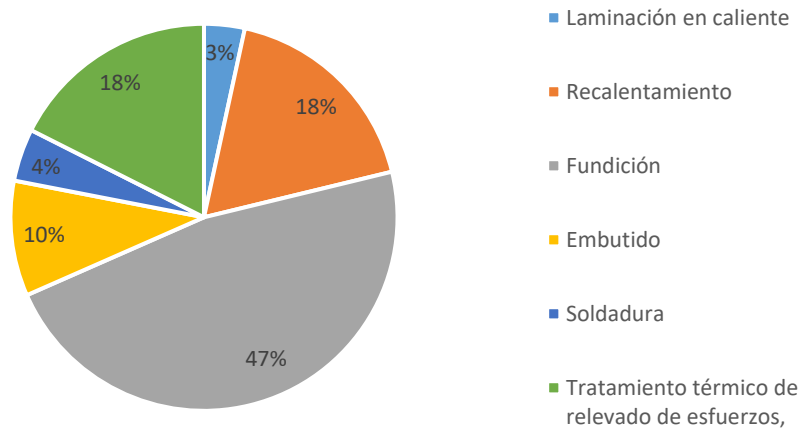


Figura 28. Gráfico de distribución porcentual de la energía en el caso problema planteado al considerar los valores de consumo energético anual por operación máximos (Caso 2).

Se puede observar que la mayor parte de la energía en las operaciones metalmeccánicas para este caso problema reajustado continúan siendo aquellas que implican consumos de cargas térmicas como la fundición, el tratamiento de relevado de esfuerzos y el recalentamiento. Mientras que las operaciones basadas principalmente en cargas eléctricas implican menores consumos de energía.

Este procedimiento de reajuste no se aplica para el caso de las emisiones debido a que no es posible basarse en la bibliografía consultada durante el capítulo 5, pues ésta no disgrega las emisiones totales de una siderúrgica o metalmeccánica por operación.

Una vez llevada a cabo la selección de los materiales y su asociación con valores de intensidad energética y de emisiones, se procede a definir el entorno geográfico en el que sería interesante colocar este caso problema hipotético

### 6.1.2. Selección del entorno geográfico

Ubicar el entorno geográfico y normativo aplicativo mexicano al caso de estudio de interés es de suma importancia para establecer los recursos energéticos disponibles y los requisitos normativos que deberá cumplir un proyecto de autoabastecimiento de energía. En este caso problema se emplea lo descrito en el segundo capítulo de esta investigación, tomando como base los estados de mayor participación del sector. De entre los tres principales, se decide plantear la ubicación geográfica del caso problema en Coahuila, pues, tiene una mayor cantidad de unidades participantes del sector que los dos estados restantes y, además, colinda con el estado de Nuevo León, quien también cuenta con un alto número de éstas y que lo hacen el cuarto estado de mayor participación metalmeccánica-siderúrgica. En específico se plantea que el municipio de Monclova sea el residente de la unidad industrial hipotética, municipio que en el INEGI [28] se trata de uno de los municipios de mayor actividad económica en el subsector siderúrgico.



## **6.2. Aspectos relevantes en el diseño del sistema de generación de energía renovable**

A partir de la ubicación geográfica, el radio de influencia y lo planteado en el segundo capítulo de esta investigación: los recursos disponibles para abastecer la demanda de este caso son principalmente el solar, el eólico, y la biomasa; lo que se puede comprobar con ayuda de la base de datos del Atlas nacional de Zonas con alto potencial de Energías Limpias (AZEL) [100], a partir de la cual se construyen los mapas señalados en las figuras 30 a 32. A pesar de que las referencias bibliográficas consultadas anteriormente resaltan el potencial de estos recursos en el estado, los mapas construidos demarcan algunas características limitantes.

En el caso del recurso solar, la zona delimitada por el radio de influencia abarca regiones de alta calidad con recurso de entre 5,500 y 6,249 Wh/m<sup>2</sup>/día con lugares de alto potencial en el que es posible construir sistemas de generación fotovoltaica con factores de planta entre 18% - 22% en las posiciones cercanas al municipio.

Por otra parte, en el caso eólico, dentro del radio influencia encontramos zonas de alta calidad de recurso cuyos valores de velocidad se encuentran entre 6 – 7.5 m/s, lo que se asocia con regiones de alto potencial en las que es posible construir sistemas de generación con factores de planta de entre 20% y 30% en posiciones cercanas al municipio y de 30% - 40% en posiciones lejanas. Una de las limitantes de este recurso con respecto al solar es que éste no se encuentra ampliamente distribuido en la zona delimitada por el radio de influencia, desfavoreciendo particularmente al municipio con apenas algunas áreas de recurso aprovechable.

