

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**ESCUELA DE POSGRADO**



**Propuesta de mejora en el área del tren de laminación de acero mediante la reducción del tiempo de cambio de formato a través del uso de herramientas de optimización matemática y herramientas de manufactura esbelta**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAGÍSTER EN  
INGENIERÍA INDUSTRIAL CON MENCIÓN EN GESTIÓN DE  
OPERACIONES**

**AUTOR**

René Javier Pacheco Salas

**ASESOR:**

Jonatán Edward Rojas Polo

Junio de 2019

## RESUMEN

El sector siderúrgico dedicado a la construcción es cada vez más competitivo. La competencia mundial y la reducción de barreras arancelarias entre países de distintos continentes han originado que las empresas de este rubro busquen mejorar la eficiencia de sus procesos para mantener costos bajos y ofrecer precios competitivos. Por este motivo muchas fábricas a nivel mundial están optimizando sus procesos para conseguir reducir sus costos.

Un campo muy importante dentro del sector siderúrgico es el de la fabricación de aceros laminados en caliente. El proceso de laminación de Acero consiste en la reducción de medidas de una barra (palanquilla) caliente haciéndola pasar través de una serie de casetas o stands hasta conseguir la forma y las medidas requeridas del producto final. Cada caseta está conformada por dos rodillos motorizados que tienen canales tallados con un perfil necesario para cada producto. Dependiendo del proceso y de la ubicación de la caseta, los canales tallados en los cilindros pueden ser exclusivos para un producto o pueden servir para varios productos.

El tren de laminación donde se enfoca esta tesis tiene una cartera de 300 productos aproximadamente, de los cuales puede laminar hasta 40 productos distintos en un mismo mes, por lo que es imprescindible realizar los cambios de formato empleando el menor tiempo posible, con el fin de mejorar la utilización de la planta y obtener costos competitivos de producción. Para reducir el tiempo de cambios de formato se debe considerar dos aspectos: Primero la secuenciación de los productos, pues hay productos más compatibles entre sí, ya sea por utilizar los mismos diseños de canal en ciertas casetas, o por utilizar los mismos accesorios. En segundo lugar, se debe optimizar los recursos y las tareas durante la ejecución del cambio de formato para reducir el tiempo.

La presente tesis se enfoca en desarrollar estrategias para reducir los tiempos de cambio de formato en un tren de laminación, para lo cual se desarrollan dos metodologías: Primero se propone el uso de modelos de optimización mediante un algoritmo de ruteo llamado TSP (Traveling Salesman Problem), el cual utilizaremos para optimizar la secuencia de productos del programa mensual, de tal manera que la secuencia sea la que demande el menor cambio de accesorios (utillaje y casetas) en el mes. La segunda estrategia es proponer el uso de la metodología SMED para reducir los tiempos de ejecución de cada cambio.



## **DEDICATORIA**

A mi esposa Rita y a mi hijo Ignacio Javier.

## **Agradecimientos**

A mis padres Fredy y Rocío, y a mis hermanas Katia y Andrea.

A mi asesor, Mg. Jonatán Rojas, quien me acompañó durante todo el desarrollo de esta tesis, y a mi amigo, el Ing. Arturo Díaz, quien me enseñó los conceptos de laminación desarrollados en este trabajo.



# INDICE GENERAL

|   |                                      |
|---|--------------------------------------|
| 1. RESUMEN .....  | ii                                   |
| Agradecimientos .....   | iv                                   |
| 2. INDICE GENERAL.....  | v                                    |
| 3. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....   | vii                                  |
| 4. ÍNDICE DE TABLAS .....   | ix                                   |
| 5. INTRODUCCIÓN .....   | x                                    |
| 1. CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO.....   | 1                                    |
| 1.1. LEAN .....   | 1                                    |
| 1.1.1. Desperdicios (Muda) .....  | 2                                    |
| 1.1.2. Value Stream Mapping (VSM) .....   | 2                                    |
| 1.2. SMED .....   | 3                                    |
| 1.2.1. Metodología de Implementación de SMED .....  | 6                                    |
| 1.2.2. SMED en trenes de Laminación.....  | <b>¡Error! Marcador no definido.</b> |
| 1.3. Programación Lineal.....   | 11                                   |
| 1.4. Secuenciación de producción.....   | 13                                   |
| 1.4.1. Tiempo de cambio en función de la secuencia ( <i>Sequence Dependent Setup Times</i> )  | 15                                   |
| 1.4.2. Algoritmo TSP.....   | 18                                   |
| 1.4.3. Presentación lineal del TSP .....  | 20                                   |
| 1.4.4. Presentación lineal entera del TSP .....   | 21                                   |
| 1.4.5. Restricción Miller, Tucker y Zemlin para el TSP .....  | 22                                   |
| 1.5. Proceso de Laminación en caliente.....   | 22                                   |
| 2. CAPÍTULO 2. CASOS DE APLICACIONES DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA SECUENCIACIÓN DE PRODUCCIÓN EN PLANTAS DE LAMINACIÓN.....               | 29                                   |
| 2.1. Uso de algoritmos para secuenciar la producción con el objetivo de reducir los tiempos de cambio.....                                    | 30                                   |
| 2.2. Aplicación de TSP múltiple para un Tren de laminación en Caliente en Shanghai Baoshan Iron & Steel. (Liu, Tang, Rong, & Yang, 2000)..... | 31                                   |
| 2.3. Aplicación de SDST en línea de producción (Schaller, Guptab, & Vakharia, 1999).....  | 34                                   |
| 2.4. Planificación integrada de Coladas continuas y Trenes de laminación en caliente (Imke, 2013) .....                                       | 35                                   |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 2.5.   | Planificación de Producción en Manufactura de Acero (Tren de laminación y Acabado) (Li, 2014)..... | 36 |
| 3.     | CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL CASO .....   | 42 |
| 3.1.   | Descripción de la empresa .....  | 42 |
| 3.2.   | Productos de la empresa.....   | 42 |
| 3.3.   | Descripción del Proceso Productivo.....  | 42 |
| 3.3.1. | Horno de recalentamiento:.....   | 43 |
| 3.3.2. | Tren Laminador .....   | 44 |
| 3.3.3. | Acabados .....   | 45 |
| 4.     | CAPÍTULO 4. DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA.....   | 47 |
| 4.1.   | Diagnóstico a nivel macro .....  | 47 |
| 4.2.   | Diagnóstico a nivel micro .....  | 48 |
| 4.3.   | Diagnóstico a nivel Empresa .....  | 50 |
| 5.     | CAPÍTULO 5. DESARROLLO DE PROPUESTAS DE MEJORA.....  | 54 |
| 5.1.   | Aplicación de modelos de optimización.....   | 54 |
| 5.1.1. | Objetivo propuesto .....   | 54 |
| 5.1.2. | Modelo Matemático.....   | 56 |
| 5.1.3. | Modelo de Programación en AMPL .....   | 56 |
| 5.1.4. | Parámetros del modelo .....  | 57 |
| 5.1.5. | Ejecución del modelo .....   | 60 |
| 5.2.   | Metodología SMED .....   | 62 |
| 5.2.1. | Cambio de medida .....   | 62 |
| 5.2.2. | Aplicación de la metodología .....   | 65 |
| 6.     | CAPÍTULO 6. IMPACTO ECONÓMICO .....  | 68 |
| 6.1.   | Proyección de impacto por secuencia óptima. ....   | 68 |
| 6.2.   | Proyección de impacto por SMED.....  | 69 |
| 6.3.   | Reducción de tamaños de lotes .....  | 69 |
| 7.     | CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....  | 71 |
| 7.1.   | Conclusiones.....  | 71 |
| 7.2.   | Recomendaciones .....  | 72 |
| 8.     | Bibliografía .....   | 73 |

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| <i>Ilustración 1: Ejemplo de Diagrama VSM. Elaboración Propia</i> .....  | 3  |
| <i>Ilustración 2: Gráfica representativa del Lote Económico. Fuente: (Shingo, 1983) y (Rodrigues, 2014)</i> .....  | 5  |
| <i>Ilustración 3: Modificación de la gráfica de EOQ presentando un nuevo EOQ con SMED. Elaboración propia</i> .....  | 6  |
| <i>Ilustración 4: Etapas conceptuales de la mejora en los cambios Fuente: (Shingo, 1983)</i> .....   | 8  |
| <i>Ilustración 5: Gráfica representativa de los resultados de aplicad SMED en la planta de Laminación en Warzawa. Elaboración propia</i> .....   | 9  |
| <i>Ilustración 6: QROBOT vendido por la empresa Danieli para automatizar el cambio de anillos y accesorios de laminación en los bloques de alta velocidad. Fuente: (DANIELI, 2019)</i> .....         | 10 |
| <i>Ilustración 7: Brazo de asistencia vendido por la empresa Danieli para reducir los tiempos de cambio de anillos de laminación en los bloques de alta velocidad. Fuente: (DANIELI, 2019)</i> ..... | 10 |
| <i>Ilustración 8: Ejemplo gráfico de un modelo de programación lineal. Fuente: (Krajewski, Ritzman, &amp; Malhotra, 2013)</i> .....  | 13 |
| <i>Ilustración 9: Pantalla de la interfaz de planificación del ERP SAP Fuente: (Pinedo, 2016)</i> .....  | 14 |
| <i>Ilustración 10: Captura de Pantalla del software ORTEMS. Fuente: (Pinedo, 2016)</i> .....   | 15 |
| <i>Ilustración 11: Gráficos lineales de ejemplo de dos secuencias de los mismos productos en un horno eléctrico. Elaboración Propia</i> .....  | 16 |
| <i>Ilustración 12: Gráfico que representa el costo de cambiar de una producción a otra. Fuente: (Pinedo, 2016)</i> .....   | 18 |
| <i>Ilustración 13: Ejemplo del mapa de una ciudad con nodos para resolver el problema TSP. Fuente: (Wilfahrt &amp; Sangho, 2017)</i> .....   | 18 |
| <i>Ilustración 14: Ruta Hamiltoniana. Fuente: (Sommer, 2007)</i> .....   | 19 |
| <i>Ilustración 15: Ejemplo de permutaciones en una secuencia de producción con Sub-tours. Fuente: (Pinedo, 2016)</i> .....   | 22 |
| <i>Ilustración 16 : Esquema de rodillos de laminación dibujados por Leonardo Da Vinci en 1495. Fuente: (C.A.A.S.A., 2007)</i> .....  | 23 |
| <i>Ilustración 17 Diagrama de los esfuerzos en un proceso de laminación. Fuente: (Roberts, 1983)</i> .....   | 23 |
| <i>Ilustración 18: Fuerzas de reducción en la laminación de planos y laminación de barras redondas. Fuente: (Lee, 2004)</i> .....  | 25 |
| <i>Ilustración 19: Dibujo sólido de una secuencia de laminación horizontal-vertical. Fuente: (Lee, 2004)</i> ....  | 25 |
| <i>Ilustración 20: Esquema de pasadas de laminación para distintos productos Fuente: (Roberts, 1983)</i> ....  | 26 |
| <i>Ilustración 21: Tren de laminación de barras con slit4 en Planta de Warzawa Fuente: (DANIELI, 2019)</i> ..  | 27 |
| <i>Ilustración 22: Esquema de secuenciación de un turno de producción en BAOSHAN Cada rectángulo representa una orden de producción. Fuente: (Liu, Tang, Rong, &amp; Yang, 2000)</i> .....           | 32 |
| <i>Ilustración 23: Flujo de proceso de rollos y planchas Fuente: (Li, 2014)</i> .....  | 37 |
| <i>Ilustración 24: Colada continua de 4 líneas en Azerbaiyán donde se visualiza la fabricación de palanquillas “billets” Fuente: (BAKU Steel Company, s.f.)</i> .....                                | 37 |
| <i>Ilustración 25: Diagrama de Flujo del proceso. Elaboración Propia</i> .....   | 43 |
| <i>Ilustración 26. Horno de recalentamiento diseñado por Danieli en un tren de laminación. Fuente: (DANIELI, 2019)</i> .....   | 44 |
| <i>Ilustración 27: Imagen de una caseta con reductor, cardanes y motor. Fuente (TIG Ltd. Sti, s.f.)</i> .....  | 44 |
| <i>Ilustración 28: Tren de laminación Continuo de la planta de Pisco de la Corporación Aceros Arequipa. Fuente: (C.A.A.S.A., 2016)</i> .....   | 45 |
| <i>Ilustración 29: Cizalla de corte de un tren de laminación fabricada por la marca italiana NCO Fuente (NCO SRL., s.f.)</i> .....   | 45 |
| <i>Ilustración 30: Atadora automática de paquetes de barras, hecha por el fabricante Sund-Birsta. Fuente (Sund Birsta AB, s.f.)</i> .....  | 46 |

