



ESCUELA SUPERIOR DE CIENCIAS EXPERIMENTALES Y TECNOLOGÍA

GRADO EN INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO CURSO ACADÉMICO 2022/2023

**ANÁLISIS Y APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA LEAN EN LA
GESTIÓN ENERGÉTICA DE LA CADENA DE SUMINISTRO Y SU
POTENCIAL IMPACTO EN ÁMBITO DE LA SOSTENIBILIDAD Y
DE LA EFICIENCIA**

AUTORA: BASTIDAS GARCÍA, ANDREA DEL ROSARIO

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en la exploración y aplicación de los principios de Lean Manufacturing para mejorar la gestión energética en la cadena de suministro, en concreto en la cadena del acero corrugado.

En primer lugar, se proporciona el contexto y la justificación de la necesidad de mejorar la eficiencia energética en el sector industrial, con un enfoque específico en España. Además, se presenta una breve introducción a los conceptos clave del Lean Manufacturing, incluyendo su definición, principios y las herramientas y técnicas asociadas.

El objetivo del estudio es aplicar las herramientas y principios Lean para mejorar la eficiencia energética y, por tanto, la sostenibilidad de la cadena de suministro del acero corrugado. La metodología se basa en el análisis y la implementación de estas herramientas y técnicas Lean. Para ello, el estudio incluye un análisis detallado de las herramientas Lean en relación con la gestión energética, así como un análisis en profundidad del proceso de suministro y fabricación del acero corrugado, identificando áreas de mejora potencial.

La sección de la propuesta de aplicación es donde se presentan las soluciones identificadas aplicadas al proceso de fabricación de las barras de acero corrugado, incluyendo el diagnóstico energético, la aplicación del Energy Value Stream Mapping, la implementación del Mantenimiento Productivo Total (TPM) y la organización de un evento Kaizen. Estos se implementan en diferentes fases con el objetivo de mejorar la eficiencia energética en la producción del acero corrugado.

Por último, el trabajo presenta una discusión sobre los resultados obtenidos, incluyendo una estimación de los impactos de las mejoras propuestas y un análisis de los costos asociados.

Por tanto, este TFG propone una contribución significativa a la búsqueda de formas más sostenibles y eficientes de gestión de la energía en la industria del acero, y proporciona un marco útil para la aplicación de los principios Lean en la gestión energética.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN	4
1.2. DESAFÍO ENERGÉTICO	5
1.2.1. <i>Contexto global</i>	5
1.2.2. <i>Situación energética en el sector industrial en España</i>	6
1.3. SISTEMAS DE GESTIÓN ENERGÉTICA	8
1.4. CONCEPTOS BÁSICOS DE LEAN MANUFACTURING	9
1.4.1. <i>Definición y principios</i>	9
1.4.2. <i>Herramientas y Técnicas</i>	11
2. OBJETIVOS	14
3. METODOLOGÍA	15
4. ANÁLISIS DE HERRAMIENTAS LEAN PARA LA GESTIÓN ENERGÉTICA	16
5. ANÁLISIS DEL PROCESO OBJETO DE ESTUDIO	19
5.1. CADENA DE SUMINISTRO DEL ACERO CORRUGADO	20
5.2. FABRICACIÓN DE BARRAS DE ACERO CORRUGADO	21
6. SOLUCIÓN: PROPUESTA DE APLICACIÓN	26
6.1. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO	26
6.2. ENERGY VALUE STREAM MAPPING	27
6.3. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM)	27
6.3.1. <i>Fase 1: Preparación</i>	28
6.3.2. <i>Fase 2: Introducción</i>	30
6.3.3. <i>Fase 3: Implementación</i>	31
6.3.4. <i>Fase 4: Consolidación</i>	31
6.4. EVENTO KAIZEN	32
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
7.1. ENERGY VALUE STREAM MAPPING	35
7.2. MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM)	36
7.3. EVENTOS KAIZEN	37
7.4. VALORACIÓN ECONÓMICA	37
8. CONCLUSIONES	43
9. BIBLIOGRAFÍA	45

Índice de figuras:

Figura 1. Evolución del consumo mundial de energía primaria según la fuente.....	5
Figura 2. Emisiones mundiales de CO2 por sectores, 2019-2022.....	6
Figura 3. Desglose del consumo de energía primaria en España por fuente, año 2021.	7
Figura 4. Distribución porcentual del consumo energético en la industria, por ramas de actividad - Año 2019.....	7
Figura 5. Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar	8
Figura 6. Esquema del templo Lean.....	11
Figura 7. Requisitos norma ISO 50001:2018.....	17
Figura 8. Cadena de suministro de las barras de acero corrugado	20
Figura 9. Esquema planta de laminación en caliente	22
Figura 10. Horno de recalentamiento de vigas galopantes [Walking Beam]	23
Figura 11. Máquina de descascarillado	23
Figura 12. Esquema del proceso de laminación continua	24
Figura 13. Mesa de enfriamiento.....	25
Figura 14. Cizalla de corte	25
Figura 15. Modelo EVSM.....	27
Figura 16. Diagrama de Gantt para la implantación TPM	28
Figura 17. Modelo para actividades de inspección y limpieza.....	30
Figura 18. Planificación evento Kaizen	32
Figura 19. Ejemplo de mejores técnicas para hornos de recalentamiento.....	33
Figura 20. Ejemplo fallo en el sistema de control del tren de laminación	36

Tablas:

Tabla 1. Modelo de grupo de trabajo TPM	29
Tabla 2. Inputs y outputs de la fabricación de 1t de barra de acero corrugado	37
Tabla 3. Desglose costes de personal para el desarrollo EVSM	38
Tabla 4. Personal implicado y horas estimadas en la implantación de TPM	39
Tabla 5. Desglose costos de personal para el desarrollo de TPM	40
Tabla 6. Desglose costos de colaboraciones externas para el desarrollo de TPM.....	40
Tabla 7. Desglose costos indirecto de formación para el desarrollo de TPM	41
Tabla 8. Estimación de horas por actividad para el evento Kaizen.....	41
Tabla 9. Desglose costo personal herramienta Kaizen.....	42

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación

El actual escenario global, caracterizado por un incremento de la demanda de recursos y energía, obliga a las naciones y organizaciones a reconsiderar sus estrategias y modelos operativos en busca de la mejora de estos. Es en este contexto en el cual la gestión energética ha cobrado un protagonismo indiscutible, no solo por sus implicaciones económicas, sino también por su gran importancia en el ámbito medioambiental.

En lo que respecta al sector industrial, este se caracteriza por su alta demanda y consumo de energía, en especial en los procesos de fabricación altamente intensivos en energía, lo que implica la necesidad de mejorar su eficiencia energética. Por tanto, la implementación de sistemas de gestión energética eficientes se convierte en una estrategia vital para las organizaciones industriales que buscan reducir su consumo de energía y minimizar su impacto ambiental, al tiempo que ahorran costos y mejoran su competitividad.

Sin embargo, para la correcta gestión energética, es indispensable contar con una serie de herramientas que faciliten y potencien cada una de las etapas, desde la fase de análisis hasta su operación y mejora continua.

En este sentido, las herramientas Lean, cuyo enfoque está basado en la optimización de procesos a través de la mejora continua y la eliminación de desperdicios, pueden ofrecer un marco interesante para el desarrollo de estrategias orientadas al contexto energético. Los principios y herramientas Lean han demostrado ser útiles en una amplia gama de contextos, y su potencial en el ámbito de la gestión energética aún continúa en exploración.

Por tanto, el presente trabajo se orienta a estudiar las herramientas Lean que pueden contribuir a la mejora energética en el sector industrial, identificando la forma en que pueden apoyar la planificación, implementación u operación de un Sistema de Gestión Energética (SGEn). Con esta finalidad, se busca proporcionar una perspectiva más amplia y una mejor comprensión del papel que las herramientas Lean puede desempeñar en la gestión energética y, por ende, en la promoción de una mejora en el desempeño energético.

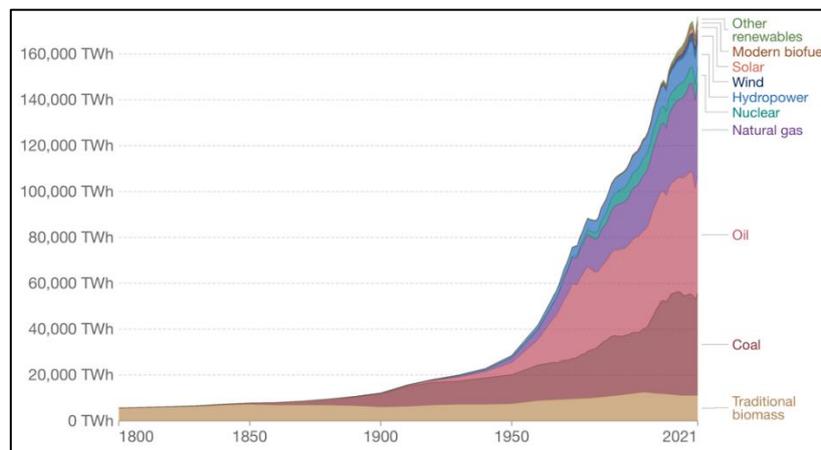
1.2. Desafío energético

1.2.1. Contexto global

En las últimas décadas se han emitido diversas alertas sobre la problemática del incremento sustancial en la demanda de energía, impulsado por factores como el crecimiento de la población, el desarrollo económico y la continua expansión de la industria y tecnología (IEA, 2022b). Como se puede observar en la Figura 1, se destaca un notable incremento en el consumo energético a lo largo del último siglo. En concreto, el consumo de energía primaria a nivel mundial en el año 2021 fue de 595,15 exajulios (EJ), donde Europa representó el 13,8%, Norte América el 19,1%, Asia Pacífico el 45,8%, el centro y sur de América el 4,8%, Oriente medio el 6,4%, África el 3,4% y los países que miembros de Comunidad de Estados Independientes (CEI) representaron un 6,8% (BP, 2022).

Asimismo, en la misma figura, se evidencia que los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) han sido las fuentes de energía fundamentales que han sustentado dicho consumo a lo largo de la historia.

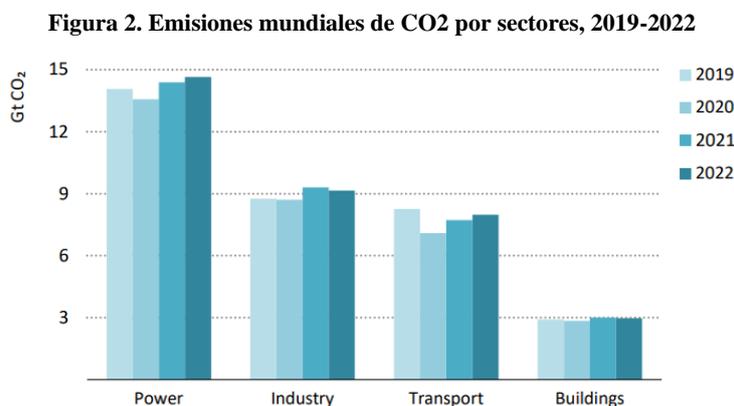
Figura 1. Evolución del consumo mundial de energía primaria según la fuente



Fuente: Ritchie et al., (2022). Energy

Como se evidencia, durante el siglo XIX y gran parte del siglo XX, estos combustibles dominaron la producción energética mundial; no obstante, en las últimas décadas, el escenario energético ha comenzado a diversificarse, aunque a un ritmo gradual. Actualmente la combinación global de consumo de energía primaria por tipo de combustible se configura de la siguiente manera: 30,95 % Petróleo, 24,42% Gas Natural, 26,90 % Carbón, 4,25% Energía nuclear, 6,76% Hidroelectricidad, 6,71% Energías renovables (BP, 2022). Estas cifras indican que los combustibles fósiles continúan constituyendo un porcentaje significativo del conjunto de fuentes energéticas.

Este hecho plantea un obstáculo considerable, dado que su uso es el principal causante de las emisiones de gases de efecto invernadero, entre los que destaca el dióxido de carbono (CO₂) (IPCC, 2022), como el representante más significativo. Tal impacto se manifiesta con claridad en la Figura 2, donde se observa que, entre los sectores con mayor emisión, sobresalen el sector energético, la industria, el transporte y las viviendas.