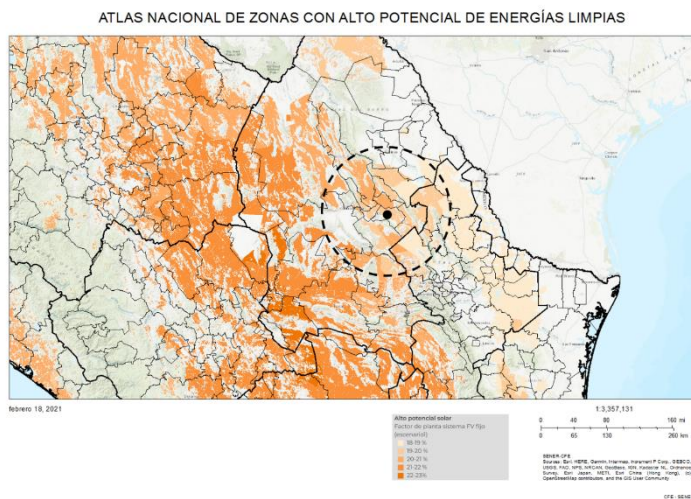
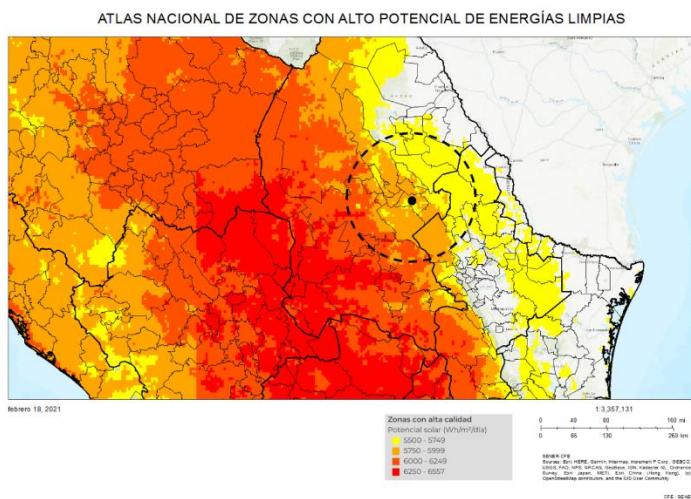
Por último, el AZEL muestra que el recurso basado en biomasa es el más limitado. Es posible ubicar puntos que pudieran suministrar residuos orgánicos industriales, o bien de residuos sólidos urbanos. Sin embargo, la cantidad limitada de puntos de colecta de estos residuos hacen que este sea el recurso renovable de menor interés.

Además de establecer los recursos renovables disponibles, para su acoplamiento como un sistema de generación de energía distribuida, es importante modularizar el caso problema. Es posible dividir entonces en un primer acercamiento al diseño del esquema de generación en los siguientes módulos:

- A. Generación de energía eléctrica para suministrar carga para los procesos de laminación en caliente, embutido, soldadura y fundición.
- B. Generación de energía térmica para suministrar carga para los procesos de recalentamiento, tratamiento térmico de relevado de esfuerzos, soldadura y fundición.

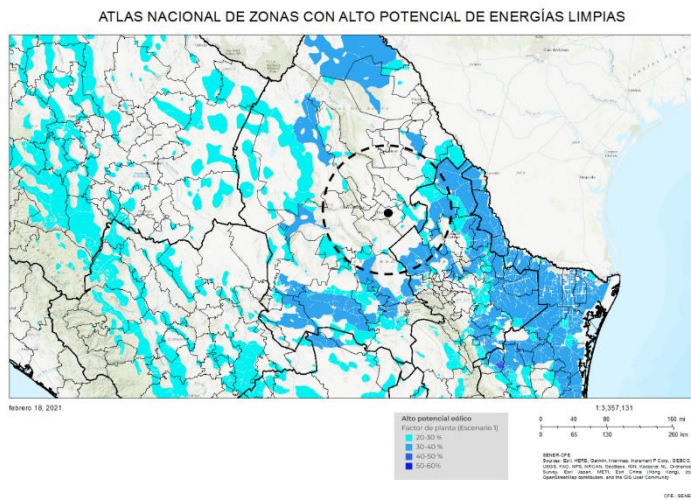
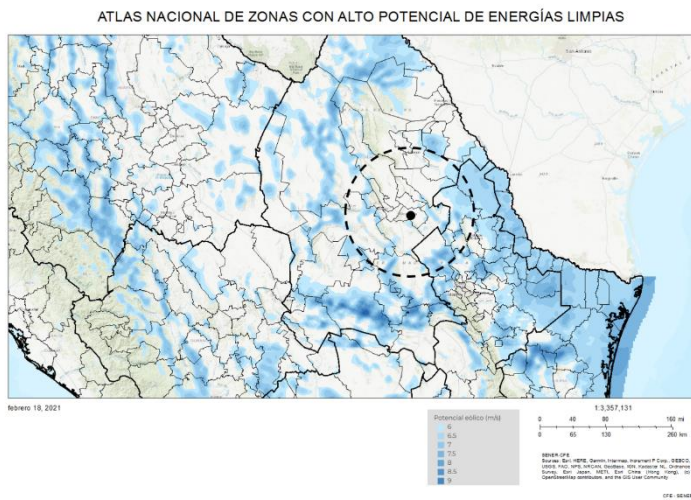
Cabe recordar que los procesos metalmecánicos pueden demandar una carga eléctrica que se transformará en energía mecánica o bien en una carga térmica. De ahí que varias de estas operaciones puedan ser ubicadas en cualquier de los dos módulos generales descritos. Ejemplo de ello son los procesos de fundición y soldadura, pues de acuerdo con la información recopilada en el capítulo 4, se han podido acoplar sistemas de generación de energía renovable a estos mediante el suministro de electricidad para los equipos como hornos de inducción o bien con la generación de carga térmica para ambos procesos con la implementación de hornos solares. Otro ejemplo de esto podrían ser los tratamientos