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Ilustración 31: Comparación de la producción de acero crudo en Latinoamérica entre el 2013 y el 2017. Fuente: Memoria de empresas de Alacero (MINCETUR, 2018).....</i>            | <i>48</i> |
| <i>Ilustración 32: Producción de Acero por las empresas nacionales. Fuente: Sunat y (MINCETUR, 2018) ...</i>   | <i>49</i> |
| <i>Ilustración 33: Diagrama SIPOC del proceso. Elaboración Propia .....</i>  | <i>50</i> |
| <i>Ilustración 34: Layout del tren de laminación. Fuente: La empresa.....</i>  | <i>51</i> |
| <i>Ilustración 35: Diagrama VSM de un tren de laminación. Elaboración Propia.....</i>  | <i>52</i> |
| <i>Ilustración 36: “Diagrama 5 por qué” de las oportunidades de mejora. Elaboración Propia.....</i>  | <i>53</i> |
| <i>Ilustración 37: Consola del programa AMPL durante la ejecución del modelo. Elaboración Propia .....</i>   | <i>60</i> |
| <i>Ilustración 38: Consola del AMPL mostrando los valores de x como resultado del modelo de optimización. Elaboración Propia .....</i>   | <i>61</i> |
| <i>Ilustración 39: Valor de las variables u, que indica la posición de cada producto. Elaboración Propia .....</i>   | <i>62</i> |
| <i>Ilustración 40: Layout de cambio de cassetas durante el cambio de medida. Elaboración Propia.....</i>   | <i>64</i> |
| <i>Ilustración 41: Bloqueo con palanca y leva en reemplazo de sistemas de tuercas. Fuente: (Wixroyd International Ltd).....</i>  | <i>67</i> |
| <i>Ilustración 42: Resultado en software AMPL después de cambiar la función objetivo a “maximizar”, para obtener el tiempo máximo de cambios de medida. Elaboración propia. ....</i> | <i>68</i> |



# ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| <i>Tabla 1: Etapas de la mejora en los cambios de medida</i> .....   | 9  |
| <i>Tabla 2: Ejemplo de secuencias de producción en un horno eléctrico.</i> .....   | 17 |
| <i>Tabla 3: Listado de familias de productos fabricados por cada planta de laminación de la Compañía Norteamericana NUCOR.</i> ..... | 28 |
| <i>Tabla 4 : Comparativo conceptual de metodologías de la presente tesis</i> .....   | 30 |
| <i>Tabla 5 : Matriz de tiempos de cambio de medida en el tren de laminación.</i> .....   | 41 |
| <i>Tabla 6: Estructura de datos propuesta para organizar la información de los productos.</i> .....                                  | 41 |
| <i>Tabla 7: Matriz de tiempo en minutos por cambiar de un producto a otro.</i> .....   | 55 |
| <i>Tabla 8: Parámetros a ingresar en AMPL</i> .....  | 59 |
| <i>Tabla 9: Separación entre actividades internas y externas</i> .....   | 65 |
| <i>Tabla 10: Aplicación de la etapa 2 de SMED</i> .....  | 65 |
| <i>Tabla 11: Oportunidades de mejora para la etapa 3 del SMED</i> .....  | 66 |



# INTRODUCCIÓN

Los trenes de laminación en caliente son plantas diseñadas para elaborar muchos productos, y tienen componentes y accesorios intercambiables con el fin de abastecer múltiples necesidades del mercado con distintos productos. Como referencia, un solo tren de laminación puede tener capacidad para producir 500 o más productos diferentes. Es por este tema que las actividades de cambio de formato son inherentes a las plantas de laminación en caliente.

Esta necesidad de los trenes de laminación, de cambiar de formato constantemente, implica un costo considerable por el tiempo que debe detenerse las operaciones para cambiar de formato. La reducción del tiempo de cambio de medida tiene repercusión en varios aspectos: Desde el punto de vista contable de costos, el menor tiempo de utilización de la máquina implica menos tiempo disponible de producción y por ende menos unidades producidas, lo cual incrementa el valor del costo fijo asignable a cada unidad producida (Horngren, Datar, & Rajan, 2012). Desde el aspecto de indicadores de productividad, la mayor disponibilidad de planta se mide con el OEE (Overall Equipment Effectiveness), que es una herramienta de medición de performance que mide las pérdidas de producción (Muchiri & Pintelon, 2008).

El objetivo de la presente tesis es desarrollar métodos para reducir los tiempos de cambio de medida en un tren de laminación utilizando dos metodologías.

En primer lugar, se desarrolla un método de Investigación de Operaciones mediante un algoritmo de ruta más corta (Traveling salesman Problem) para determinar la mejor secuencia de producción con el fin de reducir la magnitud total de los cambios. Este algoritmo permitirá asociar los productos más afines entre sí, de tal manera que se reduce al mínimo posible los cambios de mayor magnitud.

En segundo lugar, se propone utilizar la herramienta SMED de la metodología LEAN, que propone reducir el tiempo de ejecución de los cambios de medida mediante la separación entre actividades internas (durante el cambio) y externas (fuera del tiempo de cambio), de tal manera que se reduzca el tiempo de cambio de formato.

# CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describe los principales conceptos y herramientas que sirven de pilares para esta investigación.

## 1.1. LEAN

Algunos autores, tales como Lonnie Wilson, definen la metodología Lean como un “conjunto de técnicas que, en forma combinada y madurada, permitirán reducir y eliminar los siete desperdicios, lo cual no solo hará la compañía más esbelta, pero subsecuentemente más flexible y más responsiva.” (Wilson, 2010). Sin embargo, otros autores indican que la reducción de los desperdicios es el medio, mas no el fin de la metodología y exponen la metodología Lean como una manera de maximizar el valor del producto a través de la minimización de los desperdicios (Sundar, Balaji, & SatheeshKumar, 2014).

La metodología Lean tuvo sus inicios con el TPS (Toyota Production System) ideado por Taiichi Ono (Jones & Womack, 2012). En este sistema se definió como valor a los atributos o características del producto que satisfacen las necesidades del cliente, y, por lo tanto, todas las actividades que se realizan para agregar características que beneficien la satisfacción del cliente agregan valor, mientras que las actividades que no afectan la satisfacción del cliente son catalogadas como desperdicios o mudas (Janes & Succi, 2014).

Siguiendo el concepto de desperdicio y valor, en el libro “Lean Thinking” se establece que las actividades que consumen recursos, pero no generan valor deben ser catalogadas como “mudas” (despilfarro en japonés) y la manera de identificarlas y reducirlas es a través de la metodología Lean, la cual permitirá dejar de gastar los recursos de las mudas y por ende tener un proceso más eficiente (Jones & Womack, 2012). El enfoque de que la metodología Lean hace los procesos más eficientes también se aprecia en la definición de Krafcik, quien fue quien otorgó el nombre a la metodología: La producción Lean utiliza menos recursos que la producción en masa, menos inventarios y por ende una cantidad menor de defectos, lo cual permite producir una mayor variedad de productos. (Bhasin, 2015).

### 1.1.1. Desperdicios (Muda)

Tal como se ha mencionado, los desperdicios o mudas son los trabajos realizados que no agregan valor al producto, y eliminarlos es el foco principal de la metodología lean (Bhasin, 2015).

Taiichi Ohno define la capacidad actual como el trabajo que agrega valor más el desperdicio, y propone aumentar la productividad reduciendo la carga de trabajo mediante la eliminación de los desperdicios (Rodrigues, 2014).

Cuando Taiichi Ohno implementó el TPS, clasificó inicialmente los desperdicios en siete categorías: **defectos** de producto, **sobreproducción**, **stock** de producto esperando procesamiento, **reproceso** innecesario, **movimientos** de personal innecesarios, **transporte** de producto innecesario y **esperas** en el proceso (Jones & Womack, 2012). Se debe considerar que, si bien el método TPS es muy aplicable en la industria, fue ideado para la industria de fabricación de autos, por lo que cada empresa que aplica Lean debe evitar forzar los desperdicios en las siete categorías de una forma estricta y deben hacer un análisis enfocando su realidad específica (Wilson, 2010).

Algunos autores como Hirano mencionan varias herramientas para identificar las pérdidas tales como el diagrama de flechas o el diagrama de Análisis de proceso y una vez que se ha identificado el desperdicio, aplicar una herramienta de causa raíz para definir su alcance (Hirano, 2009). Sin embargo, la propuesta de Hirano no permite relacionar la magnitud de los desperdicios en función del valor de cada proceso, por lo que otros autores como Jones & Womack y Wilson indican como un paso indispensable la definición de la cadena de valor del proceso y hacer un diagnóstico de esa cadena a través de un mapeo de cadena de valor “*Value stream Mapping*” (Wilson, 2010) y (Jones & Womack, 2012).

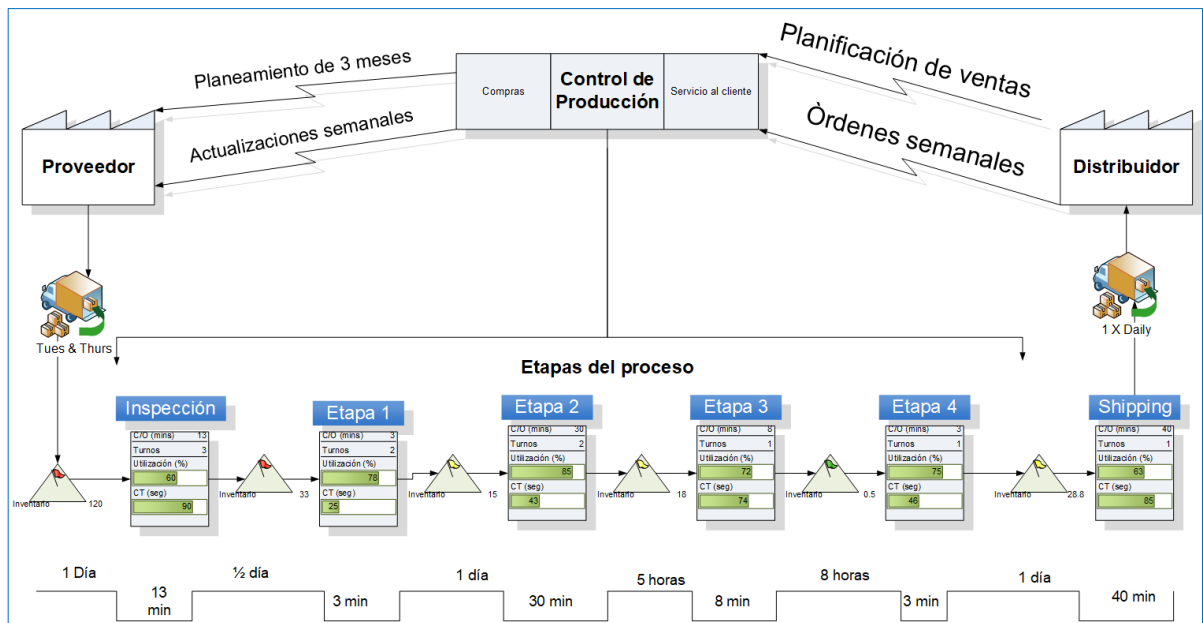
### 1.1.2. Value Stream Mapping (VSM)

El flujo de valor (Value Stream) está definido como el conjunto de todas las acciones específicas requeridas para realizar las tres tareas críticas de gestión presentes en todo tipo de negocio: Solución de problemas, gestión de la información y transformación física (Sundar, Balaji, & SatheeshKumar, 2014). El concepto de flujo de valor nos ayuda para realizar el mapeo del flujo del valor (Value Stream Mapping), el objetivo del mapeo de flujo de valor o VSM es definir cada etapa del flujo e identificar

los desperdicios específicos en cada una y sus oportunidades de mejora (Salinas Coronado, Aguilar Duque, Tlapa Mendoza, & Amaya Parra, 2014).

El principal beneficio de esta herramienta es que expone los desperdicios en el proceso, su tipo y su magnitud, y permite elaborar una ruta o diseño de mejoras para reducir los desperdicios en el futuro (Bhasin, 2015).

En la **Ilustración 1** se aprecia un ejemplo de un mapa de cadena de valor, en el que están indicados los procesos en la parte inferior, los flujos de materiales y en la parte superior los flujos de información.



*Ilustración 1: Ejemplo de Diagrama VSM. Elaboración Propia*

## 1.2. SMED

Los tiempos de cambio tienen una repercusión que en muchos casos no se contempla como una de las pérdidas dentro de los desperdicios Lean. Sin embargo, son una de las principales razones por las cuales se generan sobre producción y en consecuencia elevados inventarios (Wilson, 2010). Muchas veces los gerentes no consideran los costos de inventario, y obtienen reducción de costos mediante el incremento de los lotes de producción, lo cual genera costos ocultos en otros procesos y obedece a una noción obsoleta de planificación (Hirano, 2009).