Fuente: IEA (2022a)

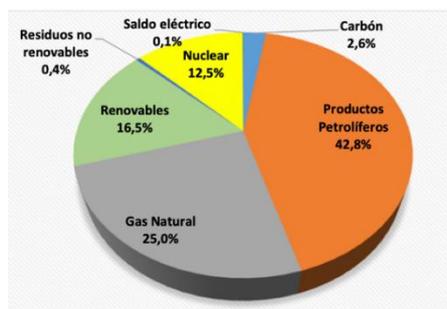
En concreto, el 6º Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2022) señala que cerca del 34% de las emisiones globales netas de gases de efecto invernadero (GEI) generadas por actividades humanas se originan en el sector de suministro energético, el 24% provienen de la industria, el 22% de la agricultura, silvicultura y otros usos del suelo (AFOLU), el 15% del transporte y el 6% de los edificios. Además, si se atribuyen las emisiones provenientes de la producción de electricidad y calor a los sectores que hacen uso final de dicha energía, el 90% de estas emisiones indirectas se adjudican a los sectores industriales y de edificios. En consecuencia, esto incrementa su contribución a las emisiones de GEI del 24% al 34%, y del 6% al 16%, respectivamente (IPCC, 2022).

Tal como se puede inferir a partir de esta información, las emisiones directas e indirectas del sector industrial representa una gran proporción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Es por esta razón que actualmente se están implementando numerosas acciones orientadas hacia la eficiencia energética. La eficiencia energética se define como la relación entre la cantidad producida de un servicio o utilidad y la cantidad de energía consumida para proporcionarlo (Gonzalo Sancha, 2010).

1.2.2. Situación energética en el sector industrial en España

En España, al igual que a nivel mundial, es notable el predominio de los combustibles fósiles en la combinación global de consumo de energía primaria por tipo de combustible, véase la Figura 3.

Figura 3. Desglose del consumo de energía primaria en España por fuente, año 2021.

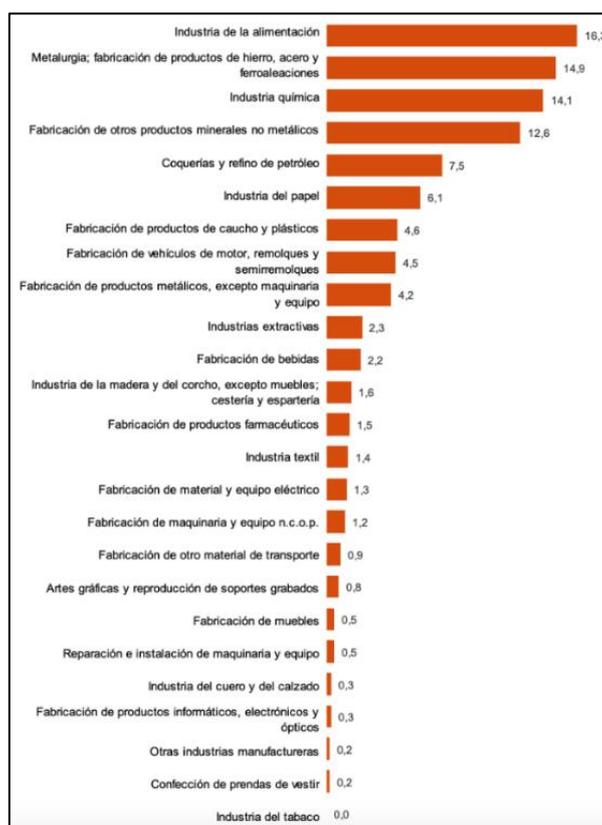


Fuente: (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023)

Concretamente, la actividad industrial tiene un impacto significativo en el consumo energético total que implican desafíos medioambientales y económicos. Según el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, el sector industrial es responsable del 31% del consumo de energía en España (IDAE, s. f.).

La contribución porcentual al consumo energético en la industria española se configura de la siguiente manera:

Figura 4. Distribución porcentual del consumo energético en la industria, por ramas de actividad - Año 2019



Fuente: INE (2021). Encuesta de Consumos Energéticos 2019

Según los datos mostrados, las actividades de "Metalurgia; fabricación de productos de hierro, acero y ferroaleaciones" representan una proporción significativa del consumo energético total en la industria. Esta realidad pone de manifiesto la magnitud del desafío, pero también la oportunidad que representa optimizar la gestión energética en este sector.

1.3. Sistemas de Gestión Energética

Dada la creciente preocupación mundial por las implicaciones medioambientales del considerable incremento en la demanda de energía, resulta imprescindible gestionar y optimizar su uso en todas las actividades humanas. En concreto, el presente trabajo aborda la gestión en el sector industrial.

En los últimos años diversas entidades de normalización han estado trabajando en la elaboración de documentos que sirvan de guía a las organizaciones sobre cómo gestionar de manera eficiente la energía. Así nace la norma ISO 50001, publicada por la Organización Internacional de Normalización (ISO). Esta norma UNE-EN ISO 50001:2018 tiene el objetivo de establecer los sistemas y procesos para mejorar continuamente el desempeño energético de las organizaciones. Para ello, especifica los requisitos para "establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía" (p. 12).

El sistema de gestión energética que se describe en dicha norma está basado en el marco denominado P-H-V-A por sus siglas "Planificar-Hacer-Verificar-Actuar", véase la Figura 5.

Figura 5. Ciclo Planificar-Hacer-Verificar-Actuar



Fuente: UNE-EN ISO 50001:2018

En el contexto energético, este planteamiento proporciona un marco continuo para la mejora a través de las siguientes etapas (UNE-EN ISO 50001:2018):

- Planificar: esta etapa se aborda la comprensión del contexto de la organización, la definición de metas y objetivos energéticos, la realización de una revisión energética, la identificación de los usos significativos energía, el establecimiento de líneas de base de energía y la identificación de indicadores clave de rendimiento energético. En definitiva, conocer el desempeño energético actual y marcar una base sobre la que establecerán las acciones de mejora.
- Hacer: en esta etapa las organizaciones deben implementar los procesos que se han planificado, así como llevar a cabo los controles de operación y mantenimientos. Asimismo, se establecen y aplican requisitos de eficiencia energética para el diseño y adquisición de productos, equipos y servicios.
- Verificar: esta etapa implica el monitoreo y medición de los procesos y resultados en comparación con la política energética, los objetivos, las metas y los requisitos legales y reglamentarios, y se informa sobre los resultados.
- Actuar: las organizaciones deben tomar medidas para mejorar continuamente el desempeño energético y la eficacia del sistema de gestión energética. Esto puede implicar la revisión y modificación de los planes y procesos basándose en los resultados de la etapa de verificación.

Como se puede inferir, el establecimiento de un Sistema de Gestión Energética (SGEn) implica un gran despliegue de herramientas y técnicas para lograr el propósito planteado para cada etapa ya que cada una tiene un objetivo bien definido y su cumplimiento es crucial para alcanzar una gestión energética efectiva y eficiente.

Esto abre una línea de investigación sobre cómo la metodología Lean, y específicamente las herramientas basadas en esta filosofía, pueden respaldar una gestión eficiente de la energía.

1.4. Conceptos básicos de Lean Manufacturing

El presente apartado tiene el propósito de proporcionar una sólida comprensión de Lean Manufacturing para sentar las bases de conocimiento necesario para el análisis que se llevará a cabo en el apartado 4 y el posterior desarrollo de la propuesta de aplicación de la metodología Lean en la gestión energética.

1.4.1. Definición y principios

La filosofía de Lean Manufacturing, también conocida como producción ajustada o esbelta, se originó en el Sistema de Producción Toyota (TPS) y se ha convertido en una estrategia

globalmente reconocida y adoptada para mejorar la eficiencia en la producción y la prestación de servicios. El objetivo principal que persigue es la eliminación de todo desperdicio que añade costos sin añadir valor al cliente (Liker, 2004). Este enfoque engloba una transformación en la mentalidad productiva, abarcando todos los aspectos, desde la recepción de la materia prima hasta el producto terminado.

En tal sentido, es fundamental entender los principios sobre los que se asienta esta filosofía para lograr el éxito en las organizaciones. Los principios del Lean Manufacturing son una serie de conceptos que se enfocan en la minimización de los desperdicios y la mejora continua de los procesos productivos. Por tanto, en el presente trabajo se plantea si este principio de reducción del desperdicio se puede extrapolar al desperdicio energético.

Los principios Lean fueron desarrollados por Taiichi Ohno, y han sido ampliamente adoptados por empresas de todo el mundo. Según James P. Womack & Daniel T. Jones (1996), autores del libro "Lean Thinking", los cinco principios del Lean Manufacturing son:

1. Definir el valor: este principio implica la identificación del valor para los clientes. En el contexto de Lean, el valor se define desde la perspectiva del cliente y es una medida de la utilidad y la satisfacción que un producto o servicio puede proporcionar. En este sentido, se subraya que las organizaciones deben adquirir un compromiso sólido para comprender a sus clientes, así como identificar sus necesidades y expectativas para poder definir el valor de manera precisa y efectiva.
2. Identificar el flujo de valor: este principio aborda la identificación y análisis de todos los pasos necesarios para producir un producto o servicio demandado por el cliente. Tiene el propósito de identificar las actividades que agregan valor añadido, las actividades de apoyo a las que agregan valor y las actividades que son innecesarias.
3. Crear el flujo continuo: destaca la necesidad de diseñar el proceso de producción que tenga en cuenta la demanda. Se busca crear un flujo constante de productos que coincida directamente con las necesidades del cliente. De esta manera se minimiza el desperdicio y mejora la eficiencia.
4. Establecer la producción pull: significa producir solo lo que el cliente necesita, en la cantidad y momento en que lo necesita. En lugar de producir productos para almacenarlos en el inventario, el sistema pull produce productos solo cuando el cliente los solicita. Esto ayuda a reducir los costos de almacenamiento y minimiza el riesgo de producir productos que no se venderán.
5. Perseguir la perfección: el último principio de Lean es la búsqueda de la mejora continua, lo que significa esforzarse constantemente por eliminar el desperdicio y mejorar la

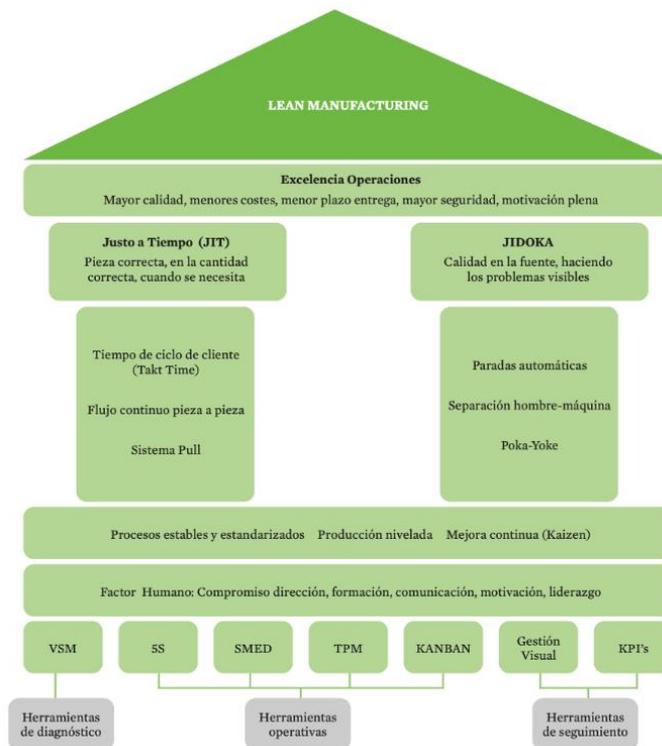
eficiencia en todos los aspectos de la organización. Con la implementación de los cuatro principios mencionados anteriormente, se comienza nuevamente el proceso con el objetivo de optimizarlo.

Esta búsqueda de la perfección implica que la implementación de la filosofía Lean no es un proceso con un final definido, sino un esfuerzo continuo de mejora. A través de un proceso de revisión y perfeccionamiento constante, las empresas pueden continuar mejorando su eficiencia, reduciendo el desperdicio y mejorando la calidad del producto.