térmicos, pero la tendencia en investigaciones recientes es a la sustitución del gas natural por biogás, es decir, cambiar el suministro de carga térmica por quema de combustibles fósiles.



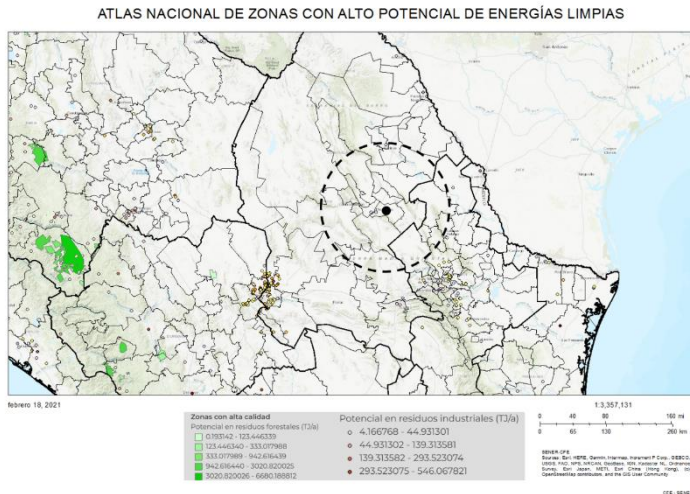
Fuente: Elaborados con información e imágenes de AZEL[100].

Figura 30. Mapas de recurso solar en la zona delimitada por el radio de influencia para el caso problema planteado.



Fuente: Elaborados con información e imágenes de AZEL[100].

Figura 31. Mapas de recurso eólico en la zona delimitada por el radio de influencia para el caso problema planteado.



Fuente: Elaborados con información e imágenes de AZEL[100].

Figura 32. Mapas de recurso en biomasa en la zona delimitada por el radio de influencia para el caso problema planteado.

De acuerdo con la información colectada en párrafos anteriores, se podría optar por un sistema basado en energía solar, tanto fotovoltaica como térmica, pues el recurso renovable con mayor potencial en el área delimitada por el radio de influencia. Bajo esta consideración, los procesos de fundición se mantienen en el módulo A, mientras que en el módulo B se mantienen los procesos de soldadura, decisión que se detallará más adelante.

En el caso del módulo A (60% el consumo metalmecánico) se podría recurrir a la instalación de un parque de paneles fotovoltaicos que podrían cubrir en su totalidad el consumo de las operaciones de deformación plástica, tanto de la laminación en caliente como de la laminación en frío y, además, la carga necesaria para las operaciones de fundición si se considera la sustitución de hornos basados en combustibles fósiles por hornos de inducción como en el caso de *Midwest Metal Products* en la que se procesa una cantidad de material similar a la establecida en este caso problema. Bajo estas consideraciones, la operación más importante de la fabricación de válvulas podría estar cubierta por completo por energía renovable. Sería posible estimar un aproximado de paneles fotovoltaicos a partir de una potencia media del panel, su eficiencia y las horas pico del recurso solar (HSR) en la zona de interés mediante modelo reportado por Vega de Kuyper et al. [35] para el cálculo de módulos de un sistema fotovoltaico, pero este cálculo depende de la consulta de equipos para el caso problema, aspecto fuera de los límites de esta investigación.

Para el módulo B (40% del consumo metalmecánico), se recomienda cubrir sólo una parte del consumo del recalentamiento y del tratamiento de relevado de esfuerzos bajo dos consideraciones. La primera es que la tecnología actual aún se encuentra limitada para el procesamiento de pequeñas cantidades de material. Y en segunda instancia, se encuentra la limitante intrínseca asociada a que el recurso solar no se encuentra disponible con la misma intensidad en todo momento. Con base en los casos de éxito descritos en el capítulo 4, se propone la implementación de la energía solar como un precalentamiento basado en un concentrador solar parabólico que reduzca el consumo de combustibles fósiles en el tratamiento convencional. De esta forma, del 40% promedio de la energía para estas operaciones metalmecánicas del caso problema, aproximadamente el 10% se podría cubrir



con energía renovable e impactaría en la reducción de las emisiones cuantificadas en el punto anterior.