El SMED es una metodología desarrollada por Shigeo Shingo como una iniciativa para mejorar los tiempos de cambio de las máquinas y forma parte de las herramientas

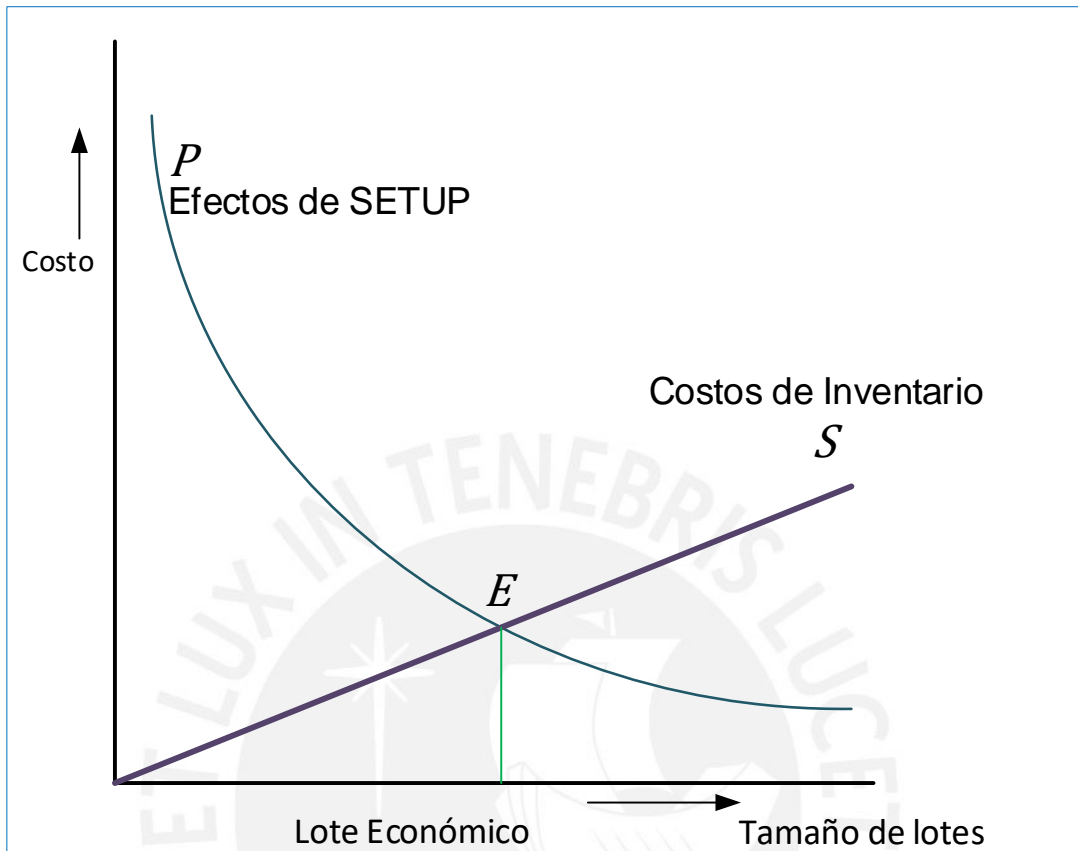
necesarias para implementar un proceso Lean (Wilson, 2010). Consiste en realizar una serie de pasos con el fin de reducir los tiempos de cambios de formato (setup) entre los productos. Y se presenta como una poderosa herramienta para vencer el paradigma generalizado en las industrias de la necesidad de lotes grandes de producción para poder controlar los costos atribuibles a los cambios de formato (Shingo, 1983). En consecuencia, esta herramienta servirá para viabilizar la reducción de lotes de producción, reducir inventarios y mejorar la respuesta al cliente (Bhasin, 2015).

El autor que diseñó el SMED es Shigeo Shingo, quien menciona en su libro "A Revolution in Manufacturing: The SMED System" que, durante sus visitas a muchas plantas, una de las dificultades más mencionadas por los gerentes es la elevada diversidad de productos y los lotes pequeños de producción. Sin embargo, menciona también que la elevada diversidad de productos no es un problema en sí mismo, ni lo son los pequeños lotes de producción, sino la falta de capacidad de las plantas industriales para poder realizar un elevado número de cambios de medida entre sus productos sin comprometer su productividad (Shingo, 1983). Es por eso que se sustenta la necesidad de establecer una metodología que ayude a reducir los tiempos de cambio de formato.

En la teoría de planificación logística se conoce el concepto de EOQ, o lote económico. Este concepto establece que los cambios de formato tienen un costo inversamente proporcional con respecto a los lotes fabricados, siguiendo una curva exponencial decreciente, y el costo de mantención de inventario tiene un costo que es directamente proporcional a la cantidad de stock (Shingo, 1983). El punto de equilibrio que minimiza la sumatoria de ambos costos es el determinado EOQ (véase la **Ilustración 2**). Muchas empresas aún tienen la noción obsoleta que se debe mantener los lotes determinados por el EOQ y que la única estrategia para reducir los costos de los cambios de medida es haciendo una menor cantidad de cambios con la mayor cantidad de unidades producidas después de cada cambio, es decir, incrementando el tamaño de los lotes (Hirano, 2009).

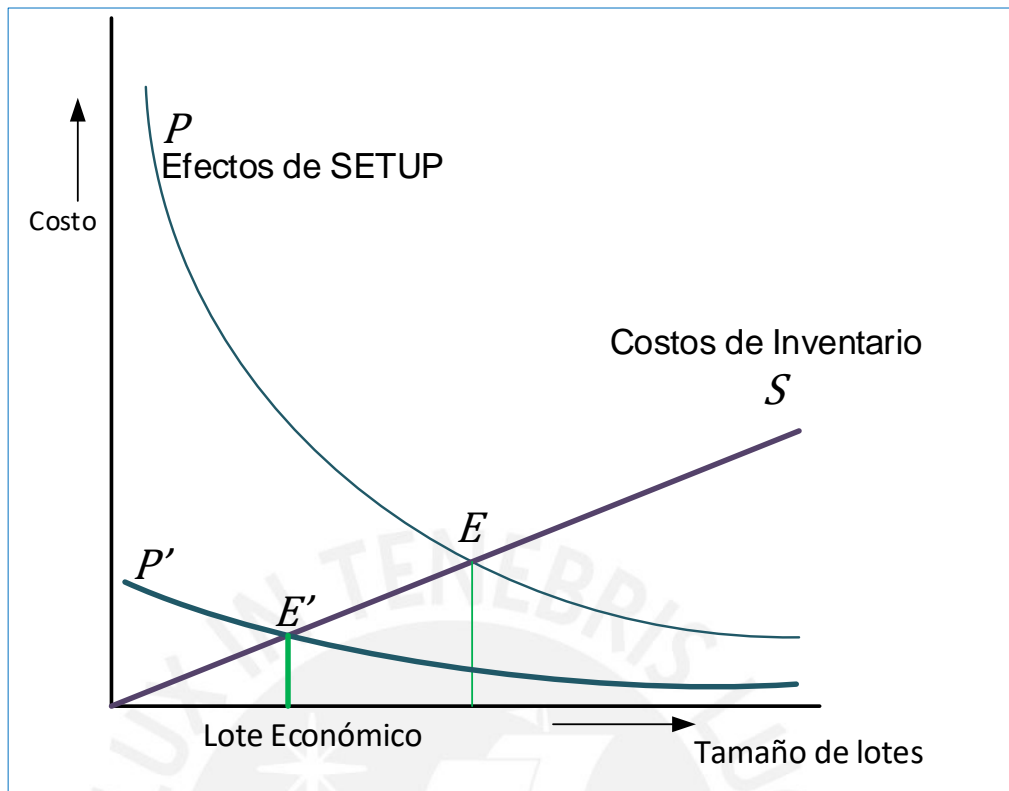
El interés por reducir el tamaño de los lotes de fabricación se debe a que las metodologías lean buscan eliminar los desperdicios que se generan en las industrias, y uno de los principales desperdicios es el exceso de inventario. Este exceso de inventario puede ser generado por la fabricación de un lote mayor al que solicita el cliente con el fin de guardar una cantidad de stock para futuros pedidos, y también por

la fabricación anticipada de productos que no se requieren en el momento (Sundar, Balaji, & SatheeshKumar, 2014).



*Ilustración 2: Gráfica representativa del Lote Económico. Fuente: (Shingo, 1983) y (Rodrigues, 2014)*

Shingo menciona que la planificación basada en lotes económicos de compra es apropiada desde un punto de vista teórico, pero indica también que no contempla la posibilidad de reducir drásticamente los tiempos de cambio de medida, lo cual brindaría mucho mayor flexibilidad para realizar los programas de producción, reducir el lead time y sobre todo reducir los inventarios (Rodrigues, 2014). Dentro de su planteamiento del SMED, Shingo incluso propone dividir deliberadamente los pedidos de lotes grandes con el fin de mantener bajos los niveles de inventarios en los almacenes (Rodrigues, 2014).



*Ilustración 3: Modificación de la gráfica de EOQ presentando un nuevo EOQ con SMED. Elaboración propia*

En la Ilustración 3 se puede apreciar que al reducir los efectos del cambio de medida (función  $P'$ , línea verde), el punto de equilibrio  $E'$  cambia drásticamente, reduciendo la necesidad de hacer lotes grandes para justificar un costo elevado de SETUP. Asimismo, el costo por el setup del punto  $E'$  se reduce notablemente (obsérvese la línea azul).

### 1.2.1. Metodología de Implementación de SMED

La metodología SMED consiste en observar el proceso actual y clasificar las actividades del cambio en dos categorías: Internas y Externas. Las actividades internas se realizan con el equipo detenido y las actividades externas se realizan cuando el equipo aún está en funcionamiento, es decir, son de preparación (Shingo, 1983).

Shigeo Shingo hace un resumen del procedimiento en 3 etapas que serán desarrolladas a continuación. En el resumen propuesto por Shingo (véase la Ilustración 4) se ve que las dos primeras etapas no reducen precisamente el tiempo

total de las actividades, sino que tienen como fin reducir el tiempo dedicado a las actividades internas cambiando el momento en que son ejecutadas para que no se realicen durante la parada de máquina (Rodrigues, 2014):

**a. Etapa Preliminar:**

En esta etapa no se distinguen aún las actividades internas de las externas. Se debe levantar la mayor información posible del estado actual del cambio de medida, para hacer un análisis continuo del proceso y determinar el estado actual y mapear las actividades completas. Un recurso muy utilizado durante esta etapa es la video grabación, la cual permitirá analizar las actividades realizadas y su duración.

**b. Etapa 1:**

Este es el paso en el que se separan las actividades internas y externas para realizar la mayor cantidad como sea posible de actividades de manera externa manteniendo los estándares actuales y sin realizar cambios en los dispositivos. Si este paso se realiza con objetividad, se puede reducir del 30 al 50% del tiempo de cambio.

**c. Etapa 2:**

En esta etapa se convierte las actividades que hacen de manera interna y se han identificado como tal, en actividades externas. Esto se realiza con 2 actividades principales: Volver a examinar las operaciones para identificar las actividades que fueron identificados como internas en vez de externas. Y encontrar maneras de convertir las actividades internas en externas. Por ejemplo: Pre ensamblando componentes haciéndoles modificaciones que lo permitan.