1.4.2. Herramientas y Técnicas

En la aplicación de la filosofía Lean, las organizaciones utilizan una serie de herramientas y técnicas que han sido desarrolladas y perfeccionadas con el tiempo. Estas herramientas ayudan a las empresas a identificar y eliminar el desperdicio, mejorar el flujo de trabajo, y responder con mayor rapidez a las demandas del cliente.

Figura 6. Esquema del templo Lean



Fuente: Hernández Matías & Vizán Idoipe (2013). Lean manufacturing. Conceptos, técnicas e implantación

- **Mapa del flujo de valor (Value Stream Mapping – VSM):** Esta es una herramienta de análisis de procesos que utiliza para representar gráficamente todas las acciones, ya sean con o sin valor añadido, que son indispensables en términos de flujo de material físico e

información para entregar un producto al cliente (Rother & Shook, 2003). El VSM ayuda a identificar las áreas de desperdicio y es una herramienta esencial para entender cómo el trabajo fluye a través del sistema.

- **5S:** se trata de una metodología para organizar y mantener los lugares de trabajo en condiciones óptimas. Los cinco "S" representan los pasos en el proceso: *Seiri* (clasificar), *Seiton* (ordenar), *Seiso* (limpiar), *Seiketsu* (estandarizar), y *Shitsuke* (sostener). Hirano (1995) enuncia que los pasos de las 5S están diseñados para mejorar la eficiencia, fortalecer el rendimiento y proporcionar una mejora continua en prácticamente todos los segmentos de la organización.



Fuente: Hirano (1995), 5 Pilares de la Fabrica Visual.

- **Single Minute Exchange of Die (SMED):** el objetivo de SMED es reducir el tiempo que se tarda en completar los cambios de equipo o configuración en entornos productivos. Este método se basa en el principio de que estos cambios y ajustes deben realizarse en menos de 10 minutos, es decir, en un tiempo medido en "un solo dígito" de minutos.

Al reducir estos tiempos de cambio, las empresas pueden potenciar su eficiencia, flexibilidad y productividad, gracias a la capacidad de alternar rápidamente entre tareas de producción y atender con mayor efectividad la demanda de los clientes.

- **Mantenimiento Productivo Total (Total Productive Maintenance – TPM):** se trata de un sistema de mantenimiento integral diseñado para maximizar la eficiencia del equipo de producción y minimizar los tiempos de inactividad.

El TPM se basa en ocho pilares, que incluyen la mejora enfocada, el mantenimiento autónomo, el mantenimiento planificado, la capacitación, la mejora de la eficiencia administrativa, los departamentos de soporte, la seguridad, y el control de la calidad. A través de la implementación de estas prácticas, el TPM busca reducir las seis grandes pérdidas de los equipos de producción: averías, pequeñas paradas, velocidades de operación reducidas, defectos de calidad, pérdidas en la puesta en marcha y pérdidas en el cierre. En tal sentido, al reducir estas pérdidas, las empresas pueden mejorar su eficiencia y productividad operativa, y al mismo tiempo promover una cultura de mantenimiento y mejora continua en toda la organización.

- **Kanban:** se trata de un sistema que funciona mediante el uso de tarjetas, contenedores, o señales digitales para representar la demanda de piezas o productos en un proceso de producción. A modo de ejemplo, cuando una parte del proceso necesita más materiales, envía una señal (el Kanban) al paso anterior del proceso para indicar la necesidad de materiales detectada. Esto asegura que cada paso del proceso sólo produce lo que el siguiente paso necesita, lo que minimiza el exceso de inventario y reduce el desperdicio. De esta manera, el sistema Kanban permite un control de inventario eficiente y un flujo de trabajo continuo.
- **Gestión visual:** se basa en el uso de indicadores visuales de manera que se represente el estado y el rendimiento del sistema productivo. Estos indicadores visuales pueden tomar muchas formas, como tableros de control, diagramas, etiquetas de colores, líneas en el suelo, luces indicadoras, entre otros. Cada uno de ellos sirve para transmitir información de manera rápida y fácil, permitiendo a los trabajadores conocer el estado de la producción, así como la identificación rápida de problemas.
- **Kaizen:** es un enfoque sistemático que busca lograr pequeñas mejoras incrementales en los procesos de producción, con el objetivo de mejorar la eficiencia y la calidad. Kaizen implica identificar oportunidades de mejora, implementar cambios, medir los resultados y luego ajustar los procesos en función de los resultados. Este ciclo de mejora se repite continuamente, lo que lleva a una mejora gradual y constante a lo largo del tiempo. Kaizen puede aplicarse a cualquier aspecto de un negocio, desde la fabricación y el desarrollo de productos hasta las finanzas y los recursos humanos. El objetivo final de Kaizen es eliminar el desperdicio (actividades que no agregan valor al producto final) y crear más valor para los clientes con menos recursos.

- **Heijunka:** se trata de una herramienta que tiene el objetivo de suavizar la demanda de producción para reducir la variabilidad y la ineficiencia; para ello, se centra en la producción de una mezcla constante de productos, en lugar de producir en lotes grandes de un solo tipo de producto hasta que se cumpla la demanda. Con ello, Heijunka ayuda a minimizar los problemas que pueden surgir debido a las fluctuaciones en la demanda o las interrupciones en la cadena de suministro. Al nivelar la carga de trabajo, las organizaciones pueden operar de manera más eficiente, minimizar el desperdicio y respondiendo a los cambios en la demanda del cliente en un menor tiempo.

Como se puede observar en Figura 6, estas herramientas fundamentales del Lean sirven como la base sobre la cual se apoyan los dos pilares esenciales del sistema: las técnicas de Just In Time y Jidoka.

- **Just In Time (JIT):** es un sistema de gestión de producción, cuyo objetivo es minimizar el desperdicio al producir exactamente lo que se necesita, cuando se necesita, y en la cantidad necesaria. Este enfoque se centra en minimizar el inventario y los costos asociados al mismo, al mismo tiempo que mejora la eficiencia y la respuesta al cliente. Al sincronizar la producción con la demanda real del cliente, JIT ayuda a reducir el desperdicio y a maximizar el valor para el cliente.
- **Jidoka:** se trata de prevenir defectos y eliminar el desperdicio al permitir que las máquinas, o los trabajadores, detengan la producción cuando se detecta un problema. Se utiliza con el objetivo de corregir los problemas tan pronto como surgen, teniendo como resultado la obtención de una mayor cantidad de productos de calidad ya que se evita que los productos defectuosos lleguen al cliente.

2. Objetivos

El presente trabajo de fin de grado tiene como objetivo principal analizar y desarrollar una propuesta de aplicación de metodología Lean orientada a la gestión eficiente de la energía. En particular dicha propuesta de aplicación se desarrollará en la industria del acero corrugado. Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y examinar las herramientas Lean que puedan ser útiles en la implementación de un sistema de gestión energética que permita la mejora del desempeño energético.

- Analizar las particularidades de la cadena de suministro de las barras de acero corrugado. En particular, se llevará a cabo un estudio de la etapa de producción que implica la conversión de las palanquillas de acero en barras de acero corrugado como producto final.
- Diagnóstico energético del proceso. Se busca realizar una evaluación de los consumos de energía de los equipos que conforman el proceso de fabricación. Este análisis detallado proporcionará una visión clara de cómo se ejecuta el proceso objeto de estudio, identificando los tipos de energía utilizados.
- Implementación de las herramientas Lean adecuadas para la gestión energética. Este objetivo se centrará en desarrollar una propuesta de aplicación de las herramientas que faciliten la implementación de un sistema de gestión energética. En concreto, dicha propuesta se desarrolla dentro del proceso productivo que conforma la cadena de suministro de las barras de acero corrugado.
- Evaluación del impacto de las intervenciones Lean sobre la gestión energética en el proceso de fabricación específico en estudio. Con ello, se busca ilustrar las oportunidades que puede ofrecer la implementación de las herramientas seleccionadas.

La consecución de estos objetivos permitirá proporcionar la base para una propuesta enfocada en la inclusión de herramientas Lean en un marco de gestión energética para la producción de barras de acero corrugado, un aspecto clave en este sector.

3. Metodología

El análisis y desarrollo de una propuesta de aplicación de las herramientas basadas en la filosofía Lean Manufacturing para mejorar la gestión energética en el proceso de fabricación de barras de acero corrugado se desglosa en las siguientes fases que conforman la metodología del presente estudio.

Fase 1: Análisis de las herramientas de Lean Manufacturing para la gestión energética

En esta fase, se analizarán las herramientas y técnicas de Lean Manufacturing más efectivas en la gestión energética, para ello se llevará a cabo un estudio de investigaciones relacionadas con Lean Manufacturing, la gestión energética y sus posibles sinergias. La elección de las herramientas se

realizará teniendo en cuenta su aplicabilidad a la implementación de un Sistema de Gestión Energética basado en la norma ISO 50001.

Fase 2: Evaluación de la cadena de suministro de las barras de acero corrugado.

En la segunda fase, se evaluará la cadena de suministro de las barras de acero corrugado, para más tarde centrar el estudio en la cadena productiva. El objetivo de esta fase es identificar las particularidades de la cadena de suministro y las implicaciones de la etapa productiva en la misma.

Fase 3: Desarrollo de la propuesta de aplicación

Una vez identificadas las herramientas Lean, en la tercera fase se diseñará y desarrollará una solución técnica. Esta solución incluirá una propuesta de aplicación de las herramientas seleccionadas al proceso que ocurre en una planta de laminación en caliente de barras de acero corrugado.

Fase 4: Evaluación de la eficacia de la solución

Por último, se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los resultados esperados de la propuesta de aplicación, donde se discutirá la efectividad de la solución propuesta para mejora en términos de gestión energética y sostenibilidad. Asimismo, se presentará una valoración económica de la solución propuesta.

Esta valoración proporcionará información valiosa sobre el impacto de la implementación de la metodología Lean en este contexto del presente trabajo.

4. Análisis de herramientas Lean para la gestión energética

Una gestión energética eficiente conlleva un gran despliegue de herramientas adecuadas para lograr el propósito de cada etapa. Por tanto, el siguiente apartado se centra analizar cómo las herramientas Lean pueden tener un gran potencial de integración en un contexto de gestión energética.

En primer lugar, en el sistema de gestión que propone la norma ISO 50001 presentado en el apartado de introducción (Figura 5), se observa que la planificación y sus componentes emergen como elementos esenciales. Estos constituyen una parte fundamental de un SGEN ya que ofrecen el cimiento para la creación de una estrategia destinada a mejorar el rendimiento energético, estableciendo metas concretas y actividades para las organizaciones (Castrillón Mendoza, 2021).

Dentro de esta etapa se enmarca el requisito de revisión energética cuyo objetivo es el de proporcionar una visión sobre el desempeño energético de la organización. Para realizar este diagnóstico las organizaciones utilizan diversas herramientas como gráficos, tablas, hojas de cálculo, diagramas de Sankey, lluvia de ideas, entre otros (Castrillón Mendoza & González Hinestroza, 2018, p.56).

La herramienta de diagnóstico por excelencia de Lean es el Value Stream Mapping (Figura 6), esta herramienta tradicionalmente se ha aplicado para el análisis y representación de la cadena de valor de un producto, destacando los procesos que agregan valor y los que no (Rother & Shook, 2003). No obstante, en los últimos años el alcance de esta herramienta se ha ido ampliando hasta el desarrollo de un nuevo enfoque denominado Energy Value Stream Mapping (EVSM), el cual es un modelo centrado en los componentes energéticos de los procesos. El EVSM permite identificar el nivel de utilización y despilfarro de energía en cada paso y por ende, permite determinar las oportunidades de mejora en el desempeño energético (Verma & Sharma, 2016).

Por tanto, en el marco de los requisitos de un sistema de gestión energética, véase Figura 7, esta herramienta alberga un importante potencial para implementarse en la etapa de revisión energética (sección 6.3). Al facilitar la visualización del flujo energético en los procesos y entender dónde se consume más energía, permite identificar prioridades y establecer necesidades en términos de eficiencia energética.