En el caso de los procesos de soldadura, se plantea la posibilidad de cubrir la energía necesaria por medio de la concentración solar, es decir, el 4 o 5% de la energía destinada a las operaciones metalmeccánicas. En este caso otro cambio tecnológico sería necesario de llevar a cabo, sustituyendo la soldadura por arco eléctrico por soldadura solar. Entonces, esta posibilidad podría ser explorada a detalle una vez que la tecnología solar apruebe la fase piloto.

Una consideración importante de las tecnologías solares que se podrían utilizar en ambos módulos es el área territorial que se deberá emplear grandes extensiones de terreno.

Cabe recordar que no es posible construir un diseño con exactitud para este caso problema pues aún sería necesario obtener una mayor cantidad de valores numéricos y de información de equipos, lo que queda fuera de los límites de esta investigación. Sin embargo, el explorar este caso problema permite identificar la metodología a seguir para el diseño como el establecimiento del escenario BAU, la descripción del entorno geográfico y la identificación de los recursos energéticos renovables disponibles. Además de aspectos importantes como el cambio tecnológico sobre la línea de producción que podría ser necesario sobre todo en aquellos procesos metalmeccánicos que requieren de una carga térmica y que deberían incluirse en la evaluación financiera de un futuro proyecto. Y, por otra parte, la versatilidad que algunas de las operaciones metalmeccánicas ofrecen para adaptarse a estas tecnologías.

## 7. Conclusiones

El presente trabajo ha permitido desarrollar una visión holística de la posible implementación de energías renovables dentro del sector metalmecánico, y en específico, del asociado a la industria siderúrgica. Partiendo del desarrollo de una idea que ha sido alimentada por información de distintos campos relacionados con la energía y la metalurgia. A partir de lo construido en esta investigación se puede concluir lo siguiente:

1. La industria metalmecánica siderúrgica es una industria energéticamente intensiva que demanda tanto cargas eléctricas como térmicas, para abastecer a operaciones que pueden implicar el procesamiento de materiales a elevadas temperaturas (por arriba de los 400°C) y mediante la aplicación de esfuerzos de deformación y corte. La diversidad en operaciones implica una diversidad en las formas en las que la energía es consumida, pero esta siempre se caracterizará por las propiedades mecánicas y físicas de los materiales metálicos procesados pues estas son la base de las variables de proceso.
2. En México, el sector siderúrgico es de importancia económica dentro de la industria de la manufactura. Los estados de la república cuya participación es más importante dentro del sector metalmecánico siderúrgico por su nivel de producción son: Michoacán, Coahuila y Veracruz. Esto hace que los recursos energéticos más interesantes para la instalación de esquemas autoabastecimiento de energía sean principalmente el solar, eólico y biomasa. El potencial de cada uno de ellos cambia significativamente en cada uno de los estados.
3. La literatura indexada sugiere que el concepto de aplicar esquemas de generación de energía renovable al sector metalmecánico es factible, sin embargo, para llevarlo a escala completa (escala industrial) es necesario aplicar pruebas asociadas a la aplicación que se desea. Este paso es especialmente importante en la instalación de esquemas de aprovechamiento solar térmico y basados en biomasa pues presentan opciones interesantes para el uso *in-situ* de la energía en las líneas de producción.
4. La literatura periodística e informes industriales sugieren que la implementación de esquemas basados en geotermia, hidráulica, eólica y solar fotovoltaica en el sector metalmecánico ya es una realidad. Sin embargo, las dos primeras tecnologías se encuentran limitadas a la generación eléctrica dentro de un radio de influencia bajo. En contraste, las tecnologías eólica y fotovoltaica no se ven afectadas por esta característica y ya se han aprovechado para cubrir un porcentaje alto de la carga base (inclusive del 100%)
5. La literatura consultada reporta la posibilidad de ahorros de energía y monetarios ya cuantificados en casos industriales o demarcados como potencial.

6. La cantidad de emisiones contaminantes cambia en cada estado de mayor participación siderúrgica. Los procesos metalmeccánicos asociados a la demanda de energía térmica son los responsables de las emisiones directas del sector y es en estos en quienes se debe enfocar la implementación de esquemas de generación de energía renovable con fines de coadyuvar en la reducción de emisiones a nivel local.
7. El trabajo interdisciplinario de la ingeniería en energía y la ingeniería metalúrgica es fundamental para el desarrollo del concepto explorado. Esto se comprueba en el caso problema construido en el que fue posible construir un escenario tipo BAU a partir de las bases de datos de importancia metalúrgica y establecer aspectos relevantes del diseño de esquema de generación a partir de bases de datos en materia de energía.
8. Una visión holista en ingeniería demanda la consulta de una gran diversidad de fuentes de información que no sólo incluyen a la literatura académica sino también a recursos periodísticos, de industria privada, de gobierno y de organizaciones nacionales e internacionales. Es el uso con criterio de esta información el que permitirá la selección y filtración pertinentes para el desarrollo de un proyecto de ingeniería. Por otra parte, el proyecto desarrollado muestra las necesidades por construir mayor cantidad de información en el ámbito energético para la industria metalmeccánica así como de unificación de términos por parte de los agentes de gobierno que proporcionen parte de esta investigación.