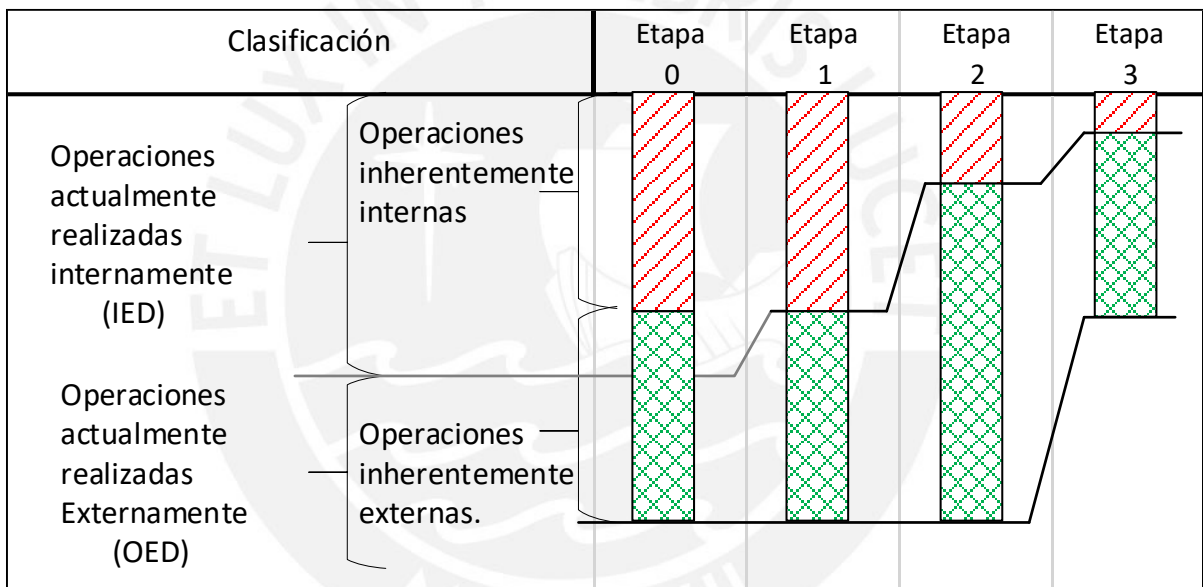
**d. Etapa 3:**

El nombre de la tercera etapa es "Stream line", el cual no tiene una traducción precisa al español, pero significa dinamizar, hacer fluir los procesos, de tal manera que se reduzca el tiempo de todas las actividades, tanto externas como internas mediante el análisis exhaustivo de cada una de ellas para identificar mejoras en el proceso y para descartar actividades que generan desperdicio y no son necesarias (como traslados, búsqueda de herramientas, búsqueda de piezas, etc.). Algunos autores como el japonés Hiroku Hirano sub-dividen esta etapa en 3 etapas e incorporan el uso de la metodología 5S como parte de la reducción de tiempos de

cambio (Hirano, 2009), lo cual también se aprecia en las publicaciones del instituto Lean Six Sigma Institute (LSSI, s.f.).

- Eliminar desperdicios en actividades internas.
- Eliminar desperdicios en actividades externas.
- Estandarizar y mantener el nuevo procedimiento.

Si bien la subdivisión de la etapa 3 ayuda para hacerla más didáctica, conlleva al presentimiento inadecuado de que se trata de una secuencia rígida, pero en realidad a partir de la etapa 2, todos los pasos de mejora pueden realizarse en paralelo y no necesariamente bajo un orden específico, porque las mejoras en cada etapa en particular pueden otorgar resultados independientemente positivos en la reducción de tiempos de cambio (Rodrigues, 2014).



*Ilustración 4: Etapas conceptuales de la mejora en los cambios*  
Fuente: (Shingo, 1983)

### 1.2.2. SMED en trenes de Laminación

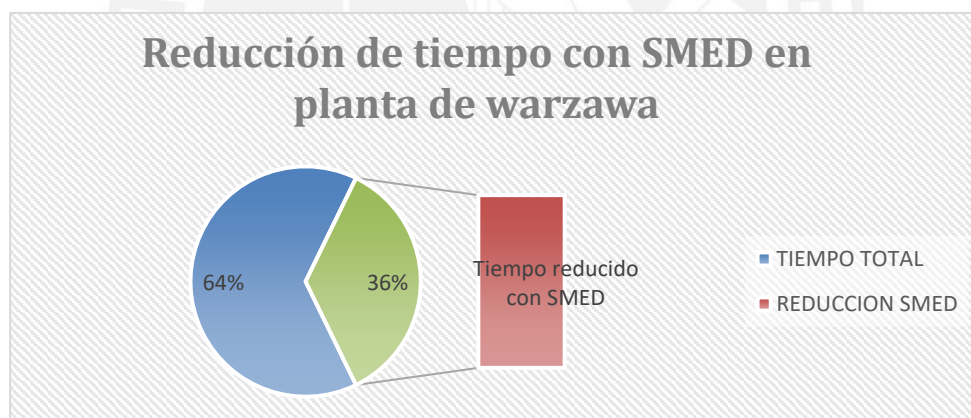
La metodología SMED es ampliamente aceptada dentro de las empresas de todos los rubros (Wilson, 2010). Específicamente, Arcelor Mittal ha hecho público que su planta de Warszawa redujo los tiempos de cambio de medida en 36%, bajando de 90 minutos a 58 minutos de cambio.

**Tabla 1:** Etapas de la mejora en los cambios de medida

| Procedimientos de cambio:<br>Pasos básicos                                      | Etapa 0 |     | Etapa 1 |     | Etapa 2 |     | Etapa 3 |     |
|---|---------|-----|---------|-----|---------|-----|---------|-----|
|   | IED     | OED | IED     | OED | IED     | OED | IED     | OED |
| Preparación y revisión de materia prima, herramientas y dispositivos instalados |         |     |         |     |         |     |         |     |
| Ajustes & remoción de moldes, cuchillas, etc.                                   |         |     |         |     |         |     |         |     |
| Centrado, dimensionado, configuración de las condiciones de operación           |         |     |         |     |         |     |         |     |
| Pruebas de proceso y ajustes  |         |     |         |     |         |     |         |     |
| Total   |         |     |         |     |         |     |         |     |

Fuente: (Shingo, 1983)

“El objetivo es llegar a 55 minutos. Considerando que mensualmente se tienen 50 cambios de medida por mes, la ganancia neta es 1500 minutos (25 horas / mes)”. (ArcelorMittal Warszawa, 2013)



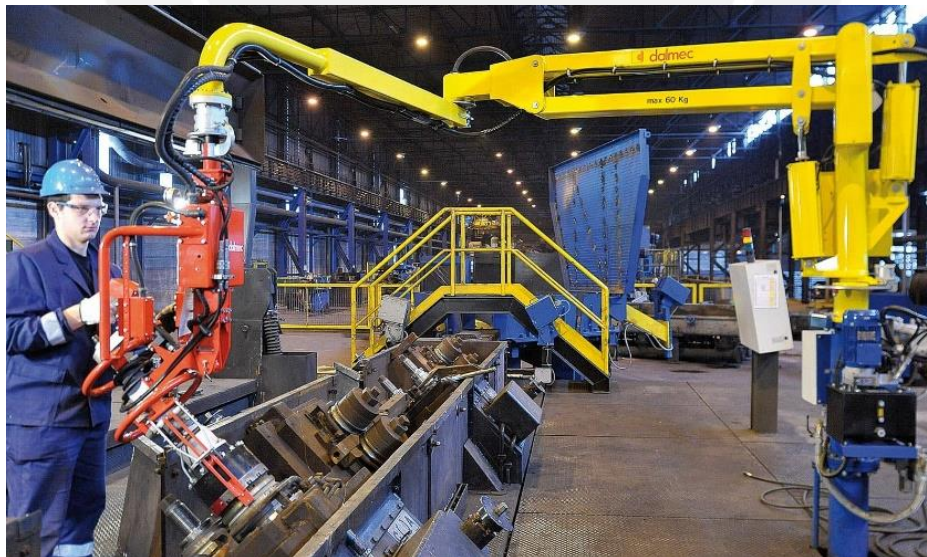
**Ilustración 5:** Gráfica representativa de los resultados de aplicad SMED en la planta de Laminación en Warszawa.  
Elaboración propia

Los fabricantes de equipos de laminación ofrecen propuestas para mejorar los tiempos de cambios de medida, que pueden ser adoptadas por las empresas para mejorar los tiempos de cambio, sin embargo, esta alternativa (adquisición de equipos de apoyo) debería considerarse dentro del último paso de la aplicación de la metodología SMED, después de haber agotado todas las opciones anteriores.

Por ejemplo, en la se aprecia un QROBOT que tiene como objetivo automatizar totalmente el trabajo de montaje en el bloque BGV y en la Ilustración 7 se aprecia una alternativa más económica: un brazo con servo motores que sirve para asistir al operador con el fin de reducir el tiempo de ajuste de los anillos que conforman el mismo bloque BGV. Sin embargo, en ambos escenarios si no se tienen los anillos preparados, el equipo preparado y todas las actividades necesarias externas finalizadas antes del cambio, las implementaciones no serán eficaces.



*Ilustración 6: QROBOT de la empresa Danieli - automatizar el cambio de anillos y accesorios de laminación en los bloques de alta velocidad.  
Fuente: (DANIELI , 2019)*



*Ilustración 7: Brazo de asistencia vendido por la empresa Danieli para reducir los tiempos de cambio de anillos de laminación en los bloques de alta velocidad.  
Fuente: (DANIELI , 2019)*

### 1.3. Programación Lineal

La programación lineal es una herramienta de la Investigación de Operaciones que se ha desarrollado durante el Siglo XX. Consiste en el modelamiento matemático para describir problemas en los que se requiere determinar valores de ciertas variables, a través de los cuales se consiga lograr un objetivo siguiendo restricciones propuestas (Lieberman & Hillier, 2015).

Un problema Lineal es un problema de optimización en el cual la función objetivo es lineal y las restricciones consisten en igualdades lineales y desigualdades lineales. El planteamiento exacto de un problema a otro puede variar, sin embargo, cualquier problema lineal puede transformarse para ser representado de la siguiente manera (Luenberger & Ye, 2016) :

$$\text{F.O.} \qquad \qquad \qquad \text{Minimizar :} \qquad \qquad \qquad (1)$$

$$c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Sujeto a:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1 \qquad \qquad \qquad (2)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n = b_2. \qquad \qquad \qquad (3)$$

.

.

.

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m \qquad \qquad \qquad (4)$$

Y:

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots x_n \geq 0, \qquad \qquad \qquad (5)$$

Según el modelo propuesto, las partes principales de un problema de programación lineal son (Lieberman & Hillier, 2015):

- a) Función Objetivo
- b) Variables de Decisión
- c) Restricciones
- d) Región factible

La Función Objetivo indica matemáticamente lo que se quiere maximizar o minimizar. Las variables de decisión contienen las opciones que se puede modificar para variar el resultado de la función objetivo. Las restricciones son limitaciones de las variables de decisión, que pueden expresarse en límites, igualdades, desigualdades o rangos. Si se grafica en un plano las funciones expresadas en las restricciones, el área que contiene los datos que cumple con todas las restricciones es la región factible (véase la Ilustración 8) que alberga todas las posibles opciones que cumplen las restricciones propuestas. (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2013)

La solución del modelo es aquella que determina los valores de las variables de decisión de tal manera que se cumplen con todas las restricciones y se obtenga un valor óptimo de la función objetivo.

Un ejemplo de modelo lineal tomado del libro “Administración de Operaciones” (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2013) es el siguiente:

F.O. Maximizar :

$$Z = 34x_1 + 40x_2 \quad (6)$$

Sujeto a:

$$4x_1 + 6x_2 \leq 48 \quad (7)$$

$$2x_1 + 2x_2 \leq 18 \quad (8)$$

$$2x_1 + x_2 \leq 16 \quad (9)$$

$$x_1 \geq 0; x_2 \geq 0 \quad (10)$$

El resultado puede obtenerse utilizando herramientas informáticas o mediante un método gráfico. En este caso, tomado de (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2013), la solución óptima está graficada en la Ilustración 8, donde se ha presentado las restricciones y la solución es el punto máximo que satisface todas las restricciones.