Figura 7. Requisitos norma ISO 50001:2018

Planificar	4. Contexto de la organización	4.1 Comprensión de la organización y su contexto
		4.2 Comprensión de las necesidades y las expectativas de las partes interesadas
		4.3 Determinación del alcance del sistema de gestión de la energía
		4.4 Sistema de gestión de la energía
	5. Liderazgo	5.1 Liderazgo y compromiso
		5.2 Política energética
		5.3 Roles, responsabilidad y autoridades en la organización
	6. Planificación	6.1 Acciones para abordar los riesgos y oportunidades
		6.2 Objetivos, metas energéticas y planificación para lograrlos
		6.3 Revisión energética
		6.4 Indicadores de desempeño energético (IDEn)
		6.5 Líneas de base energética (LBEn)
		6.6 Planificación para la recopilación de datos de la energía
	7. Apoyo	7.1 Recursos necesarios
		7.2 Competencia de las personas relacionadas con el SGE
7.3 Toma de conciencia		
7.4. Comunicación interna y externa		
7.5 Información documentada		
Hacer	8. Operación	8.1 Planificación y control operacional
		8.2 Diseño en base al desempeño energético y control operacional
		8.3 Adquisición en base al desempeño energético
Verificar	9. Evaluación del desempeño	9.1 Seguimiento, medición, análisis y evaluación del desempeño energético y del SGE
		9.2 Auditoría interna
		9.3 Revisión por la dirección
Actuar	10. Mejora	10.1 No conformidad y acción correctiva
		10.2 Mejora continua

Fuente: Elaboración propia a partir de la norma ISO 50001:2018

Asimismo, como se puede observar en la Figura 7, la siguiente etapa es la operación. La norma ISO 50001 requiere que las organizaciones implementen, operen y controlen los planes de acción diseñados para mejorar la eficiencia energética. En concreto, en la sección 8.1 se establece que las organizaciones deben planificar, implementar y controlar los procesos relacionados con sus usos significativos de la energía (USE), destacando los controles operacionales y “el mantenimiento eficaz de las instalaciones, el equipo, los sistemas, y los procesos que utilizan energía, en los cuales su ausencia puede conducir a un desvío significativo del desempeño energético previsto” (UNE-EN ISO 50001:2018, p. 28). Teniendo en cuenta esta premisa, al analizar las herramientas operativas tradicionales como 5S, SMED, TPM y Kanban (Figura 6), destaca la herramienta de Mantenimiento Productivo Total (TPM) por su enfoque hacia un correcto desarrollo de las operaciones mediante un mantenimiento exhaustivo y anticipado de los equipos que implican consumos energéticos.

Aunque las herramientas como 5S, SMED y Kanban son cruciales para mejorar la eficiencia y fluidez de los procesos, estas no enfatizan directamente en mejora del desempeño energético. Como se ha visto en la sección de introducción a Lean, las 5S se enfoca en la organización y limpieza del lugar de trabajo, SMED se centra en la reducción del tiempo de cambio de herramientas, y Kanban es una herramienta de gestión visual para el control de la producción.

La herramienta de Mantenimiento Productivo Total (TPM) busca maximizar la eficiencia de los equipos a lo largo de todo su ciclo de vida a través de la prevención de los problemas, la mejora de los equipos y la implicación de los empleados.

En concreto, relacionado con los objetivos mencionados que plantea la norma en relación al mantenimiento, la herramienta (TPM) promueve el mantenimiento para garantizar el funcionamiento en las condiciones óptimas (Ahuja & Khamba, 2008). Por lo tanto, es una herramienta con un enorme potencial para garantizar un mantenimiento efectivo que prevenga la desviación energética de los equipos debido a que estos no se encuentren en condiciones óptimas.

Como se puede inferir, la metodología Lean y la norma ISO 50001 comparten los principios referentes a la eliminación del desperdicio (en este caso, desperdicio de energía), el impulso de participación y en la mejora continua (como se establece en la sección 10.2 de la norma). Este último principio concuerda con el concepto de Kaizen, que es fundamentalmente la aplicación de la mejora constante.

El propósito de esta herramienta es el de promover una cultura de continua búsqueda de eficiencias y optimizaciones en los procesos de trabajo. Una forma táctica de aplicar los principios de esta herramienta es a través de los denominados “eventos Kaizen”, un evento Kaizen se definen como “un proyecto de mejora centrado y estructurado, que utiliza un equipo para mejorar un área de trabajo específica, con objetivos concretos, en un plazo de tiempo acelerado” (Farris et al., 2008).

La Agencia de Protección del Medio Ambiente (Environmental Protection Agency, 2007) resalta el potencial de estos eventos para analizar y erradicar de forma más exhaustiva los hábitos despilfarradores de energía una vez que una organización ha identificado aquellos segmentos de producción que son intensivos en el consumo de energía o que son responsables de una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por tanto, el concepto Kaizen es directamente aplicable y beneficioso para la implementación y el mantenimiento de la norma ISO 50001 de gestión energética ya que puede ser aplicada con el objetivo de crear oportunidades significativas destinadas a erradicar el despilfarro energético (Environmental Protection Agency, 2007).

Como conclusión de este análisis, se puede establecer que la combinación de herramientas como el Energy Value Stream Mapping (EVSM), el Mantenimiento Productivo Total (TPM) y eventos Kaizen en el proceso de implementación de un Sistema de Gestión Energética bajo el marco de la norma ISO 50001, puede representar un aporte significativo para aquellas organizaciones que persiguen el objetivo de analizar, mejorar y optimizar su rendimiento energético. Estas herramientas no solo ofrecen la posibilidad de identificar áreas de ineficiencia, sino que también promueven un enfoque proactivo y continuo hacia la mejora, lo que se alinea perfectamente con los principios de la norma. En consecuencia, estas estrategias podrían ser clave para lograr un uso más eficiente de la energía.

5. Análisis del proceso objeto de estudio

El análisis previo ha servido para investigar y determinar las herramientas lean óptimas para apoyar una gestión eficiente de la energía. En base a estos hallazgos, se pretende desarrollar una propuesta de aplicación que sirva como guía práctica para las organizaciones que están explorando opciones de herramientas alineadas con la implementación de un SGen.

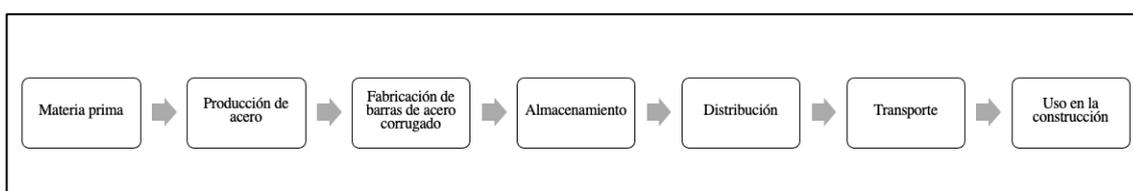
En concreto, en el presente trabajo se desarrollará una propuesta dentro de la cadena de suministro de las barras de acero corrugado. Por la importancia energética y la relevancia en dicha cadena,

se ha determinado la evaluación de las herramientas para la gestión energética en la cadena de fabricación.

5.1. Cadena de suministro del acero corrugado

El acero corrugado es un material esencial en una variedad de sectores, incluyendo la construcción y la ingeniería. Como se puede observar en la Figura 8 la cadena de suministro de este producto comprende actividades que van desde la adquisición de las materias primas, su transformación en acero, la fabricación de las barras, el almacenamiento, distribución, transporte y la entrega final al consumidor.

Figura 8. Cadena de suministro de las barras de acero corrugado



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla la misma:

- **Materia prima:** existen dos materias primas esenciales a partir de las cuales se puede obtener acero.
 - El arrabio, que se produce a partir de mineral de hierro en instalaciones equipadas con un alto horno, en un proceso conocido como proceso integral.
 - La chatarra, que pueden ser tanto férricas como inoxidable.
- **Producción de palanquillas de acero:** el proceso de obtención del acero se puede dar por:
 - **Alto horno:** el mineral de hierro se funde junto con coque y caliza a altas temperaturas para producir hierro fundido. Tras ello, el hierro fundido se refina para eliminar las impurezas y producir acero.
 - **Horno eléctrico:** en este método se recicla la chatarra de acero usando electricidad para fundirla y producir acero. Este proceso permite una mayor flexibilidad en la producción de diferentes grados de acero.

El acero producido se vierte luego en moldes y se solidifica para formar palanquillas, que son productos semiacabados que sirven de base para la fabricación de barras de acero corrugado.

- Fabricación de barras de acero corrugado: este proceso se inicia con el recalentamiento de las palanquillas de acero a altas temperaturas, de manera que se facilite su deformación. A continuación, pasan por el proceso de laminación en caliente se transforman en barras largas y delgadas con el relieve corrugado para aumentar su resistencia y mejorar su adherencia al hormigón.
- Almacenamiento: las barras de acero corrugado se almacenan en un entorno controlado para prevenir daños, deformaciones y corrosión. Los almacenes suelen estar diseñados para facilitar la accesibilidad y manejo de las barras.
- Distribución: las barras de acero corrugado se distribuyen a los minoristas, distribuidores y, en algunos casos, directamente a los sitios de construcción. Esta etapa implica una planificación logística para garantizar que las barras lleguen a su destino a tiempo.
- Transporte: durante esta etapa, las barras de acero corrugado se transportan desde las instalaciones de almacenamiento hasta los sitios de construcción
- Uso en la construcción: las barras de acero corrugado se utilizan en la construcción de estructuras de hormigón armado, como edificios, puentes y carreteras. Su resistencia y durabilidad las hacen indispensables en la industria de la construcción.

consumo energético que supone y su repercusión en la cadena de suministro, principalmente en la producción del acero, el presente proyecto se centrará en la gestión energética en la fabricación del acero corrugado a partir de las palanquillas de acero. Esta fase tiene una gran relevancia en las etapas iniciales de la cadena ya que cualquier desperdicio o barra defectuosa que se produzca deberá ser reprocesada. Este reproceso implica un consumo adicional de energía para refundir y transformar nuevamente estos materiales en palanquillas.

Por lo tanto, la necesidad de una gestión energética efectiva en la producción de acero corrugado se centra en tres áreas principales:

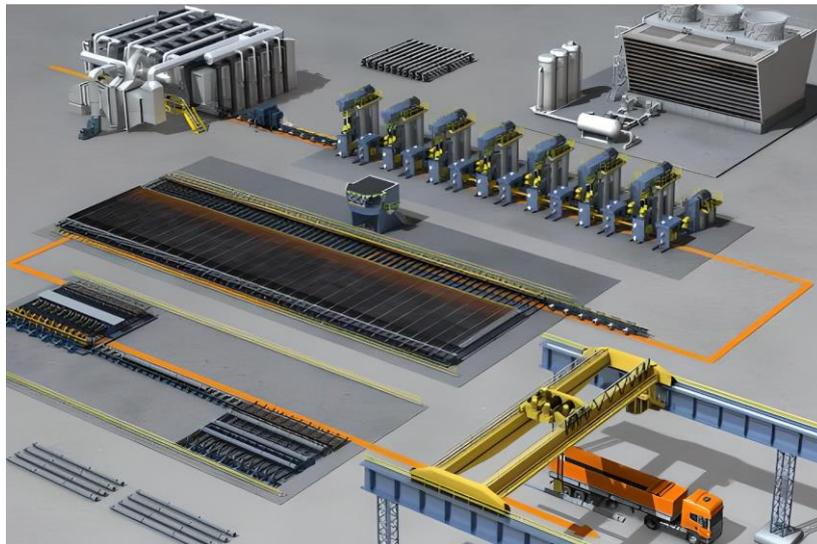
Costos: El uso eficiente de la energía puede generar ahorros significativos en los costos de producción. Al minimizar el consumo de energía y optimizar su uso, las empresas pueden reducir sus gastos operativos y mejorar su competitividad en el mercado.

Como se ha mencionado la gestión energética se lleva a cabo a través de la implantación de un Sistema de gestión energética el cual se puede aplicar a cualquier organización independientemente de su tamaño.

5.2. Fabricación de barras de acero corrugado

Aries et al., (2022) en el documento de referencia “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry” [Mejores técnicas disponibles (MTD) Documento de referencia para la industria de transformación de metales ferrosos] emitido por la Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, exponen las siguientes fases para el proceso de laminación en caliente: recalentamiento a la temperatura de laminación, descascarillado, tren de laminación, enfriamiento y acabado, que en el caso de las barras de acero corrugado, consiste en el corte de las barras a las medidas comerciales.