## 8. Comentarios finales

- Se sugiere que se realice una investigación similar, profundizando en la metalurgia extractiva, pues durante el desarrollo de esta investigación se apreció el gran potencial de aprovechamiento de los recursos energéticos renovables que estas tienen. Además, de tener un impacto ambiental mayor que el subsector metalmeccánico.
- También se sugiere llevar a cabo una investigación similar enfocada al sector metalmeccánico de los materiales no ferrosos.
- Parte de la investigación realizada se empleó para desarrollar el curso extracurricular: *"Metalurgia, materiales y desarrollo sostenible"* impartido por el autor en los meses de Julio y Agosto 2020 en la Facultad de Química de la UNAM.

## Referencias bibliográficas

- [1] R. C. Gupta, "Chapter 4.2 - Energy Resources, Its Role and Use in Metallurgical Industries," in *Treatise on Process Metallurgy*, S. Seetharaman, Ed., ed Boston: Elsevier, 2014, pp. 1425-1458.
- [2] IEA. (2019). *Iron and Steel*. Available: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>
- [3] Michael F. Ashby, "Chapter 3 - The material life cycle," in *Materials and the Environment (Second Edition)*, M. F. Ashby, Ed., ed Boston: Butterworth-Heinemann, 2013, pp. 49-77.
- [4] IEA. (2020, 3 de Julio). *Aluminium*. Available: <https://www.iea.org/reports/aluminium>
- [5] Lucio Vázquez Briseño, *Formado de metales*. México: Pearson, 2015.
- [6] Emanuele Pagone, Konstantinos Salonitis, and Mark Jolly, "Energy and material efficiency metrics in foundries," *Procedia Manufacturing*, vol. 21, pp. 421-428, 2018/01/01/ 2018.
- [7] George Krauss, *STEELS - Processing, structure, and performance*, 2005.
- [8] "Calculations/Maintenance/Quality/Specifying a Furnace," in *Industrial Furnaces*, ed, 2003, pp. 341-396.
- [9] P. Berg, "Energy Management in Heat Treatment," Master's, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology Göteborg, Sweden, 2014.
- [10] V. Jayaraman, "Energy savings on continuous heat treating equipment," *Journal of Heat Treating*, vol. 3, pp. 23-29, 1983/06/01 1983.
- [11] Rafael Nunes, Ibrahim Abbas, and Leo L. Algminas, *ASM Handbook®, Volume 14 - Forming and Forging*: ASM International, 2019.
- [12] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), "Guía para la Elaboración de la Cédula de Operación Anual. Industria Metalúrgica," ed. México, 2016, p. 407.
- [13] Granta Design, "CES Edupak ", Windows ed, 2018.
- [14] Mengdi Gao, Haihong Huang, Qingyang Wang, Zhifeng Liu, and Xinyu Li, "Energy consumption analysis on sheet metal forming: focusing on the deep drawing processes," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 96, 06/01 2018.
- [15] Daniel R. Cooper, Kathleen E. Rossie, and Timothy G. Gutowski, "The energy requirements and environmental impacts of sheet metal forming: An analysis of five forming processes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 244, pp. 116-135, 2017/06/01/ 2017.
- [16] Mengdi Gao, Kang He, Lei Li, Qingyang Wang, and Conghu Liu, "A Review on Energy Consumption, Energy Efficiency and Energy Saving of Metal Forming Processes from Different Hierarchies," *Processes*, vol. 7, 2019.
- [17] Xiancong Zhao, Hao Bai, and Juxian Hao, "A review on the optimal scheduling of byproduct gases in steel making industry," *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 2852-2857, 2017/12/01/ 2017.
- [18] Serope Kalpakjian, Steven Schmid, and Vijay Sekar, *Manufacturing Engineering and Technology*, 2013.