Solución:

$$\begin{aligned} x_1 &= 3 \\ x_2 &= 6 \end{aligned} \quad (11)$$

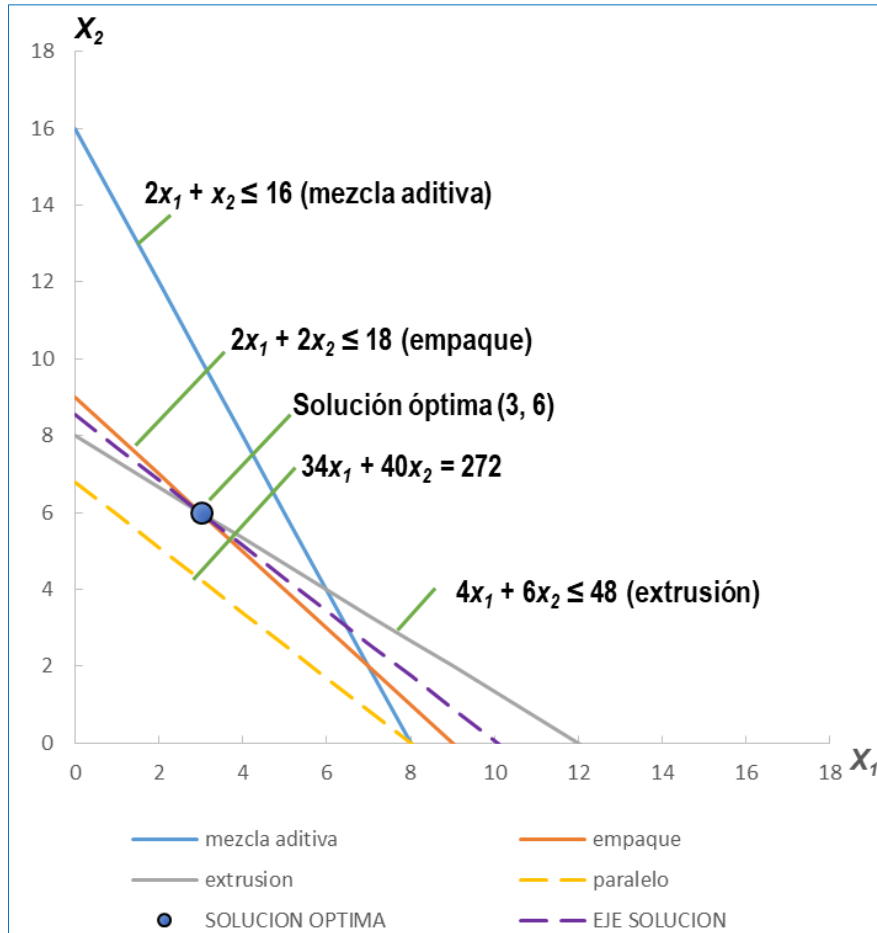


Ilustración 8: Ejemplo gráfico de un modelo de programación lineal. Fuente: (Krajewski, Ritzman, & Malhotra, 2013)

## 1.4. Secuenciación de producción

La programación y secuenciación en la industria significa organizar una serie de tareas a realizar y definir un conjunto de recursos disponibles para realizar dichas tareas. Esta programación y secuenciación requiere toma de decisiones que por lo general son parte de las funciones del área de planificación, la cual determina los recursos disponibles para la producción y las tareas que deben ser programadas (Baker & Trietsch, 2019).

La rama de Ingeniería Industrial dedicada a la Investigación de Operaciones estudia los métodos de planificación, y ha desarrollado diversos algoritmos y metodologías que optimizan el uso de recursos. En muchos casos, estos desarrollos son adoptados por las empresas para optimizar sus flujos productivos (Pinedo, 2016).

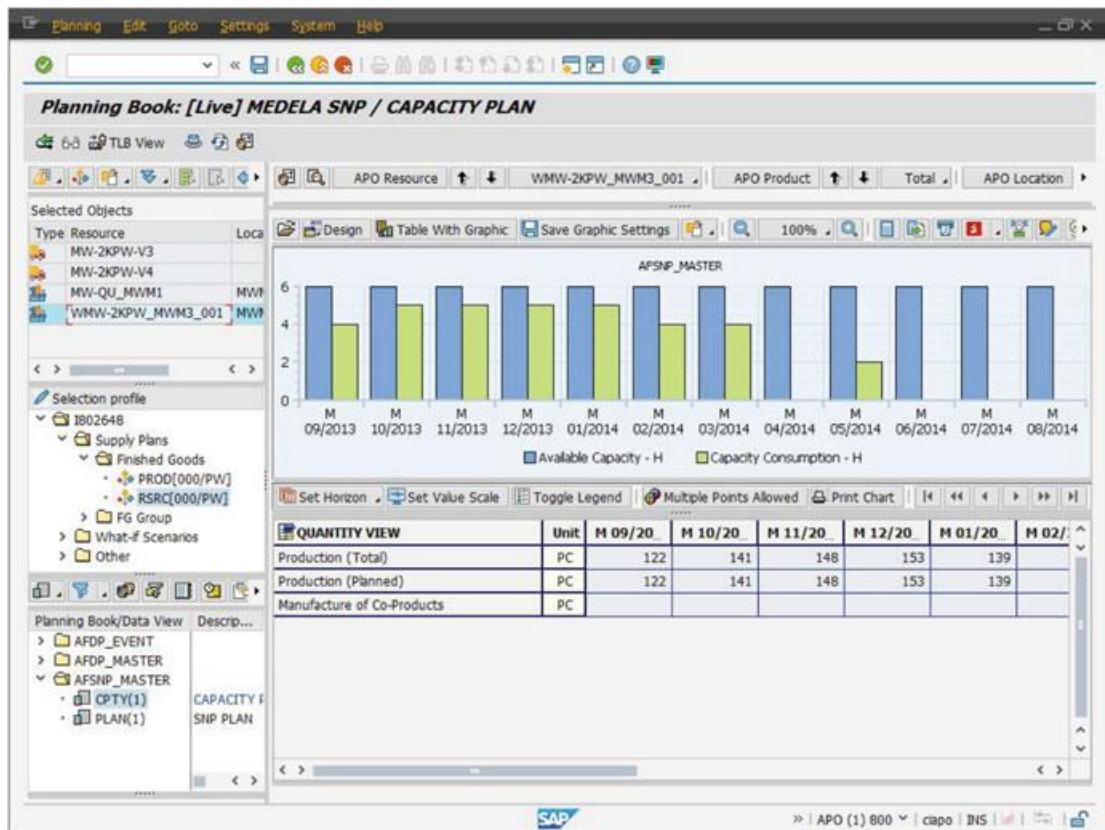


Ilustración 9: Pantalla de la interfaz de planificación del ERP SAP  
Fuente: (Pinedo, 2016)

Existen desarrollos informáticos industriales en forma de ERP que ya contemplan dentro de su programación diversos modelos matemáticos de optimización, tales como el APO del ERP SAP (véase la Ilustración 9) o el sistema ORTEMS (véase la Ilustración 10). Pero aún el modelo más óptimo debe ser adaptado a la realidad específica de cada industria (Pinedo, 2016). Un ejemplo se ve en los casos de estudio citados en la presente tesis; todos ellos han sido aplicados en siderurgia y laminación de acero, pero en cada caso el autor de la investigación propone un modelo distinto para necesidades específicas y para resolver un problema en particular.

Los métodos de planificación también están alineados con la política propia de ventas y de inventarios de las empresas. Por ejemplo, las grandes corporaciones siderúrgicas chinas que cuentan con complejos siderúrgicos con múltiples plantas tienen la facilidad de segregar la producción especializando las plantas para que hagan una menor cantidad de productos con lotes de producción que abastecen a muchos clientes a nivel mundial. Esto definitivamente representa una ventaja competitiva al operar con

economías de escala visiblemente superiores a las de otros países y otras empresas, donde una sola planta debe abastecer una amplia cartera de productos. La estrategia de planificación en ambos escenarios definitivamente es muy distinta (Baker & Trietsch, 2019).



*Ilustración 10: Captura de Pantalla del software ORTEMS.  
Fuente: (Pinedo, 2016)*

La planificación emplea horizontes de planeamiento, y existen herramientas para planificar a corto, mediano y largo plazo. Normalmente a largo plazo se utiliza las estrategias del planeamiento estratégico (Hill, Jones, & Schilling, 2015). Para el mediano plazo se utiliza pronósticos y proyecciones más específicos que obedecen a estudios de mercado y análisis de demanda. En la planificación de producción de corto plazo se determina un Plan de Operaciones, que detalla los productos que se deben producir y las cantidades, debido a que en esta etapa de la planificación ya se cuenta con información precisa con los montos para producir (Baker & Trietsch, 2019).

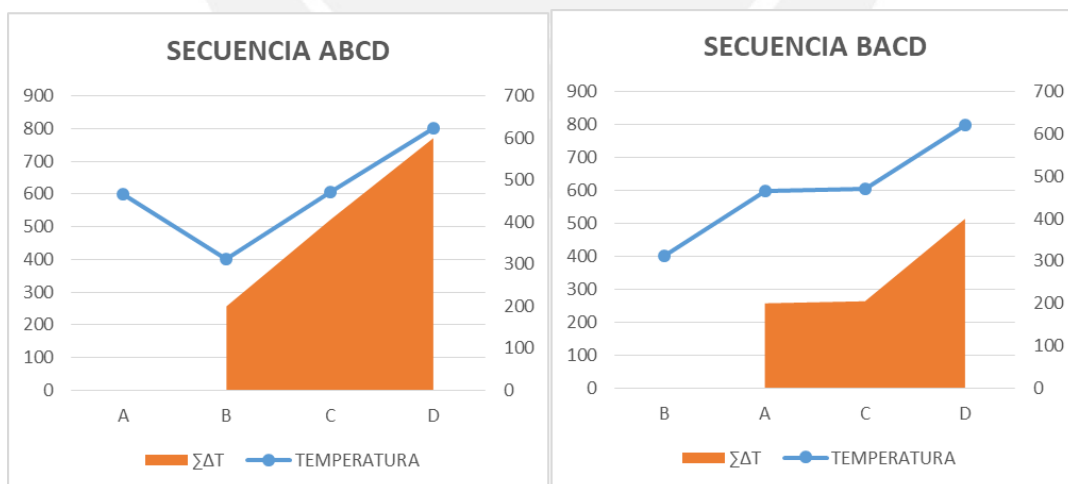
La competencia en la industria de fabricación del acero es un reto considerable. Las expectativas de los clientes, la necesidad de respuesta y sus niveles de satisfacción son elevadas, y los productores de acero deben mantener altos niveles de atención a sus clientes, lo cual muchas veces implica aceptar grandes cambios de medida en la laminación con el fin de atender clientes con fechas de entrega cercanas (Li, 2014).

#### **1.4.1. Tiempo de cambio en función de la secuencia (*Sequence Dependent Setup Times*)**

Las empresas necesitan hacer cambios en el setup de los equipos cuando se necesita producir diferentes productos. En algunos casos, el cambio de producción no guarda relación con el orden o secuencia de los productos porque los componentes a cambiar mantienen siempre un número constante y una misma magnitud (Pinedo, 2016). Un ejemplo de este caso es la producción en una imprenta de papel con sistema offset: Cada vez que se deba cambiar de un diseño de impresión a otro se debe cambiar la placa, limpiar la mantilla y calibrar el sistema de tintero. No hay productos más o menos compatibles entre sí, pues al cambiar de una placa a otra, aún si solo varía una letra, el cambio procede tan igual como si se cambiara todo el diseño.

No obstante, en una gran proporción de los procesos productivos, la magnitud del cambio de medida sí es dependiente de la secuencia de producción. Por ejemplo, en el caso de un horno de tratamiento térmico, en el que se realizan distintos tratamientos, mientras mayor es el diferencial de la temperatura necesaria en el horno entre los productos, mayor será el tiempo de setup entre ellos, y en casos como este, la secuencia es determinante en el tiempo de cambio (Pinedo, 2016).

Para graficar la dependencia del tiempo en función de la secuencia se presenta un ejemplo: En el caso que un horno de inducción demore 1s para elevar o reducir 1°C y que las temperaturas requeridas para los productos A, B, C y D son 600, 400, 605 y 800 respectivamente. En este ejemplo que pretende demostrar la significancia del orden de los productos, es decir, de la secuenciación para determinar los tiempos de cambio de formato.



**Ilustración 11:** Gráficos lineales de ejemplo de dos secuencias de los mismos productos en un horno eléctrico. Elaboración Propia

**Tabla 2:** Ejemplo de secuencias de producción en un horno eléctrico.

| SECUENCIA ABCD                     |             |                  | SECUENCIA BACD                     |             |                  |
|------------------------------------|-------------|------------------|------------------------------------|-------------|------------------|
| PRODUCTO                           | TEMPERATURA | $\Sigma\Delta T$ | PRODUCTO                           | TEMPERATURA | $\Sigma\Delta T$ |
| A                                  | 600         |                  | B                                  | 400         |                  |
| B                                  | 400         | 200              | A                                  | 600         | 200              |
| C                                  | 605         | 405              | C                                  | 605         | 205              |
| D                                  | 800         | 600              | D                                  | 800         | 400              |
| <b>TOTAL <math>\Delta T</math></b> |             | <b>600</b>       | <b>TOTAL <math>\Delta T</math></b> |             | <b>400</b>       |

*Elaboración Propia*

Tal como se aprecia en la **Ilustración 11**, si la secuencia de producción es ABCD, la sumatoria del diferencial de tiempo es 600°C, lo cual representa 600 segundos invertidos en tiempos de setup por calentamiento y/o enfriamiento del horno. Sin embargo, si se ordenan los productos con la secuencia BACD, entonces la sumatoria del delta T es 400°C, por lo tanto, el tiempo invertido en setup del horno se reduce a 400 segundos, es decir, se obtiene un 33% de reducción de tiempo de setup sólo por escoger una secuencia más adecuada.

De manera similar al ejemplo del horno de inducción que tiene productos más y menos cercanos entre sí, en un tren de laminación se tiene productos que son muy similares entre sí desde el punto de vista de proceso, y también hay productos que son muy distintos y necesitan cambiar una mayor cantidad de accesorios para alternar la producción entre ellos.