Figura 9. Esquema planta de laminación en caliente



Fuente: (IFM, 2016, p. 28-29)

A continuación, se detallan estas etapas que componen el proceso de fabricación de barras de acero corrugado a partir de planchillas de acero:

Recalentamiento: lleva a cabo el proceso de recalentamiento de las planchillas, el cual es crucial en el proceso de laminación en caliente ya que prepara el material para ser sometido a deformaciones plásticas. El objetivo principal del recalentamiento es llevar las planchillas a una temperatura uniforme y adecuada que permita una deformación controlada durante la laminación.

Eleva la temperatura de las planchillas de acero gradualmente hasta alcanzar su temperatura de laminación en caliente deseada, que generalmente se encuentra alrededor de 1200° C (Groover, 2007). Tras ello, las planchillas de acero se extraen del horno de recalentamiento y se transportan al tren de laminación.

Figura 10. Horno de recalentamiento de vigas galopantes [Walking Beam]



Fuente: (Ingener Furnaces, s. f.)

Descascarillado: Tras el calentamiento, el metal se somete al proceso de descascarillado. Esto implica rociar el metal con agua a alta presión para eliminar la capa de óxido que se forma durante el calentamiento. El objetivo de este proceso es eliminar todas las impurezas y residuos superficiales que podrían afectar negativamente la calidad y la resistencia del producto final.

Figura 11. Máquina de descascarillado



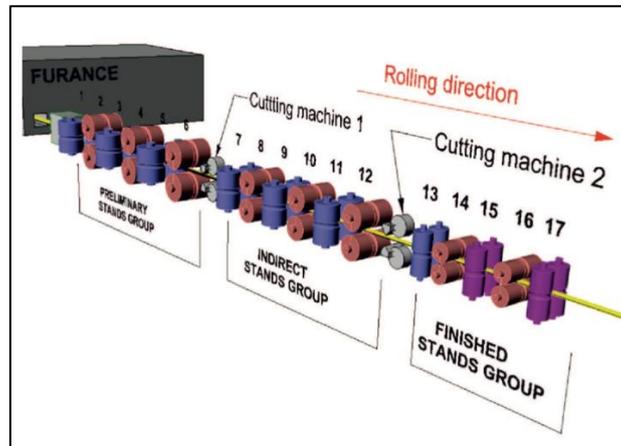
Fuente: (IFM, 2016, p. 36)

Laminación: consiste en reducir el espesor o cambiar la sección transversal de una pieza inicial de trabajo aplicando fuerzas de compresión mediante un conjunto de rodillos (Kalpakjian & Schmid, 2014). Este proceso se aprovecha de la ductilidad del acero, propiedad que le otorga la capacidad de deformarse pues el proceso requiere de una gran cantidad de deformación (Groover, 2007).

Este proceso de laminación ocurre en un conjunto de stands que conforman el tren de laminación de manera que la transformación en la sección final ocurre progresivamente. El tren laminador se conforma de una serie de cajas de laminación (**¡Error! No se encuentra el origen de la**

referencia.) cuya función principal es aplicar fuerza de compresión sobre el material en bruto a medida que pasa por ellas, reduciendo así su sección transversal y logrando la forma y dimensiones deseadas del producto final.

Figura 12. Esquema del proceso de laminación continua



Fuente: (Szota et al., 2011)

La primera etapa del proceso es el desbaste, en el cual las palanquillas son sometidas a una serie de reducciones de espesor en cajas de laminación consecutivas. A continuación, las palanquillas son transferidas al tren de laminación intermedio, donde se seguirá reduciendo la sección transversal del material, logrando así un diámetro menor. Esta etapa de laminado sucesivo permite un control más preciso del tamaño y la sección de las barras de acero.

La última fase del proceso de laminación es el acabado, en el cual las barras de acero son sometidas a una última pasada en la que se ajusta a los requerimientos y estándares de calidad necesarios. Durante esta etapa, se moldea la geometría corrugada en la superficie de las barras, las cuales incrementan la superficie de contacto y mejoran la adherencia entre el acero y el hormigón armado en las construcciones donde se emplearán las barras.

Enfriamiento: tras el paso por el tren de laminación, las barras ya corrugadas se encuentran a temperaturas elevadas. Es por ello por lo que, para lograr un producto con las propiedades mecánicas requeridas, es fundamental que se lleve a cabo un proceso de enfriamiento controlado.

Figura 13. Mesa de enfriamiento



Fuente: (METECH Group., s. f.)

Estos sistemas están diseñados para reducir la temperatura de las barras de manera uniforme y controlada, a fin de evitar tensiones residuales y asegurar una microestructura homogénea en el producto final.

Corte: el cortado es el proceso mediante el cual las barras de acero corrugado se ajustan a la longitud y dimensiones requeridas utilizando una cortadora. Cabe destacar que es importante garantizar que el corte se realice de manera precisa y sin dejar rebabas en las barras, ya que esto podría afectar su desempeño en la estructura de concreto.

Figura 14. Cizalla de corte



Fuente: Web de la compañía proveedora (NCO, s. f.)

6. Solución: propuesta de aplicación

Tras analizar y determinar las herramientas Lean con aplicación en la gestión energética, a continuación, se procederá a desarrollar una propuesta de aplicación de estas herramientas para el proceso de fabricación de las barras de acero corrugado.

Como se ha señalado previamente, el Value Stream Mapping (VSM) se presenta como una técnica de visualización permite abordar el requisito de revisión energética de la norma UNE-EN ISO 50001:2018 ya que facilita la interpretación del flujo energético y permite identificar dónde se registra el mayor consumo de energía. No obstante, para realizar esta representación de manera efectiva, es fundamental en primer lugar, conocer los equipos que conforman el proceso y sus consumos estimados.

Asimismo, este diagnóstico energético permitirá también implementar de manera adecuada las técnicas de Mantenimiento Productivo Total y la estrategia Kaizen, orientada a la mejora continua, pues se tendrá un conocimiento previo de los equipos que estarán sujetos al mantenimiento, su relevancia dentro del proceso, así como los equipos sobre los que se pretende mejorar.

6.1. Diagnóstico energético

Las organizaciones productoras de acero cuentan con diferentes requerimientos de diferentes tipos de energía de acuerdo con su aplicación final. Por ello, para llevar a cabo el presente proyecto es importante entender qué tipo de energía se requiere para la producción de barras de acero corrugado.

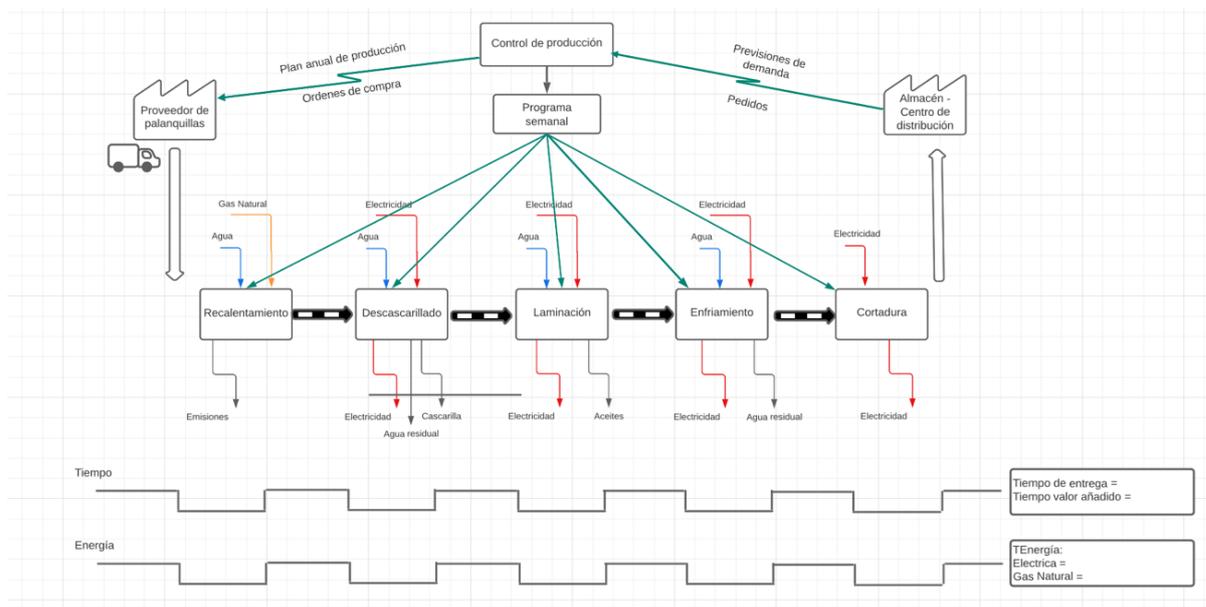
Fuente de energía	Energía aplicada	Equipos	Unidad de medida
Gas natural	Térmica	Horno de recalentamiento	m ³ de gas
Electricidad	Mecánica	Descascarilladora	kWh
Electricidad	Mecánica	Tren de laminación en caliente	kWh
Electricidad	Mecánica	Mesa de enfriamiento	kWh
Electricidad	Mecánica	Cizalla de corte	kWh

Como se puede observar en el proceso principalmente interviene el consumo de gas natural y la electricidad.

6.2. Energy Value Stream Mapping

A continuación, se muestra un modelo que recoge los procesos analizados previamente. Para un correcto análisis, en una planta de laminación en caliente habría que realizar las respectivas mediciones de consumo e incluirlas en dicho Modelo.

Figura 15. Modelo EVSM



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar esta herramienta permite abordar los siguientes requisitos contenidos en la norma UNE-EN ISO 50001:2018:

- Identificar los tipos de energía actuales.
- Identificar los USE (Usos Significativos de la energía), que según el apartado 3.5.6 de la norma se trata un uso de energía que representa un consumo de energía sustancial y/o que ofrece un potencial considerable para la mejora del desempeño energético.
- Determinar el desempeño energético actual
- Determinar las variables relevantes

6.3. Mantenimiento productivo total (TPM)

Para desarrollar la propuesta de aplicación de la herramienta de Mantenimiento Productivo Total como estrategia para cumplir el requisito 8.1 de la norma como se ha establecido en la sección de análisis, es fundamental enfocar los esfuerzos en el desarrollo de un programa de mantenimiento adecuado. Este programa debería centrarse en la optimización del rendimiento energético de las equipos, sistemas y procesos que consumen energía.

La implantación del Mantenimiento Productivo Total requiere una planificación detallada y considerada que debe abordar los pilares fundamentales de dicha herramienta, los cuales incluyen: mantenimiento autónomo, mantenimiento preventivo, mantenimiento de calidad, mejora continua, capacitación, seguridad y medioambiente. En la esta propuesta se planificarán actividades que faciliten la adhesión a estos pilares fundamentales.

Figura 16. Diagrama de Gantt para la implantación TPM

Implantación TPM	Nº de actividad	Actividad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Fase 1: Preparación	1.1	Presentación del proyecto TPM	I	II	III	IV								
	1.2	Formación general TPM		I	II	III	IV							
	1.3	Creación grupo de trabajo TPM			I	II	III	IV						
	1.4	Determinación de metas y objetivos claros para la implementación.			I	II	III	IV						
	1.5	Diseño Plan Maestro de implementación TPM			I	II	III	IV						
Fase 2: Introducción	2.1	Evaluación de planes			I	II	III	IV						
	2.2	Ajuste de planes			I	II	III	IV						
	2.3	Reunión de presentación de planes a desarrollar			I	II	III	IV						
Fase 3: Implementación	3.1	Formación específica de operarios:												
	3.1.1	Formación térmica			I	II	III	IV						
	3.1.2	Formación eléctrica			I	II	III	IV						
	3.1.3	Formación mecánica			I	II	III	IV						
	3.2	Ejecución de mantenimiento planificado			I	II	III	IV						
	3.4	Ejecución de mantenimiento autónomo			I	II	III	IV						
	3.5	Labores administrativas de apoyo al TPM			I	II	III	IV						
	3.6	Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad			I	II	III	IV						
	3.7	Evaluación de cumplimiento de normas ambientales			I	II	III	IV						
	Fase 4: Consolidación	4.1	Reuniones de seguimiento											
4.2		Evaluación de objetivos trazados												

Fuente: elaboración propia.