- [19] Bhavik Bakshi, T. G. Gutowski, and Dusan Sekulic, *Thermodynamics and the destruction of resources*, 2011.
- [20] Luo Hu, Renzhong Tang, Wei Cai, Yixiong Feng, and Xiang Ma, "Optimisation of cutting parameters for improving energy efficiency in machining process," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 59, pp. 406-416, 2019/10/01/ 2019.
- [21] Lincoln Electric. (2020, 14 de Sept. de 2020). *Equipos de Corte por Plasma y Controladores*. Available: <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/equipment/plasma-cutters/Pages/plasma-cutters.aspx>
- [22] Amber Shrivastava, Manuela Kronen, and Frank E. Pfefferkorn, "Joining Processes," in *Energy Efficient Manufacturing*, ed, 2018, pp. 197-238.
- [23] Okila. (2015, 17 de mar. de 2019). *Productos de Weld500*. Available: [https://okila.net/marca/weld500/?gclid=Cj0KCQjwqfz6BRD8ARIsAIXQCf0aPxgrWjSv2q4kcI9FI8FnWVgUvS6OB\\_ubAzT5\\_OldfXm\\_WqGb7CwaAqIbEALw\\_wcB](https://okila.net/marca/weld500/?gclid=Cj0KCQjwqfz6BRD8ARIsAIXQCf0aPxgrWjSv2q4kcI9FI8FnWVgUvS6OB_ubAzT5_OldfXm_WqGb7CwaAqIbEALw_wcB)
- [24] Emanuele Pagone, Mark Jolly, and Konstantinos Salonitis, "A Tool to Promote Sustainability in Casting Processes: Development Highlights," *Cham*, 2017, pp. 172-184.
- [25] Elena Stefana, Paola Cocca, Filippo Marciano, Diana Rossi, and Giuseppe Tomasoni, "A Review of Energy and Environmental Management Practices in Cast Iron Foundries to Increase Sustainability," *Sustainability (2071-1050)*, vol. 11, pp. 7245-7245, 2019.
- [26] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México), "Perfil de la industria del hierro y del acero.," ed. México, 2016, p. 29.
- [27] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Estadísticas a propósito de la Industria de la construcción.," ed, 2012, p. 21.
- [28] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Estadísticas a propósito de ... la industria del Hierro y del Acero," ed, 2012, p. 23.
- [29] Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero en México (CANACERO). (2019, Marzo 10). *¿Quiénes somos?* Available: <https://www.canacero.org.mx/index.php>
- [30] Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero en México (CANACERO). (2019, Marzo 10). *El Acero en México*. Available: <https://www.canacero.org.mx/aceroenmexico.php>
- [31] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "La industria siderúrgica en México 2012.," ed. México 2013.
- [32] Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero en México (CANACERO), "Radiografía de la industria del Acero en México 2019," ed, 2019.
- [33] SENER, "Balance Nacional de Energía 2017," D. G. d. P. e. I. Energéticas, Ed., ed. México, 2018, p. 129.
- [34] Secretaría de Energía and International Renewable Energy Agency, "Renewable Energy Prospects: Mexico," 2015.
- [35] Juan C. Vega de Kuyper and S. Ramírez, *Fuentes de energía, renovables y no renovables : aplicaciones*: Alfaomega, 2015.
- [36] Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental A.C. (2014, Diciembre 3). *Cuencas Hidrográficas* Available: <https://agua.org.mx/que-es-una-cuenca/>
- [37] Secretaría de Energía and Comisión Federal de Electricidad. Atlas Hidroeléctrico Nacional [Online]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/atlashidro/>

- [38] Secretaría de Energía (SENER), "Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (2018-2032)," ed. México, 2018, p. 330.
- [39] SENER. (2018, Diciembre 3). *Atlas Nacional de Biomasa* Available: <https://dgel.energia.gob.mx/anbio/mapa.html?lang=es>
- [40] J. Zarco. (2018) Michoacán y sus empresas. *pv magazine* Available: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2018/08/15/michoacan-y-sus-empresas/>
- [41] Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico. (2014) Potencial de la eólica en Michoacán. *Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico*. Available: <https://www.evwind.com/2014/03/05/michoacan-estudia-su-potencial-de-energia-eolica/>
- [42] J. Vázquez, "Coahuila apuesta por energía solar " in *El Economista*, ed. México, 2017.
- [43] S. Muñoz, "Lidera Coahuila en energía solar " in *El siglo de Torreón* ed. México, 2018.
- [44] Secretaría de Energía. (2018, Noviembre 12 ). *Se inaugura la Planta Solar Villanueva en Coahuila*. Available: <https://www.gob.mx/sener/articulos/se-inaugura-la-planta-solar-villanueva-en-coahuila>
- [45] E. González. (2020) Instalarán parque solar en Parras, Coahuila; abastecerá a la CFEs de Paneles Solares. *Revista Vanguardia*. Available: <https://vanguardia.com.mx/articulo/instalaran-parque-solar-en-parras-coahuila-abastecera-la-cfe>
- [46] L. C. Valdés, "Coahuila, en el top 5 de generación de energía eólica en México," in *Milenio*, ed, 2020.
- [47] N. Balderas, "La energía eólica toma vuelo en Coahuila," in *Cobertura 360*, ed. México, 2019.
- [48] EDP Renewables North America. (2015, Diciembre 3). *Eólica de Coahuila*. Available: <https://www.edpr.com/north-america/eolica-de-coahuila-wind-farm>
- [49] Banco de Desarrollo de América del Norte. (2015, Diciembre 3). *Proyecto de Energía Eólica "EDPR" en General Cepeda, Coahuila*. Available: <https://www.nadb.org/es/nuestros-proyectos/proyectos-de-infraestructura/proyecto-de-energia-eolica-edpren-general-cepeda-coahuila>
- [50] CFE-SENER. (2018, Diciembre 3 ). *Atlas Hidroeléctrico Nacional*. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/atlashidro/#>
- [51] Secretaría de Energía. *Atlas Nacional de Biomasa* [Online]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/ANBIO/>
- [52] D. Corral. (2017, Diciembre 3). *El potencial del biogás como fuente de energía alternativa*. Available: <http://www.trcimplan.gob.mx/blog/el-potencial-del-biogas-como-fuente-de-energia-alternativa.html>
- [53] Secretaría de Energía. *Inventario Nacional de Energías Limpias* [Online]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/inel/>
- [54] COWI, "Catálogo de tecnología de biomasa a energía " Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático 2017.
- [55] F. De Luna, "En los siguientes 14 años Veracruz contará con 27 Centrales Hidroeléctricas.," in *Hora Cero*, ed. Xalapa, Ver., 2019.