En el libro *Scheduling* de Michael Pinedo, se describe estos procesos como *Sequence Dependent Setup Times*, es decir, tiempos de cambio que están en función de la secuencia, y lo considera como una variable a incluir dentro de los modelos de optimización propuestos (véase la Ilustración 12).

“La variable  $S_{jk}$  representa los tiempos de cambio que están en función de la secuencia. Es el tiempo que se necesita entre los trabajos j y k. Asimismo, el  $S_{0k}$  denota el tiempo de cambio cuando el trabajo k es el primero de la secuencia y el tiempo  $S_{j0}$  representa el tiempo de limpieza después del trabajo j cuando j es el último trabajo en la secuencia.” (Pinedo, 2016)

Los tiempos de cambio que se rigen bajo la dependencia de la secuencia admiten un algoritmo polinomial que es fácilmente adaptable al contexto de un problema tipo “Problema del viajante” (TSP por sus siglas en inglés), en el cual se permutan todas las posibles rutas que se pueden adoptar durante la secuenciación de la producción (Pinedo, 2016).

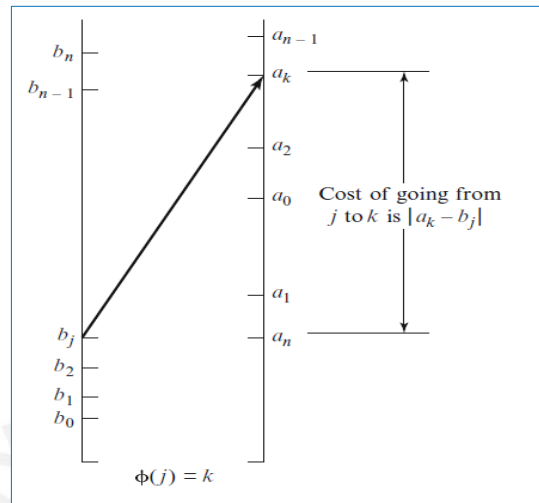


Ilustración 12: Gráfico que representa el costo de cambiar de una producción a otra. Fuente: (Pinedo, 2016)

#### 1.4.2. Algoritmo TSP

El “Problema del viajante” o “Traveling Salesman Problem” (TSP por sus siglas en inglés) es un problema muy estudiado que se define como un vendedor que debe visitar un número específico de ciudades para vender sus bienes. El vendedor no desea visitar las ciudades dos veces, y desea terminar en la ciudad en la que empezó el viaje. Asimismo, la distancia recorrida en total debe ser la menor posible, y se representa como un gráfico plano interconectado (véase la Ilustración 13) donde los nodos son las ciudades que el vendedor debe visitar (Wilfahrt & Sangho, 2017).

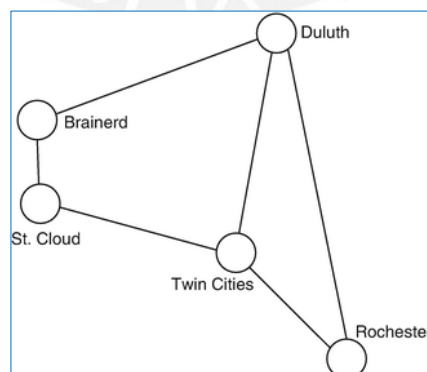


Ilustración 13: Ejemplo del mapa de una ciudad con nodos para resolver el problema TSP.

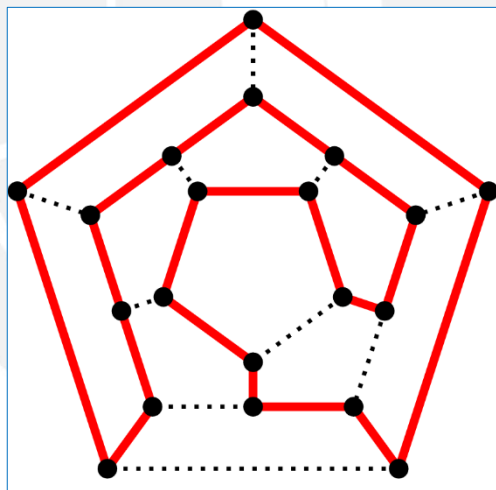
Fuente: (Wilfahrt & Sangho, 2017)

Una de las maneras de resolver el TSP es la denominada “fuerza bruta”, es decir, probando una a una todas las combinaciones posibles de ruta para determinar la ruta más óptima, pero esto puede implicar tiempos de procesamiento excesivamente elevados (Held & Karp, 1962). El número de combinaciones posibles se calcula con el factorial del número de nodos menos uno (12).

$$(n - 1)! \quad (12)$$

De esta manera, para resolver el TSP con 30 nodos interconectados entre sí, se tendría  $8.84E+30$  combinaciones con posibles rutas que el “viajero” podría tomar para llegar a su objetivo. Este número elevado de combinaciones y la complejidad de resolución, generan que este problema se catalogue como NP-HARD (Pinedo, 2016).

El TSP se puede definir en su forma básica según la teoría de grafos de la siguiente manera:  $G = (V, E)$  es un gráfico y  $F$  es la familia de ciclos de todos los ciclos Hamiltonianos en  $G$ , de tal manera que la suma de las aristas (*Edges*) que conectan los nodos o vértices (véase la **Ilustración 14**) del tour es tan pequeña como sea posible (Punnen, 2007).



**Ilustración 14:** Ruta Hamiltoniana. Fuente: (Sommer, 2007)

Una forma práctica de resolver el TSP es con el método del vecino más próximo, que significa que en cada nodo se realiza una evaluación de todos los vecinos posibles y se escoge al que tiene la distancia más cercana. En algunos casos este método puede brindar soluciones correctas, sobre todo en problemas simples como el de la **Ilustración 11**: Gráficos lineales de ejemplo de dos secuencias de los mismos productos en un horno . Sin embargo, esta metodología no garantiza una solución

óptima (Arora, y otros, 2007), porque depende mucho del lugar donde se ha iniciado el recorrido.

Es por ese nivel de complejidad que este problema muchas veces es acompañado de métodos heurísticos tales como “Colonia de hormigas”, “vecino más próximo”, “plano de corte” o algoritmo genético (Applegate, Bixby, Chvátal, & Cook, 2008).

Este problema tiene muchas aplicaciones que no necesariamente están alineadas con la optimización de rutas físicas. Se utiliza ampliamente en los campos de investigación matemática, ciencias de computación, investigación de operaciones, genética, ingeniería y electrónica (Punnen, 2007). Algunos ejemplos tangibles son la optimización de secuencias de producción, manufactura celular, asignación de frecuencias en redes de comunicación, estructuración de matrices, análisis de información en psicología, cristalografía de rayos X, overhauling de turbinas de gas, ordenamiento de almacenes, etc. (Punnen, 2007). En la presente tesis se utiliza este concepto para la secuenciación de productos de un tren de laminación.

### 1.4.3. Presentación lineal del TSP

El TSP se puede representar matemáticamente de distintas maneras: en forma de transformaciones matriciales, como una programación binaria cuadrática, con programación lineal, o programación lineal entera (Punnen, 2007). En esta tesis se utilizará un modelo de programación lineal entera.

La expresión lineal del modelo TSP implica minimizar la sumatoria de los costos de las rutas del grafo  $G$ , y  $P(\mathbb{F})$  es la envolvente convexa de  $\mathbb{F}$ . Según Punen, la expresión básica del modelo matemático se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ll} \text{F.O.} & \text{Minimizar :} \\ \sum_{j=1}^m c_j x_j & \end{array} \quad (13)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Sujeto a:} & \\ X \in P(\mathbb{F}) & \end{array} \quad (14)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Donde:} & \\ X = (x_1, x_2, \dots, x_m), \text{ siendo } m \text{ el número de aristas en } G & \end{array} \quad (15)$$

Esta expresión básica indica que el TSP busca minimizar el producto de los costos de todas las aristas, asignando un valor binario a la variable  $x$ , si la variable  $x$  vale 1, entonces el costo de esa arista se contempla en la sumatoria, y si, por el contrario, esa arista no está incluida en la ruta óptima, entonces el valor de  $x$  será 0, por lo que no se considerará en la sumatoria de costos. Como se puede presumir, este modelo está incompleto en la definición del problema, porque no se contemplan restricciones que garanticen que el resultado de la FO garantice una continuidad desde el punto de inicio y de término, asimismo, que se cumpla la condición de que se visite todas las ciudades una sola vez.

#### 1.4.4. Presentación lineal entera del TSP

En la siguiente formulación no se considera un subíndice  $j$  que indica las aristas del modelo, sino los subíndices  $i,j$ , que determinan los nodos de salida y de llegada de cada ruta respectivamente. El modelamiento matemático sería entonces (Pinedo, 2016):

$$\begin{array}{ll} \text{F.O.} & \text{Minimizar:} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} & \end{array} \quad (16)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n, \quad (18)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (19)$$

Esta nueva presentación del modelo es más completa y ha sido utilizada por diversos autores en los casos de estudio presentados en este marco teórico. Sin embargo, para poder utilizar este modelo se necesita restringir el modelo para evitar la generación de Sub-rutas. Las sub-rutas son soluciones propuestas por el modelo en las cuales no se tiene continuidad entre el lugar de inicio y de fin de todos los nodos. En la **Ilustración 15** se aprecia un ejemplo de una sub-ruta o sub-tour (Punnen, 2007).

### 1.4.5. Restricción Miller, Tucker y Zemlin para el TSP

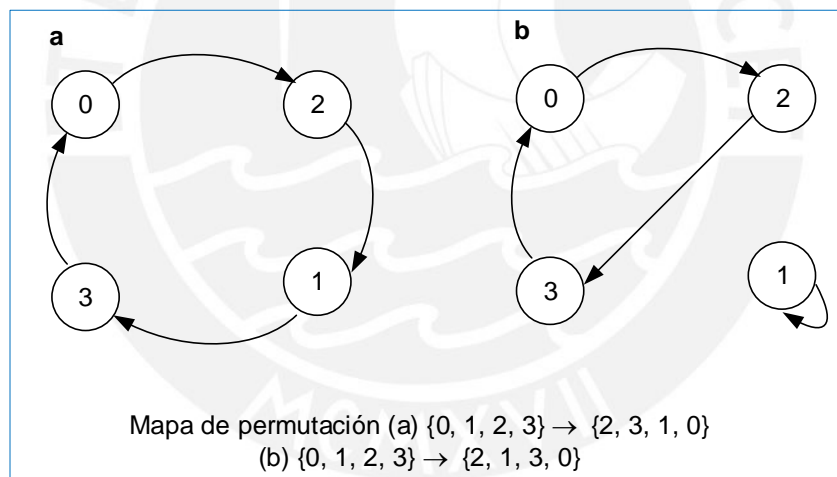
El problema de las sub-rutas existe desde el inicio del planteamiento del TSP. Punnen enlista en su artículo del TSP las siguientes restricciones propuestas:

- Restricciones de MTZ (Miller, Tucker y Zemlin).
- Restricciones de Flujo de redes.

En la presente tesis se va a desarrollar el problema usando las restricciones MTZ. La propuesta de estos autores es utilizar  $(n - 1)^2$  constantes adicionales y  $(n - 1)$  variables adicionales, de tal manera que se garantice la no existencia de sub-rutas en el grafo  $S$ . El planteamiento está en la ecuación (20) (Punnen, 2007).

$$(n - 1)x_{ij} + u_i - u_j \leq (n - 2), \quad i, j = 2, 3, \dots, n \quad (20)$$

El método MTZ no es el estado del arte actual, debido a que requiere la generación de muchas variables y se cuenta con algoritmos más eficientes en la actualidad, pero brinda resultados precisos y efectivos cuando se resuelve problemas de menos de 50 nodos, lo cual satisface el requerimiento de esta tesis (Punnen, 2007).