La propuesta de implantación de la herramienta TPM engloba las siguientes fases:

6.3.1. Fase 1: Preparación

- **Presentación del proyecto TPM:** la presentación del proyecto de Mantenimiento Productivo Total constituye una fase esencial en el proceso de implementación ya que este paso inicial permite a los miembros de la organización familiarizarse con el concepto de TPM y su relevancia para la eficiencia y el rendimiento operativo general.

El logro de un compromiso y apoyo significativos de todos los niveles de la organización es un factor determinante para el éxito de la implementación de esta herramienta. La presentación debe involucrar a todos los miembros de la organización, desde la alta

dirección hasta los operarios en la línea de producción, para garantizar que todos entiendan su papel y responsabilidad en la implementación y la consolidación de esta herramienta.

- **Formación general TPM:** el propósito de esta actividad es otorgar a los miembros de la organización una visión holística y comprensiva del Mantenimiento Productivo Total (TPM, por sus siglas en inglés). Se busca introducir a los empleados en los fundamentos del TPM, ayudándoles a comprender sus objetivos, su relevancia en el contexto empresarial y su impacto en la productividad y eficiencia de la organización.
- **Creación de grupo de trabajo TPM:** la formación de Grupos de Trabajo TPM constituye una pieza fundamental en la propuesta. Estos grupos, compuestos por miembros de diversas áreas y niveles de la organización, tendrán la responsabilidad de analizar las deficiencias de mantenimiento en la planta. Asimismo, serán los encargados de llevar a cabo las labores de evaluación de cumplimiento de lo dispuesto.

Tabla 1. Modelo de grupo de trabajo TPM

Cargo	Formación
Jefe de producción	Ingeniero industrial
Jefe de mantenimiento	Ingeniero mecánico
Jefe de calidad y medioambiente	Ingeniero metalúrgico
Supervisor de mantenimiento de equipos térmicos	Técnico Superior en Mantenimiento de Instalaciones Térmicas y de Fluidos
Supervisor de mantenimiento eléctrico	Técnico en Mantenimiento Eléctrico

Fuente: elaboración propia

- **Diseño del Plan Maestro de implementación:** el Plan Maestro sirve como una hoja de ruta para la implementación del TPM, detallando los pasos necesarios, el tiempo y los recursos necesarios. En concreto, contiene la información necesaria para llevar a cabo el mantenimiento autónomo y el mantenimiento programado.

Mantenimiento autónomo: este pilar del TPM destaca la necesidad de capacitar al personal de operación para que conozcan los aspectos fundamentales de funcionamiento y la seguridad de las máquinas que operan. Una manera de integrar este pilar es a través de plantillas de inspección y limpieza como el que se muestra a continuación.

Figura 17. Modelo para actividades de inspección y limpieza

FORMATO		INSPECCIÓN Y LIMPIEZA DE EQUIPOS					
CÓDIGO:							
FECHA:							
VERSIÓN:		DATOS DEL EQUIPO			RUTINA		
DATOS DEL OPERARIO		NOMBRE			ACTIVIDAD	OK	NO OK
Nombre				1			
Área		MODELO		2			
Nº de trabajador		Nº DE SERIE		3			
				4			
		ÁREA		5			
				6			
OBSERVACIONES							
SOLICITUDES							

Fuente: Elaboración propia

6.3.2. Fase 2: Introducción

- Evaluación de planes desarrollados:** el propósito de esta actividad es asegurar que los planes propuestos no solo sean realistas y factibles, sino también efectivos en términos de alcanzar los objetivos definidos. Este análisis detallado debe ser llevado a cabo por el jefe de planta e incluye la evaluación de la coherencia de las acciones previstas, la viabilidad de los recursos requeridos, el potencial de los beneficios previstos, y la idoneidad de los plazos establecidos.
- Ajuste de planes:** el grupo de trabajo TPM llevará a cabo una revisión meticulosa de los planes propuestos y su respectiva corrección. En este proceso se realizarán los cambios necesarios, basándose en los resultados de la evaluación previa. No se limitará a ajustes menores, sino que también podría involucrar cambios significativos en los planes originales. Los ajustes pueden incluir la reasignación de recursos, la modificación de los tiempos de ejecución, la revisión de las estrategias adoptadas e incluso la redefinición de los objetivos. La idea principal es optimizar los planes para maximizar la eficiencia y la efectividad de los resultados finales.
- Reunión de presentación de planes a desarrollar:** los planes finales ajustados por el grupo de trabajo TPM se comunicarán al jefe de planta, exponiendo lo dispuesto. Esta presentación será fundamental para garantizar que todas las partes interesadas estén al tanto de los próximos pasos y comprendan sus roles y responsabilidades en la implementación de los planes.

6.3.3. Fase 3: Implementación

- **Formación específica de operarios:** estos programas de formación tienen como finalidad garantizar que los operarios adquieran las habilidades y conocimientos indispensables para la correcta implementación del mantenimiento en sus respectivas áreas de responsabilidad. En concreto, esta formación específica irá relacionada con los aspectos térmicos del horno de recalentamiento, la mecánica de los equipos y la parte eléctrica de los mismos.
- **Ejecución de mantenimiento planificado y autónomo:** en esta etapa se desarrollarán los planes de mantenimiento creados el mantenimiento regular de los equipos por parte de los operarios y equipos de mantenimiento.
- **Labores administrativas de apoyo al TPM:** se designará a una persona de la oficina de administración para llevar a cabo tareas esenciales de soporte. Estas tareas pueden ser la actualización de la documentación del TPM, el seguimiento del progreso de la implementación, la gestión de los recursos necesarios para el mantenimiento, y la facilitación de la comunicación interna. Esta persona será crucial para garantizar que los aspectos administrativos del TPM se gestionen de manera eficaz, permitiendo así que la implementación del TPM sea lo más fluida posible.
- **Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad y ambientales:** el grupo de trabajo TPM se encargará de garantizar que la implementación del TPM cumpla con todas las normas y reglamentos de seguridad y medioambientales aplicables. Esto implica supervisar regularmente las operaciones para identificar cualquier desviación de las normas y tomar medidas correctivas de inmediato. Además, este grupo también verificará que las prácticas de TPM estén alineadas con la sostenibilidad y las buenas prácticas medioambientales, lo que refuerza el compromiso de la organización con la protección del medio ambiente y la responsabilidad social.

6.3.4. Fase 4: Consolidación

- **Reuniones de evaluación:** estas reuniones tienen como objetivo evaluar periódicamente el progreso de la implementación de la herramienta propuesta en la organización. Este tipo de encuentros proporciona una plataforma para evaluar las actividades de

mantenimiento preventivo y mantenimiento autónomo se están cumpliendo, así como recalibrar los planes de mantenimiento en caso de no demostrar un rendimiento efectivo.

- **Medición de objetivos trazados:** esta fase de seguimiento y medición es crucial para entender la eficacia de la implementación del TPM. En esta etapa, se realizará un análisis comparativo entre el rendimiento actual del TPM y los objetivos que se establecieron al comienzo del proceso de implementación. Esta medición permite identificar las áreas en las que se ha logrado el éxito, así como aquellas que requieren ajustes o mejoras adicionales. Al comparar estos resultados con los objetivos iniciales, la organización puede evaluar su desempeño y trazar un camino claro hacia la mejora continua y el logro de la excelencia operativa y del desempeño energético de los equipos que conforman la línea de proceso.

6.4. Evento Kaizen

El presente apartado tiene como objetivo desarrollar un marco para la integración de los denominados eventos Kaizen orientados a la búsqueda de soluciones de mejora. Estos eventos permitirán identificar y abordar continuamente oportunidades de mejora en las prácticas y procesos de uso de energía.

La mayoría de los eventos Kaizen se desarrollan en sesiones de trabajo concentradas que duran de 3 a 5 días Van Aken et al., (2010). Sin embargo, existen diversas actividades que se deben de realizar antes y después para asegurar un correcto desarrollo del evento. Por tanto, bajo esta premisa, a continuación, se desarrolla el cronograma de actividades a llevar a cabo. Es importante destacar que este esquema de planificación refiere a un solo evento Kaizen. No obstante, para una efectiva mejora continua, este tipo de eventos deberían llevarse a cabo varias veces a lo largo del año.

Figura 18. Planificación evento Kaizen

Planificación Evento Kaizen		Mes 1				Mes 2				Mes 3			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Preparación de Kaizen	Formación del equipo	■											
	Identificación de oportunidades	■											
	Definición de objetivos	■											
	Recolección de datos	■											
	Reunión de verificación		■										
	Desarrollo del evento Kaizen			■									
Seguimiento de Kaizen	Presentación de conclusiones				■								
	Revisión de mejoras propuestas				■								
	Seguimiento y evaluación						■				■		

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan dichas actividades:

- **Creación del equipo kaizen:** como primer paso la organización debe crear un equipo multidisciplinario compuesto por personas de diversas áreas y niveles de la organización ya que la diversidad del equipo es fundamental, pues permite obtener diferentes perspectivas y una visión más completa de los procesos que se están mejorando con una orientación energética.
- **Identificación de oportunidades:** en esta fase el equipo Kaizen evaluará el proceso de laminación con el fin de detectar oportunidades de mejora en la eficiencia energética. En concreto, las actividades de identificación de mejoras estarán orientadas a evaluar el correcto cumplimiento de las mejores prácticas para el proceso de laminación. Para ello, se tomará como referencia el documento de mejores prácticas, y se realizará un análisis detallado para determinar en qué medida se están cumpliendo estas prácticas y dónde existen oportunidades de mejora. A continuación, a modo de ejemplo se muestra algunas técnicas recogidas en dicho documento.

Figura 19. Ejemplo de mejores técnicas para hornos de recalentamiento

Técnicas
Optimizar condiciones de encendido a través de la aplicación de procesos de automatización y control de los hornos
Minimizar el exceso de aire o pérdida de calor durante la carga mediante medidas operativas
Optimizar la recuperación de calor en el gas de escape mediante el precalentamiento del material de alimentación
Optimizar la recuperación de calor en el gas de escape mediante quemadores regenerativos o recuperativos
Optimizar la recuperación de calor en el gas de escape con calderas de vapor perdido o refrigeración por evaporación
Evaluar las limitaciones de la temperatura de precalentamiento del aire
Empleo de reducción catalítica selectiva (RCS)
Empleo de método de reducción no catalítica selectiva (RNCS)

Fuente: Elaboración propia a partir del documento “Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry” (Aries et al., 2022, p. 134-169)

El propósito de esta actividad es habilitar al equipo Kaizen para guiar las próximas iniciativas enfocadas en la optimización de la eficiencia energética y también para mejorar y perfeccionar las prácticas ya establecidas dentro de la organización.

- **Definición de los objetivos:** una vez identificadas las oportunidades, el equipo debe establecer los objetivos claros y medibles para el evento Kaizen. En consecuencia, los objetivos deben estar relacionados con la mejora de la eficiencia energética
- **Recolección y análisis de datos:** el equipo recogerá y analizará los datos relacionados a las oportunidades de mejora identificadas. Se abordará aspectos como el consumo de energía, la eficiencia de procesos y la utilización de recursos. Esta recopilación ofrecerá una imagen detallada del estado actual del desempeño energético y de los posibles desafíos que impiden su optimización.
- **Reunión de verificación:** se trata de una reunión coordinada en la que todos los miembros del equipo Kaizen se reunirán para verificar y discutir los datos recolectados y los hallazgos obtenidos del análisis exhaustivo. En tal sentido, esta reunión es fundamental para garantizar la coherencia y precisión de los datos, así como para asegurar que todos los miembros del equipo tengan un entendimiento común del problema.
- **Desarrollo del evento Kaizen:** este evento deberá congregarse a todos los integrantes del equipo con la meta clara de perfeccionar un área o proceso específico dentro de las operaciones de la organización. Para ello, se enfatizará en la colaboración activa y la toma de decisiones basada en evidencias en pos de lograr un avance significativo en la eficiencia energética.