- [56] L. Morales, "En 2020, crecerán proyectos de Energía Renovable en Veracruz," in *Imagen del golfo*, ed. México, 2020.
- [57] Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico. (2015) Eólica en México: Autorizan parque eólico en Alvarado. *Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico* Available: <https://www.evwind.com/2015/09/15/eolica-en-mexico-autorizan-parque-eolico-en-alvarado/>
- [58] J. Vázquez, "Energías limpias serán prioridad en Veracruz," in *El Economista*, ed. México, 2017.
- [59] G. P. Rodríguez-Donoso, J. Ruiz, B. J. Fernández, and A. J. Vázquez-Vaamonde, "Modelling of steel surface heating with concentrated solar energy," *Materials & Design*, vol. 16, pp. 163-166, 1995/01/01/ 1995.
- [60] Daniel Fernández-González, I. Ruiz-Bustanza, Carmen González-Gasca, Juan Piñuela Noval, Javier Mochón-Castaños, José Sancho-Gorostiaga, *et al.*, "Concentrated solar energy applications in materials science and metallurgy," *Solar Energy*, vol. 170, pp. 520-540, 2018/08/01/ 2018.
- [61] I. García, E. Gracia-Escosa, M. Bayod, A. Conde, M. A. Arenas, J. Damborenea, *et al.*, "Sustainable production of titanium foams for biomedical applications by Concentrated Solar Energy sintering," *Materials Letters*, vol. 185, pp. 420-423, 2016/12/15/ 2016.
- [62] International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable energy options for the industry sector: Global and regional potential until 2030.," Abu Dhabi 2015.
- [63] "STAINLESS STEEL CONF: Sector should take advantage of renewables," *Metal Bulletin Daily*, pp. 235-235, 2008.
- [64] "Wind Energy the Superpower Behind US Steel Industry," *FRPT- Energy Snapshot*, p. 5, 12/24/ 2019.
- [65] ArcelorMittal, "Climate Action Report 1," Luxembourg 2019.
- [66] G. P. Rodriguez, A. J. Vázquez, and J. J. de Damborenea, "Steel hardening with high-energy density beams in solar facilities," *Materials & Design*, vol. 14, pp. 169-174, 1993/01/01/ 1993.
- [67] J. Llorente and A. J. Vázquez, "Solar hardening of steels with a new small scale solar concentrator," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 118, pp. 86-92, 2009/11/15/ 2009.
- [68] Gloria P. Rodriguez, Gemma Herranz, and Ana Romero, "Solar gas nitriding of Ti6Al4V alloy," *Applied Surface Science*, vol. 283, pp. 445-452, 2013/10/15/ 2013.
- [69] B. J. Fernández, V. López, A. J. Vázquez, and D. Martínez, "Cladding of Ni superalloy powders on AISI 4140 steel with concentrated solar energy," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 53, pp. 153-161, 1998/05/12/ 1998.
- [70] D. G. Karalis, D. I. Pantelis, and V. J. Papazoglou, "On the investigation of 7075 aluminum alloy welding using concentrated solar energy," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 86, pp. 145-163, 2005/03/01/ 2005.
- [71] J. Selvaraj, V. Harikesavan, and A. Eshwanth, "A novel application of concentrated solar thermal energy in foundries," *Environmental Science & Pollution Research*, vol. 23, pp. 9312-9322, 2016.
- [72] Peter Beeley, "5 - Defects in castings," in *Foundry Technology (Second Edition)*, P. Beeley, Ed., ed Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, pp. 239-318.