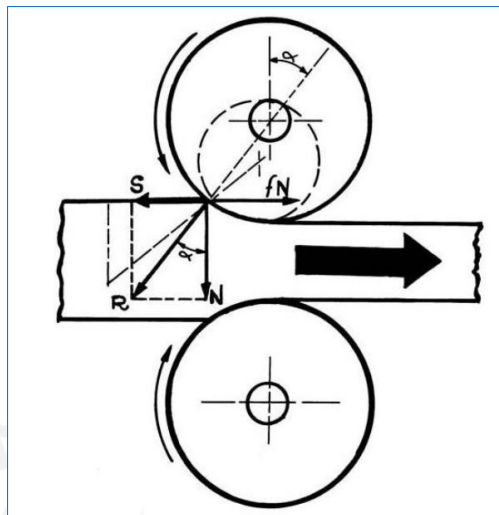
*Ilustración 15: El makespan de secuencia de tiempo dependiente  
Fuente: (Pinedo, 2016)*

### 1.5. Proceso de Laminación en caliente

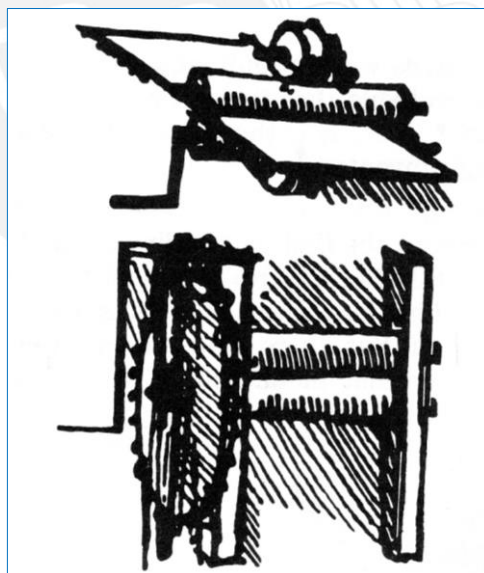
El proceso de laminación no tiene una fecha de invención precisa debido a que ha acompañado al hombre desde hace muchos siglos. Se presume que el proceso se inició con la molienda de granos o de caña de azúcar (C.A.A.S.A., 2007), existen indicios que se originó en las regiones del medio oriente y el sur de Asia,

aproximadamente durante el siglo 600 AC (Roberts, 1983). Por ejemplo, una de las primeras imágenes de una caseta de laminación fue dibujada por Leonardo Da Vinci en 1495 (véase la Ilustración 16) (C.A.A.S.A., 2007).

El proceso de laminación en caliente consiste en la reducción de la sección de metales utilizando la fuerza compresiva de un conjunto de rodillos (Lee, 2004).



**Ilustración 16:** Esquema de rodillos de laminación dibujados por Leonardo Da Vinci en 1495.  
Fuente: (C.A.A.S.A., 2007)



**Ilustración 17:** Diagrama de los esfuerzos en un proceso de laminación.  
Fuente: (Roberts, 1983)

El concepto de laminación se utiliza en varios procesos industriales, como la fabricación de bolas o de pernos, pero la laminación de barras exclusivamente se

subdivide en dos grupos: Productos planos (planchas) y productos largos o perfiles. La materia prima del proceso de laminación de productos largos son las palanquillas, que son barras de acero que provienen de una acería (C.A.A.S.A., 2007) y tienen un perfil cuadrado que puede variar entre las medidas de 80x80mm hasta 180x180mm. Estas palanquillas deben ser calentadas a una temperatura tal que se permita su deformación, la cual oscila entre 1100°C -1300°C y decae hasta 850°C -900°C al terminar las últimas pasadas (Dutta, 2011).

Dado que el proceso de reducción implica esfuerzos sobre los rodillos y sobre la barra, sería virtualmente imposible realizar el proceso de laminación con un solo par de rodillos, pues el vector  $R$  (véase la **Ilustración 17**) tendría una magnitud tal que generaría grietas en la barra laminada y dañaría los rodillos de una manera muy prematura, además que la cantidad de energía requerida sería demasiada y requeriría una infraestructura muy sobredimensionada (Roberts, 1983). Es por este motivo que los procesos de laminación se realizan en trenes, o conjuntos de casetas o stands a través de los cuales se realiza la reducción de la sección de una manera progresiva (Roberts, 1983). Con el paso de los años y los avances tecnológicos, el número de pasadas se ha ido incrementando, siendo común el número de 16 pasadas en los trenes de laminación modernos (Lee, 2004).

En los trenes de laminación de barras, los rodillos se encuentran por lo general dispuestos con un desfase transversal de noventa grados, lo cual permite realizar la reducción del material en varias direcciones. Un esquema de reducción ampliamente utilizado es la secuencia “óvalo, redondo”, muy útil para obtener barras redondas tales como alambrones o barras de construcción (Lee, 2004). En la Ilustración 18 se aprecia los esfuerzos desfasados 90 grados en la laminación de barras a diferencia del proceso de laminación de productos planos y en la Ilustración 19 se muestra cómo se realiza la secuencia “óvalo redondo” desfasando los rodillos laminadores.

El diseño de las pasadas depende del nivel de reducción y la forma que se desea obtener. En la Ilustración 20 se aprecian varios esquemas de reducción, con una forma predeterminada en cada pasada. Existen muchos tipos de trenes de laminación y equipamiento disponible con rangos de tamaños diversos y disposiciones distintas de rodillos que definen el diseño de pasadas (Kalpakjian & Schmid, 2014).

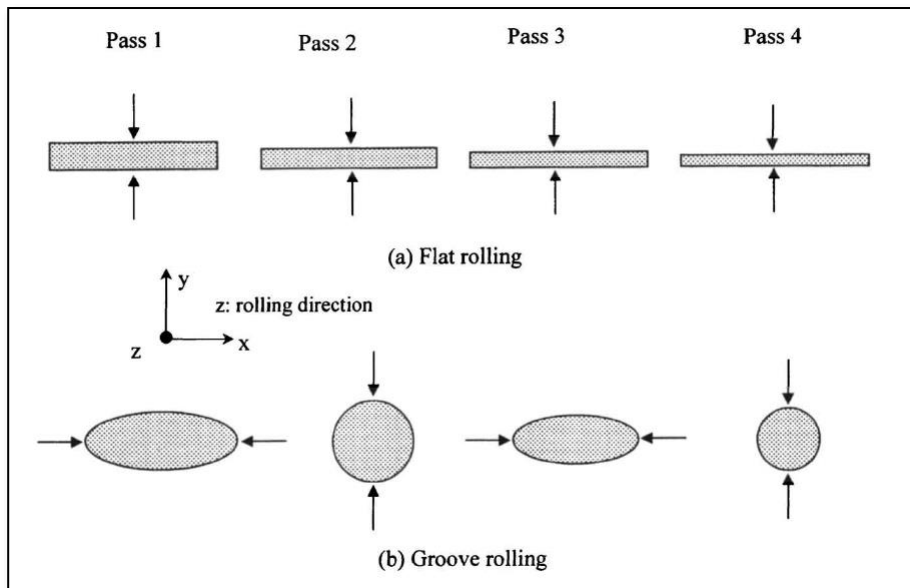


Ilustración 18: Fuerzas de reducción en la laminación de planos y laminación de barras redondas.  
Fuente: (Lee, 2004)

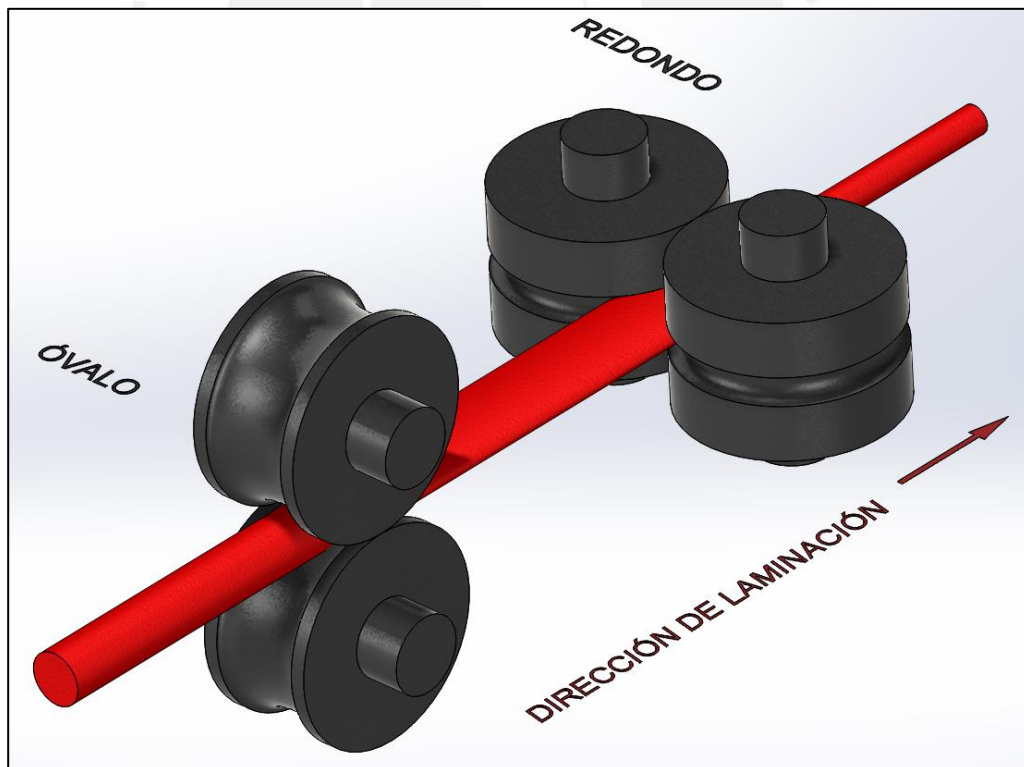


Ilustración 19: Dibujo sólido de una secuencia de laminación horizontal-vertical.  
Fuente: (Lee, 2004)

Por lo tanto, este diseño de pasadas se elabora específicamente para cada planta de laminación, debido a los diferentes diseños de planta (Dutta, 2011). Por ejemplo en la Ilustración 28 se aprecia el tren de laminación de la Corporación Aceros Arequipa en Pisco- Perú (C.A.A.S.A., 2016), el cual cuenta con dos líneas de alta velocidad, mientras que en la Ilustración 21 se ve un tren que divide una misma barra en 4 en una misma línea para producir 4 barras al mismo tiempo (DANIELI , 2019), lo cual obedece a un diseño de pasadas totalmente distinto.

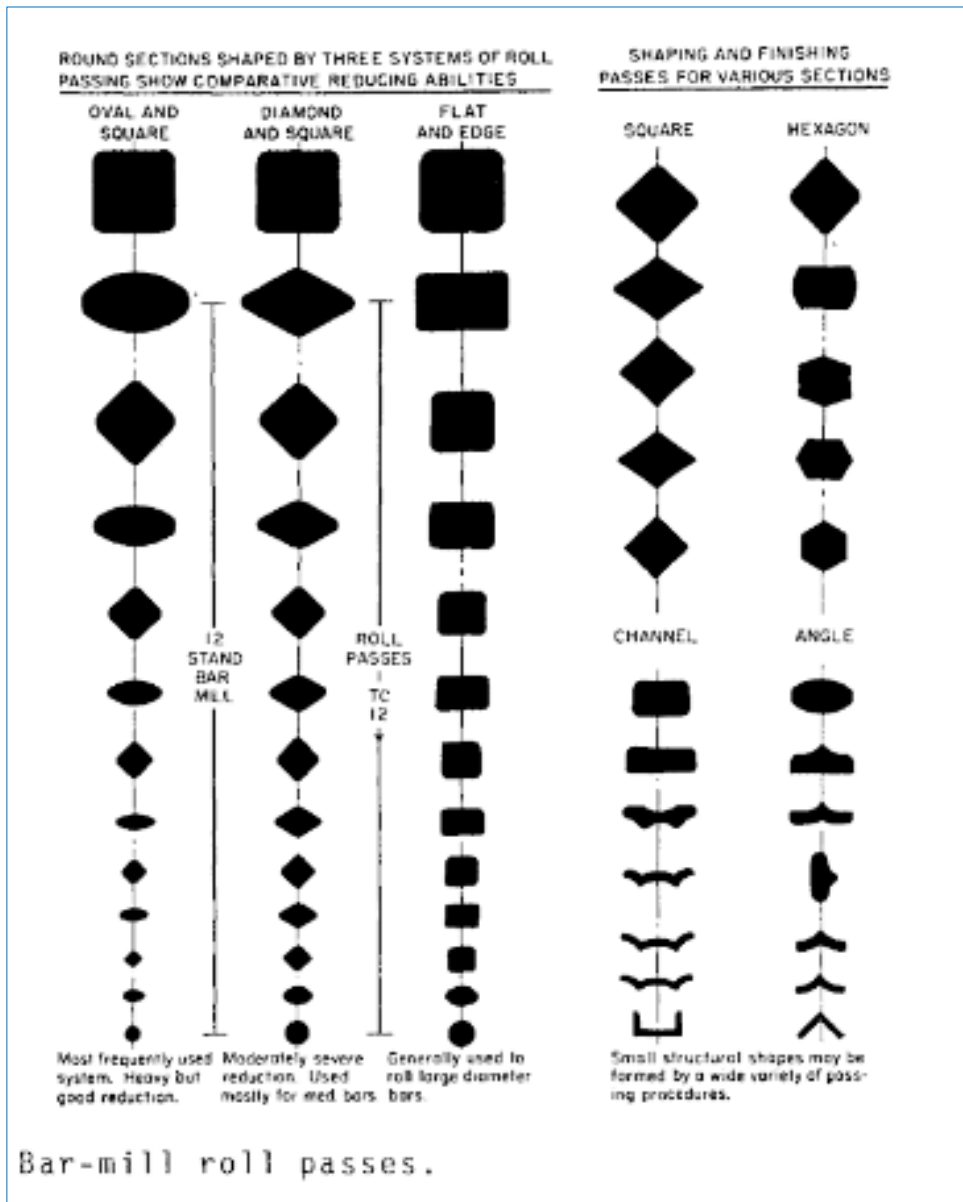
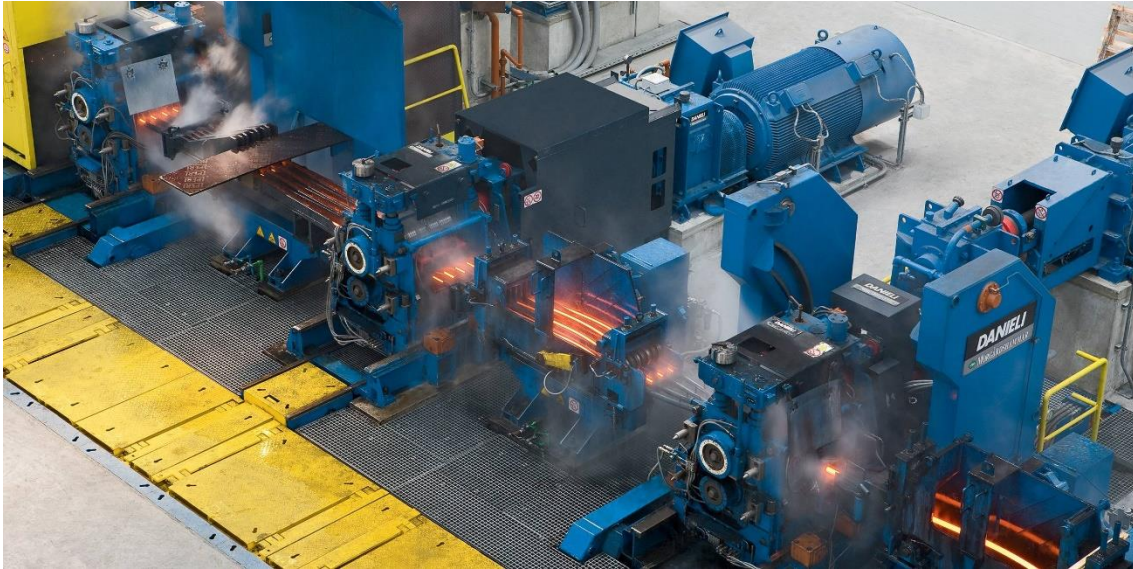