El objetivo es hacer cambios tangibles que mejoren la eficiencia energética y reduzcan el desperdicio energético.

- **Presentación de conclusiones:** al final del evento Kaizen, el equipo deberá presentar sus conclusiones al jefe de la planta de laminación en caliente. Esto puede incluir una descripción detallada de los problemas identificados, las soluciones implementadas, los resultados obtenidos y las tareas próximas. En consecuencia, estas conclusiones deben ser claras y basadas en los datos recogidos y analizados.

- **Revisión de mejoras propuestas:** esta fase implicará un análisis exhaustivo realizado por el equipo Kaizen sobre los resultados derivados de las mejoras sugeridas durante el evento Kaizen. Este análisis no sólo se centrará en la eficacia inmediata de las propuestas, sino también en su impacto a largo plazo y en su sostenibilidad.
- **Seguimiento y evaluación:** finalmente, el equipo debe realizar el seguimiento y evaluación de las mejoras implementadas. Esto implica monitorear los cambios en el rendimiento y la eficiencia energética a lo largo del tiempo, y ajustar las mejoras si es necesario. En concreto, como se puede observar en la Figura 18 se han establecido dos actividades de seguimiento, el primero tras las 3 semanas después del evento Kaizen y el siguiente dos meses después.

El seguimiento y la evaluación son cruciales para asegurar que las mejoras realizadas tengan un impacto duradero y ayuden a la organización a cumplir con sus objetivos de eficiencia energética y conformidad con la norma ISO 50001.

7. Resultados y discusión

En este apartado se presenta una discusión detallada de los resultados de la propuesta de aplicación de las tres herramientas desarrolladas previamente. En términos de la gestión energética, se espera obtener una comprensión completa de cómo y en qué etapas estas herramientas tienen un potencial impacto.

7.1. Energy Value Stream Mapping

En primer lugar, como se ha podido observar al desarrollar la herramienta Energy Value Stream Mapping (EVSM) para la cadena de fabricación de las barras de acero corrugado, se trata de una herramienta que permite analizar y visualizar el flujo de energía en la organización para la que ha sido propuesta, abordando así el propósito de la revisión energética que se plantea en la norma ISO 50001. En concreto, la aplicación de esta herramienta incluyendo valores reales de consumo en una planta de laminación, permitirá obtener una visión panorámica del uso de la energía por los equipos fundamentales de la planta.

Asimismo, una vez que se ha mapeado el flujo de energía, esta herramienta tiene el potencial de permitir identificar las áreas que ofrecen las mayores oportunidades de mejora. Este aspecto

ayudará a priorizar las inversiones y las acciones de mejora, asegurando que los recursos se dirijan a las áreas que proporcionarán el mayor retorno por la relevancia que tienen en el desempeño energético.

Por tanto, la EVSM se presenta como herramienta sólida para la toma de decisiones en la gestión de la energía ya que al visualizar claramente dónde y cómo se utiliza la energía, es posible tomar decisiones más informadas sobre dónde invertir en eficiencia energética y cómo mejorar los procesos.

7.2. Mantenimiento Productivo Total (TPM)

A través de la propuesta de implantación desarrollada se proyecta establecer un sistema de mantenimiento que sea tanto eficiente como continuo. Este sistema de mantenimiento, apoyado por los principios del Mantenimiento Productivo Total (TPM), será esencial para garantizar el óptimo funcionamiento de los equipos y la infraestructura dentro de la línea de producción, evitando así un significativo desvío del desempeño energético previsto de los equipos.

Asimismo, un correcto mantenimiento asegura un rendimiento óptimo de las máquinas, lo que conlleva a una reducción de material defectuosos o fallos que conlleven la pérdida de material producido debido a fallos en las máquinas de laminación como se muestra en la siguiente

Figura 20. Ejemplo fallo en el sistema de control del tren de laminación



Fuente: (Grupo Russula, s. f.)

En el caso de una planta de laminación en caliente, la necesidad de reprocesar las barras de acero defectuosas no solo incidirá negativamente en la economía de la empresa, sino que también supone un ciclo de reprocesamiento del acero, llevándolo de nuevo al principio de la cadena de suministro. Como se ha visto, la producción de acero en palanquillas involucra procesos altamente intensivos en energía que conllevan impactos ambientales adversos. En concreto, el proceso de

fabricación de las palanquillas por horno de arco eléctrico emite 0,6 toneladas de CO₂ por tonelada cuando se fabrica en base a la chatarra (De Ras et al., 2019).

Tras volver a obtener la palanquilla de acero, habría que iniciar el proceso de fabricación de las barras de acero corrugado, cuya implicación de emisiones al medioambiente es la siguiente.

Tabla 2. Inputs y outputs de la fabricación de 1t de barra de acero corrugado

Outputs (emissions to air)		
CO ₂	g/t	3,708
CO	g/t	37.8
SO ₂	g/t	3.9
NO	g/t	179.7
NO ₂	g/t	267.1
Dust	g/t	0.5

Fuente: (Özdemir et al., 2018)

7.3. Eventos Kaizen

La correcta implementación de la propuesta de aplicación de eventos Kaizen orientados a la mejora de la eficiencia energética de la organización contribuye a cumplir con los requisitos de la norma ISO 50001, que incluye la demostración de mejoras continuas en la gestión de la energía, la realización de revisiones del desempeño y la configuración de objetivos y planes de acción para mejorar continuamente.

En concreto, la presente propuesta incluye actividades previas y posteriores al evento Kaizen que se permiten un correcto desarrollo e implantación de medidas establecidas durante el evento, como las actividades de seguimiento y evaluación.

En definitiva, la implementación de esta herramienta en una planta de fabricación de barras de acero corrugado permitiría a la organización implantar una cultura de mejora continua en el contexto energético.

7.4. Valoración económica

En este apartado, se realizará una evaluación de las implicaciones económicas de la implementación de las herramientas Energy Value Stream Mapping, Mantenimiento Productivo Total (TPM) y eventos Kaizen para la mejora de la gestión energética. Cabe señalar que las estimaciones del Coste/Hora del personal se han establecido a través de una búsqueda de salarios en el mercado que corresponden a profesionales con habilidades y formación similares.

Herramienta Energy Value Stream Mapping

Como se ha visto, el desarrollo de esta herramienta principalmente conlleva el análisis de los procesos, la medida de los consumos y la propia creación visual del elemento gráfico. En concreto, se ha establecido la necesidad de las capacidades del personal que se recoge en la Tabla 3 para la realización de la actividad que se especifica.

El desarrollo de esta herramienta conlleva un coste de 1.300€ por las horas de implicación del personal.

Tabla 3. Desglose costes de personal para el desarrollo EVSM

Personal	Descripción de actividad	Horas de proyecto	Coste/Hora (€/Hora)	Coste (€)
Ingeniero de procesos	Evaluación del proceso productivo de la planta.	40	26	1040
	Creación del elemento gráfico del EVSM.			
	Análisis de Usos Significativos de la energía			
	Presentación ante la dirección			
Técnico de mantenimiento horno de recalentamiento	Medición de valores de consumo de gas	10	13	130
	Reporte al ingeniero de procesos			
Técnico de mantenimiento eléctrico	Medición de valores de consumo eléctrico	10	13	130
	Reporte al ingeniero de procesos			
Total				1300

Herramienta Mantenimiento Productivo Total

Una correcta implantación de la propuesta de Mantenimiento Productivo total conlleva la realización de todas actividades establecidas en el diagrama Gantt (Figura 16). Por tanto, para la estimación de los costes, en primer lugar, es importante conocer el personal implicado en cada actividad y las horas estimadas para las mismas. Esta evaluación se muestra en la siguiente Tabla 4.

Cabe señalar que las horas estimadas se han calculado en referencia al primer año de implantación como se recoge en el diagrama Gantt propuesto; no obstante, las actividades de las Fases 3 y 4 deben continuar realizándose para asegurar el propósito de la implantación de la herramienta.

Asimismo, se destaca que las horas estimadas de formación se tendrán en cuenta en los costes indirectos derivados de la mano de obra no empleada durante el tiempo de formación. No obstante, es importante recalcar que es una actividad fundamental para el éxito de la implantación de la herramienta.

Tabla 4. Personal implicado y horas estimadas en la implantación de TPM

Nº de actividad	Actividad	Personal implicado	Horas estimadas
1.1	Presentación del proyecto TPM	Jefe de planta	0,5
1.2	Formación general TPM	Operarios	Coste indirecto
1.3	Creación grupos de trabajo TPM	Jefe de planta + Coach TPM	4
1.4	Determinación de metas y objetivos claros para la implementación.	Jefe de planta Grupo de trabajo TPM + Coach TPM	6
1.5	Diseño Plan Maestro de implementación TPM	Grupo de trabajo TPM	40
2.1	Evaluación de planes	Jefe de planta	10
2.2	Ajuste de planes	Grupo de trabajo TPM	20
2.3	Reunión de presentación de planes a desarrollar	Jefe de planta + Grupo de trabajo TPM	2
3.1	Formación específica de operarios		
3.1.1	Formación térmica	Supervisor de mantenimiento de equipos térmicos + Operarios	Coste indirecto
3.1.2	Formación eléctrica	Supervisor de mantenimiento eléctrico + Operarios	Coste indirecto
3.1.3	Formación mecánica	Supervisor de mantenimiento de maquinaria + Operarios	Coste indirecto
3.5	Labores administrativas de apoyo al TPM	Administrativo	180
3.6	Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad	Grupo de trabajo TPM + Supervisor de seguridad industrial	90
3.7	Evaluación de cumplimiento de normas ambientales	Grupo de trabajo TPM	90
4.1	Reuniones de seguimiento	Grupo de trabajo TPM	9
4.2	Evaluación de objetivos trazados	Grupo de trabajo TPM + Jefe de planta	9

Por tanto, la imputación de horas implicadas en el proyecto de los siguientes trabajadores y el coste que conllevan queda configurado como se muestra a continuación en la Tabla 5, resultando en un total de 34.683€.

Tabla 5. Desglose costos de personal para el desarrollo de TPM

Personal	Actividades	Horas de proyecto	Coste Hora (€/hora)	Coste total (€)
Jefe de planta	1.3 Creación del grupo de trabajo TPM 1.4 Determinación de metas y objetivos 2.1 Evaluación de planes 2.3 Reunión de presentación de planes a desarrollar 4.2 Evaluación de objetivos trazados	51	27	1377
Jefe de producción	1.5 Diseño de Plan Maestro de implementación TPM 2.3 Reunión de presentación de planes a desarrollar 3.6 Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad 3.7 Evaluación de cumplimiento de normas ambientales	266	22	5852
Jefe de mantenimiento	1.5 Diseño de Plan Maestro de implementación TPM 2.3 Reunión de presentación de planes a desarrollar 3.6 Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad 3.7 Evaluación de cumplimiento de normas ambientales	266	22	5852
Jefe de calidad y medioambiente	1.5 Diseño de Plan Maestro de implementación TPM 2.3 Reunión de presentación de planes a desarrollar 3.6 Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad 3.7 Evaluación de cumplimiento de normas ambientales	266	22	5852
Supervisor de mantenimiento de equipos térmicos	1.5 Diseño de Plan Maestro de implementación TPM 2.3 Reunión de presentación de planes a desarrollar 3.6 Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad 3.7 Evaluación de cumplimiento de normas ambientales	266	15	3990
Supervisor de mantenimiento eléctrico	1.5 Diseño de Plan Maestro de implementación TPM 2.3 Reunión de presentación de planes a desarrollar 3.6 Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad 3.7 Evaluación de cumplimiento de normas ambientales	266	15	3990
Supervisor de mantenimiento mecánico	1.5 Diseño de Plan Maestro de implementación TPM 2.3 Reunión de presentación de planes a desarrollar 3.6 Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad 3.7 Evaluación de cumplimiento de normas ambientales	266	15	3990
Administrativo	3.5 Labores administrativas de apoyo al TPM	180	12	2160
Supervisor de seguridad industrial	3.6 Evaluación de cumplimiento de normas de seguridad	90	18	1620
Total		1917	168	34683

Asimismo, como se ha podido visualizar en la Tabla 4, entre el personal implicado, también se encuentra la intervención de un “coach TPM”, es la persona encargada de la orientación en los primeros pasos de la implantación de la herramienta, así como en la evaluación de los objetivos. Los costos asociados a esta labor de consultoría se muestran a continuación en la Tabla 6 y ascienden a un monto de 840€.