- [73] A. Romero, I. García, M. A. Arenas, V. López, and A. Vázquez, "High melting point metals welding by concentrated solar energy," *Solar Energy*, vol. 95, pp. 131-143, 2013/09/01/ 2013.
- [74] A. Romero, I. García, M. A. Arenas, V. López, and A. Vázquez, "Ti6Al4V titanium alloy welded using concentrated solar energy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 223, pp. 284-291, 2015/09/01/ 2015.
- [75] J. Kováčik, Š Emmer, J. Rodríguez, and I. Cañadas, "Sintering of HDH Ti powder in a solar furnace at Plataforma Solar de Almeria," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 695, pp. 52-59, 2017/02/25/ 2017.
- [76] Tantau Kelley, "Foundry's solar panels largest hybrid in NZ," *Waikato Times*, Article 11700688, 2019.
- [77] J. Plunger. (2018) The Bright Future for a Solar-Powered Foundry. *Foundry Management & Technology*. Available: <https://www.foundrymag.com/melt-pour/media-gallery/21931873/the-bright-future-for-a-solarpowered-foundry>
- [78] Elfi Middelbeek, "German industry under threat from clean energy drive, steelmakers say," *Metal Bulletin*, pp. 151-151, 2013.
- [79] ArcelorMittal, "Integrated Annual Review 2018.," Luxemburg2019.
- [80] Ana Paula Camargo, "Steelmaker Deacero signs solar energy deal with IEnova in Mexico," *Metal Bulletin Daily*, p. 1, 04/17/ 2017.
- [81] P. Mentado. (2019) DEACERO firma contrato con CENACE para participar en el mercado eléctrico. *Energíahoy*. Available: <https://energiyahoy.com/2019/09/04/deacero-firma-contrato-con-cenace-para-participar-en-el-mercado-electrico/>
- [82] J. Zarco. (2019) Sinergias en proceso: Gerdau Corsa y Engie. *pv magazine* Available: <https://www.pv-magazine-mexico.com/2019/05/10/sinergias-en-proceso-gerdau-corsa-y-engie/>
- [83] Elsayed Mousa, Chuan Wang, Johan Riesbeck, and Mikael Larsson, "Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1247-1266, 2016/11/01/ 2016.
- [84] H. Liu, M. Saffaripour, P. Mellin, C. E. Grip, W. Yang, and W. Blasiak, "A thermodynamic study of hot syngas impurities in steel reheating furnaces – Corrosion and interaction with oxide scales," *Energy*, vol. 77, pp. 352-361, 2014/12/01/ 2014.
- [85] Duleeka Sandamali Gunarathne, Pelle Mellin, Weihong Yang, Magnus Pettersson, and Rolf Ljunggren, "Performance of an effectively integrated biomass multi-stage gasification system and a steel industry heat treatment furnace," *Applied Energy*, vol. 170, pp. 353-361, 2016/05/15/ 2016.
- [86] Chinedu M. Nwachukwu, Andrea Toffolo, and Elisabeth Wetterlund, "Biomass-based gas use in Swedish iron and steel industry – Supply chain and process integration considerations," *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2797-2811, 2020/02/01/ 2020.
- [87] Manuela Prehn and Iván Cumana, *LA BIOENERGÍA EN MÉXICO: ESTUDIOS DE CASO*, Red Mexicana de Bioenergía A.C. ed. México: Imprenta Tavera Hermanos, S.A. de C.V., 2012.
- [88] Omar Masera Cerutti, Fabio Coralli, Carlos García Bustamante, Enrique Riegelhaupt, Teresita Arias Chalico, Julián Vega Gregg, *et al.*, *LA BIOENERGÍA EN MÉXICO. Situación actual y perspectivas*. México: Imagia Comunicación, 2011.

- [89] Enrique Alarcón Gutiérrez, Felipe Alatríste Mondragón, Lorena Amaya Delgado, Luis F. Barahona Pérez, Germán Buitrón Méndez, Julián Carrillo Reyes, *et al.*, *Estado del arte de la bioenergía en México*. México: Imagia Comunicación S. de RL. de CV., 2016.
- [90] Gobierno del Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave and Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), "Programa de gestión para mejorar la calidad del aire en el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave ", ed. México, 2017, pp. 26-107.
- [91] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2018, Agosto 20). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Available: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- [92] INECC, "Rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GYCEI) del sector industria (cemento, acero, calero y azucarero) en México, como insumo para la sexta Comunicación Nacional de Cambio Climático ", C. G. d. M. d. C. Climático, Ed., ed. México, 2018, p. 101.
- [93] Secretaría de Energía (SENER). Captura, Uso y Almacenamiento de CO2 [Online]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/CCUS/>
- [94] Gobierno de Michoacán, "Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Michoacán 2015-2024 ", ed. México, 2015, pp. 21-86.
- [95] Gobierno de Coahuila, "Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Coahuila de Zaragoza 2017-2026 ", ed. México, 2017, pp. 6-54.
- [96] Instituto Mexicano del Petróleo (IMP). (2019, Mayo 5). *Ingeniería Conceptual*. Available: <https://www.gob.mx/imp/articulos/ingenieria-conceptual>
- [97] Becerril F. González, "Diseño de la productividad de un pozo petrolero aplicando la metodología Front End Loading (FEL)," Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería., 2010.
- [98] César Abraham Martínez Fernández, María Eugenia Sofía Emma Noguez Amaya, Ignacio Alejandro Figueroa Vargas, and José Bernardo Hernández Morales, *Estructura y propiedades mecánicas en varillas corrugadas de acero G42 templadas y auto-revenidas en línea por proceso QT B*, 2018.
- [99] Secretaría de Recursos Naturales. (2017, Enero 3). *Sistema Integral de Información Ambiental del Estado de Coahuila*. Available: <https://www.sema.gob.mx/SRN-SIIAECC-POETE-MAPAS.php>
- [100] Secretaría de Energía (SENER). Atlas Nacional de Zonas con Alto Potencial de Energías Limpias (AZEL) [Online]. Available: <https://dgel.energia.gob.mx/azel/>