Tabla 6. Desglose costos de colaboraciones externas para el desarrollo de TPM

Personal	Actividades	Horas de proyecto	Coste Hora (€/hora)	Coste total (€)
Consultor TPM	1.2 Formación TPM 1.3 Creación del grupo de trabajo TPM 1.4 Determinación de metas y objetivos 4.2 Evaluación de objetivos	28	30	840

A continuación, en la Tabla 7 se detalla los costes de inversión en la formación TPM y en la formación específica. Como se puede observar los costes indirectos se han calculado a partir de un modelo de planta conformada con 45 trabajadores. Este coste indirecto de mano de obra no empleada asciende a 12.046 €.

Tabla 7. Desglose costos indirecto de formación para el desarrollo de TPM

Actividad	Personal	Número de trabajadores	Horas de proyecto	Coste hora (€/hora)	Costo total (€)
Formación TPM	Operarios turno A	15	3	10,4	468
	Operarios turno B	15	3	10,4	468
	Operarios turno C	15	3	10,4	468
	Supervisor de mantenimiento de equipos térmicos	1	3	15	45
	Supervisor de mantenimiento eléctrico	1	3	15	45
	Supervisor de mantenimiento mecánico	1	3	15	45
Formación térmica	Operarios turno A	15	7	10,4	1092
	Operarios turno B	15	7	10,4	1092
	Operarios turno C	15	7	10,4	1092
	Supervisor de mantenimiento de equipos térmicos	1	7	15	105
Formación eléctrica	Operarios turno A	15	7	10,4	1092
	Operarios turno B	15	7	10,4	1092
	Operarios turno C	20	7	10,4	1456
	Supervisor de mantenimiento de equipos térmicos	1	7	15	105
Formación mecánica	Operarios turno A	15	7	10,4	1092
	Operarios turno B	15	7	10,4	1092
	Operarios turno C	15	7	10,4	1092
	Supervisor de mantenimiento de equipos térmicos	1	7	15	105
Total					12046

Herramienta Eventos kaizen

La implantación de un evento Kaizen ha sido calculado en función de las horas dedicadas por el equipo Kaizen y el jefe de planta. Al igual que en la herramienta anterior, para el calculo de horas dedicadas al evento se ha tenido en cuenta la estimación de horas para cada actividad como se muestra en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8. Estimación de horas por actividad para el evento Kaizen

Evento Kaizen		Personal	Horas estimadas
Preparación de Kaizen	Creación del equipo	Jefe de planta	2
	Identificación de oportunidades	Equipo Kaizen	8
	Definición de objetivos	Equipo Kaizen	5
	Recolección de datos	Equipo Kaizen	10
	Reunión de verificación	Equipo Kaizen + Jefe de planta	1
Desarrollo del evento Kaizen		Equipo Kaizen	40
Seguimiento de Kaizen	Presentación de conclusiones	Equipo Kaizen + Jefe de planta	1
	Revisión de mejoras propuestas	Equipo Kaizen	2
	Seguimiento y evaluación	Equipo Kaizen	1

A continuación, se muestra la imputación total de horas a cada miembro del personal y su respectivo coste/hora.

Tabla 9. Desglose costo personal herramienta Kaizen

Personal	Formación	Horas proyecto	Coste hora (€/hora)	Coste total (€)
efe de planta	Ingeniero industrial	4	27	108
Equipo Kaizen	Supervisor de producción	68	22	1496
	Jefe de mantenimiento	68	22	1496
	Tecnico de operaciones de energía	68	20	1360
	Ingeniero eléctrico	68	22	1496
	Ingeniero ambiental	68	22	1496
	Ingeniero mecánico	68	22	1496
Total				8948

Como se puede observar en la Tabla 9, la realización de cada evento Kaizen asciende a un monto de 8.948 €.

8. Conclusiones

La realización de este Trabajo de Fin de Grado ha supuesto un enriquecedor conocimiento de la metodología Lean, la gestión energética y la intersección entre ambos conceptos. Asimismo, fruto de ello se ha llevado a cabo una propuesta de aplicación de las herramientas Lean con mayor aplicabilidad a la gestión energética en la cadena de suministro del acero corrugado, con una visión hacia la sostenibilidad y eficiencia energética.

El análisis de las herramientas Lean para la gestión energética ha servido para identificar el potencial de algunas para abordar las fases de planificación, operación y mejora. En concreto, se ha demostrado que la herramienta Energy Value Stream Mapping permite abordar el requisito de revisión energética ya que permite una correcta visualización de los consumos y usos significativos de energía en los procesos. Asimismo, analizando los requisitos que se proponen en la norma ISO 50001 en relación con las secciones de operación, la herramienta de Mantenimiento Productivo Total (TPM) emerge como un mecanismo eficaz para evitar un desvío significativo del desempeño energético previsto.

Además, la metodología Kaizen, con su enfoque en la mejora continua, demuestra una significativa compatibilidad con la sección de mejora de la norma ISO 50001. Esta herramienta promueve la implicación activa de los trabajadores en la identificación de ineficiencias y en la generación de propuestas de mejora, lo que conduce a un entorno laboral dinámico y centrado en la búsqueda de la eficiencia energética de manera constante.

Tras ello, se ha llevado a cabo la propuesta de introducción de estas herramientas en el proceso de fabricación de las barras de acero corrugado, el cual proporciona un esquema útil y aplicable para la incorporación de dichas herramientas dentro de un sistema de gestión energética en este sector de alta demanda energética.

En dicha propuesta se ha evidenciado las oportunidades que puede ofrecer la implementación de las herramientas seleccionadas en el proceso productivo objeto de estudio. En particular, se ha destacado el potencial de la herramienta Energy Value Stream Mapping para recopilar información esencial de los procesos involucrados en la laminación en caliente, por lo que se confirma su gran relevancia para la revisión energética. Asimismo, se ha visto que la implementación de la herramienta TPM implica un extenso despliegue de actividades ejecutadas por el personal de diferentes áreas de una planta de laminación en caliente modelo. Esto se debe a que la incorporación de dicha herramienta implica cambiar el enfoque del mantenimiento,

transitando de un mantenimiento antes principalmente correctivo a uno planificado y autónomo. Por otro lado, en el contexto de este estudio, la propuesta de implementación de eventos Kaizen proporciona un camino sólido y efectivo hacia la mejora continua, objetivo para el que fue propuesto.

Así, se demuestra que las herramientas Lean son un activo valioso para las empresas, no solo para mejorar sus procesos internos, sino también para alinear sus operaciones con las metas de sostenibilidad y gestión energética, elementos esenciales en el contexto actual.

9. Bibliografía

- Ahuja, I. P. S., & Khamba, J. S. (2008). Total productive maintenance: Literature review and directions. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 25(7), 709-756. <https://doi.org/10.1108/02656710810890890/FULL/XML>
- Aries, E., Gómez Benavides, J., Mavromattis, S., Klein, G., Chronopoulos, G., & Roudier, S. (2022). *Best available techniques (BAT) reference document for the ferrous metals processing industry* (Número KJ-NA-31-321-EN-N (online)). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/196475> (online)
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- Castrillón Mendoza, R. del P. (2021). *Herramientas de gestión energética para el desarrollo sostenible en edificios aplicado a un campus universitario en Colombia*. [Universidad de Valladolid]. <https://doi.org/10.35376/10324/51980>
- Castrillón Mendoza, R. del P., & González Hinestroza, A. J. (2018). *Metodología para la planificación energética a partir de la norma ISO 50001*.
- De Ras, K., Van de Vijver, R., Galvita, V. V., Marin, G. B., & Van Geem, K. M. (2019). Carbon capture and utilization in the steel industry: challenges and opportunities for chemical engineering. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 26, 81-87. <https://doi.org/10.1016/J.COCHE.2019.09.001>
- Environmental Protection Agency. (2007). *Lean & Energy Toolkit: Chapter 5*. <https://www.epa.gov/sustainability/lean-energy-toolkit-chapter-5>
- Farris, J. A., Van Aken, E. M., Doolen, T. L., & Worley, J. (2008). Learning From Less Successful Kaizen Events: A Case Study. *Engineering Management Journal*, 20(3), 10-20. <https://doi.org/10.1080/10429247.2008.11431772>
- Gonzalo Sancha, J. L. (2010). *Conceptos de ahorro y eficiencia energética: evolución y oportunidades*.
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna*.
- Grupo Russula. (s. f.). *Controles en trenes de laminación*.
- Hernández Matías, J. C., & Vizán Idoipe, A. (2013). *Lean Manufacturing: Conceptos, técnicas e implantación*.
- Hirano, H. (1995). *5 Pillars of the Visual Workplace, The Sourcebook for 5S Implementation*. [5 Pilares de la Fabrica Visual: La fuente para la implantación de las 5S]. Taylor & Francis.

- IDAE. (s. f.). *Industria / Sector Industrial y el consumo de Energía*.
<https://www.idae.es/tecnologias/eficiencia-energetica/industria>
- IEA. (2022a). *CO2 Emissions in 2022*. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- IEA. (2022b). *World Energy Outlook 2022*. www.iea.org/
- IFM. (2016). *Automation Technology for the Steel Industry*.
<https://www.ifm.com/binaries/content/assets/pdf-files/en/catalogues/ifm-automation-technology-steel-industry-gb-2015-2016.pdf>
- INE. (2021). *Encuesta de Consumos Energéticos 2019*. https://www.ine.es/prensa/ece_2019.pdf
- Ingener Furnaces. (s. f.). *Horno Walking Beam*. <https://www.ingenerfurnaces.com/es/>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers*. www.ipcc.ch
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*.
- Liker, J. K. (2004). *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer [Las claves del éxito de Toyota: 14 Principios de Gestión del Fabricante Más Grande del Mundo]*. McGraw-Hill Education.
- METECH Group. (s. f.). *Mesa de enfriamiento*. Recuperado 1 de julio de 2023, de http://www.stggroup.it/es/plantas/minimills/mesa_enfriamiento/
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Balance Energético de España es 2021*. https://energia.gob.es/balances/Balances/balandeenergeticoanual/Balance-Energetico-Espana-2021_v0.pdf
- NCO. (s. f.). *Rebar and Wire-Rod Hot Rolling Mills Solutions Portfolio*. Recuperado 1 de julio de 2023, de <http://www.nco.it/re-bar-wire-rod-rolling-mills.html>
- Özdemir, A., Günkaya, Z., Özkan, A., Ersen, O., Bilgiç, M., & Banar, M. (2018). Lifecycle Assessment of Steel Rebar Production with Induction Melting Furnace: Case Study in Turkey. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 22(2).
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000385](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000385)
- Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2022). *Energy. Our World in Data*.
<https://ourworldindata.org/energy>
- Rother, M., & Shook, J. (2003). *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda [Aprender a ver: Mapeo del flujo de valor para añadir valor y eliminar muda]* (Lean Enterprise Institute, Ed.). Taylor & Francis.
- Szota, P., Mróz, S., Stefanik, A., & Dyja, H. (2011). *Numerical Modelling of the Working Rolls Wear During Rods Rolling Process [Modelado Numérico del Desgaste de los Rodillos de Trabajo durante el Proceso de Laminado de Barras]*. <https://doi.org/10.2478/v10172-011-0053-5>

UNE-EN ISO 50001:2018 Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso (ISO 50001:2018).

Van Aken, E. M., Farris, J. A., Glover, W. J., & Letens, G. (2010). A framework for designing, managing, and improving Kaizen event programs [Un marco para diseñar, gestionar y mejorar los programas de eventos Kaizen]. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 59(7), 1741-0401. <https://doi.org/10.1108/17410401011075648>

Verma, N., & Sharma, V. (2016). Energy Value Stream Mapping a Tool to Develop Green Manufacturing. *Procedia Engineering*, 149, 526-534. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2016.06.701>

Womack, J. P., & Jones, D. T. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation [Pensamiento Lean: Elimine el Despilfarro y Cree Riqueza en su Empresa]*. Simon & Schuster.