Ilustración 20: Esquema de pasadas de laminación para distintos productos Fuente: (Roberts, 1983)



*Ilustración 21: Tren de laminación de barras con slit4 en Planta de Warzawa  
Fuente: (DANIELI , 2019)*

Una sola planta de laminación puede estar diseñada para producir diversos productos. Dependiendo de la magnitud de la planta y del mercado que va a abastecer, se puede realizar lotes grandes de producción con pocas cantidades de productos, o realizar lotes pequeños con mucha variedad de productos (DANIELI , 2019). Es por este motivo que en los trenes de laminación se necesita realizar los cambios de formato de manera eficiente.

En la Tabla 3 se aprecia una matriz de las plantas de la corporación Nucor y la familia de productos que realiza cada una de ellas. Se puede apreciar que hay plantas que sólo realizan productos redondos y barras corrugadas como la planta de la ciudad de Marion, mientras que la planta de Utah produce en las familias de redondos, cuadrados, ángulos simétricos, ángulos asimétricos, canales estructurales, canales pequeños, barras corrugadas y productos de calidades especiales SBQ (Special Bar Quality) (Nucor, 2019).

Tabla 3: Listado de familias de productos fabricados por cada planta de laminación de la Compañía Norteamericana NUCOR.

| <b>Distribución de productos por planta</b> |          |           |                        |           |        |                    |                     |                       |                            |                   |                      |            |
|---|----------|-----------|------------------------|-----------|--------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------|----------------------|------------|
| PRODUCTOS                                   | REDONDOS | CUADRADOS | CUADRADOS ORNAMENTALES | HEXAGONOS | PLANOS | ANGULOS SIMÉTRICOS | ANGULOS ASIMÉTRICOS | CANALES ESTRUCTURALES | CANALES EN FORMA DE BARRAS | BARRAS CORRUGADAS | CALIDADES ESPECIALES | ALAMBRONES |
| NUCOR STEEL AUBURN                          | ●        | ●         | -                      | -         | ●      | ●                  | **                  | ●                     | -                          | ●                 | ●                    | -          |
| NUCOR STEEL BIRMINGHAM                      | **       | **        | -                      | -         | -      | -                  | -                   | -                     | -                          | ●                 | -                    | -          |
| NUCOR STEEL CONNECTITUD                     | -        | -         | -                      | -         | -      | -                  | -                   | -                     | -                          | ●                 | -                    | -          |
| NUCOR STEEL JACKSON                         | ●        | ●         | -                      | -         | -      | -                  | -                   | -                     | -                          | ●                 | -                    | -          |
| NUCOR STEEL KANKAKEE                        | ●        | -         | -                      | -         | -      | -                  | -                   | -                     | -                          | ●                 | -                    | -          |
| NUCOR STEEL KINGMAN                         | -        | -         | -                      | -         | -      | -                  | -                   | -                     | -                          | ●                 | -                    | -          |
| NUCOR STEEL MARION                          | ●        | -         | -                      | -         | -      | -                  | -                   | -                     | -                          | ●                 | -                    | -          |
| NUCOR STEEL MEMPHIS                         | ●        | -         | ●                      | -         | -      | -                  | -                   | -                     | -                          | -                 | ●                    | -          |
| NUCOR STEEL NEBRASKA                        | ●        | ●         | ●                      | ●         | ●      | ●                  | ●                   | ●                     | -                          | -                 | ●                    | ●          |
| NUCOR STEEL SEATTLE                         | ●        | -         | -                      | -         | ●      | ●                  | ●                   | ●                     | -                          | ●                 | -                    | -          |
| NUCOR STEEL SOUTH CALIFORNIA                | ●        | -         | ●                      | ●         | ●      | ●                  | ●                   | ●                     | -                          | *                 | ●                    | ●          |
| NUCOR STEEL TEXAS                           | ●        | *         | -                      | -         | ●      | ●                  | ●                   | ●                     | ●                          | ●                 | ●                    | -          |
| NUCOR STEEL UTAH                            | ●        | ●         | **                     | -         | ●      | ●                  | ●                   | ●                     | ●                          | ●                 | ●                    | -          |

\* Hay stock pero no se produce  
 \*\* Tren de laminación tiene capacidad, pero se produce bajo pedido.

Fuente: (Nucor, 2019)

## **CAPÍTULO 2. CASOS DE APLICACIONES DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA SECUENCIACIÓN DE PRODUCCIÓN EN PLANTAS DE LAMINACIÓN**

Esta tesis está orientada a reducir el tiempo de cambio de medida en una planta de laminación de acero en caliente, y todos los casos investigados están relacionados con este proceso específico. Sin embargo, la necesidad de realizar los cambios de medida con la mayor rapidez no es exclusiva de los trenes de laminación ni mucho menos de la industria siderúrgica. Los temas abordados en esta investigación se pueden extrapolar y replicar en casi cualquier proceso industrial que implique cambios de formato.

Como estrategias de mejora se están abordando dos metodologías: Desde el punto de vista de la Investigación de Operaciones se evalúa la implementación de una secuenciación de la producción mediante el algoritmo TSP. Y desde el punto de vista LEAN, se evalúa la implementación de la metodología SMED para mejorar la ejecución del cambio.

La primera metodología está orientada a secuenciar la producción de tal manera que se reduzca el número de cambios de accesorios en los equipos, lo cual implica una reducción del tiempo total destinado para cambio de medida en un intervalo de tiempo. Para conseguirlo se usa un algoritmo que determina la secuencia más óptima, o más cercana a la óptima posible.

La segunda propuesta de esta tesis es la implementación de la metodología SMED: Single Minute Exchange of Dies. La cual es una metodología japonesa que está incluida dentro de las herramientas LEAN para reducir las pérdidas en las empresas.

La implementación de ambas estrategias es independiente y complementaria: abordan estrategias distintas y su potencial de efectividad es independiente del tipo de proceso donde son aplicadas.

En la Tabla 4 se muestra un comparativo entre las metodologías que se presenta durante el proceso de investigación.

Tabla 4 : Comparativo conceptual de metodologías de la presente tesis

| Metodología                       | Objetivo                            | Estrategia   | Responsable de aplicación  | Fundamento                   |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--|--|------------------------------|
| <b>Optimización de secuencias</b> | Reducir tiempo de cambio de formato | Reducción de la MAGNITUD de cambios de medida optimizando la secuencia.              | Programador de secuencia mensual   | Investigación de Operaciones |
| <b>SMED</b>                       | Reducir tiempo de cambio de formato | Reducir tiempo de ejecución del cambio de medida, independientemente de la magnitud. | Todo el personal (ejecutores, planificadores, jefaturas, áreas de apoyo, etc.) | Metodología Lean             |

*Elaboración propia*

## 2.1. Uso de algoritmos para secuenciar la producción con el objetivo de reducir los tiempos de cambio.

La secuenciación es una parte de la programación de la producción en la que el orden de los trabajos a programar determina el programa. El problema más simple y puro de secuenciación es aquel en el que se tiene un solo recurso y todos los tiempos de procesamiento son determinísticos (Baker & Trietsch, 2019).

Los algoritmos de ruteo de redes pueden ser usados para otras aplicaciones distintas a la de establecer rutas físicas, tales como establecer rutas más cortas en las etapas de un proyecto (Lieberman & Hillier, 2015), o establecer la ruta más corta para un problema de secuenciación, donde las “ciudades” son los estados después de cada cambio de formato y el costo es el tiempo para pasar entre ellos (Pinedo, 2016).

El algoritmo de secuenciación se puede expresar como  $S_{jk} | C_{max}$  donde  $S_{jk}$  es el tiempo de pasar del estado  $j$  al estado  $k$ , siendo  $C_{max}$  la función objetivo a optimizar (Pinedo, 2016). La manera más eficiente de resolver este problema es aplicando un algoritmo de ruta más corta llamado Traveling Salesman Problem (TSP). A continuación, se presentarán casos de anteriores investigaciones (Baker & Trietsch, 2019).

## **2.2. Aplicación de TSP múltiple para un Tren de laminación en Caliente en Shanghai Baoshan Iron & Steel. (Liu, Tang, Rong, & Yang, 2000)**

En la industria siderúrgica se han presentado muchos casos de investigación de técnicas y algoritmos matemáticos para la planificación de producción efectiva. En el año 2000 se hizo una publicación sobre un modelo de TSP que se empleó para determinar la secuencia óptima de producción en un tren de laminación de planchas y rollos de láminas de acero en un complejo siderúrgico de Shanghai, de la empresa Baoshan.

En esta ocasión la intención era reducir los elevados costos atribuibles a la secuenciación, y se utilizó un algoritmo genético modificado (MGA), y se corrió en paralelo con el sistema de secuenciación manual. Al cabo de un año se determinó una reducción de costos del 20%, gracias a que el algoritmo genético fue más eficiente en el uso de los recursos (Liu, Tang, Rong, & Yang, 2000).

El caso de la laminación de planchas de acero es complejo, debido a que se tiene las siguientes restricciones: 1. Los pedidos de planchas tienen distintas durezas, y a mayor dureza se tiene en el pedido, entonces mayor es el desgaste de los rodillos laminadores. 2. El cambio de rodillos requiere muchos recursos, por lo que se debe laminar tantos pedidos como sea posible con los mismos rodillos. 3. La secuencia de anchos de planchas debe ser la siguiente: primero de forma creciente para calentar el horno de forma progresiva, y posteriormente todos los pedidos deben ser ordenados de manera decreciente en ancho de plancha para evitar que el canal formado en el rodillo laminador deje una marca en el siguiente producto a laminar. (véase la Ilustración 22).

La secuenciación de la producción en este caso debe asegurar que los “saltos” entre las distintas durezas, espesores y anchos del producto terminado sean los menos posibles. Para resolver este problema se utiliza un algoritmo TSP múltiple (MTSP), donde hay  $N$  “ciudades” para  $M$  vendedores. Este algoritmo define que todos los “vendedores” parten de la misma ciudad fija.

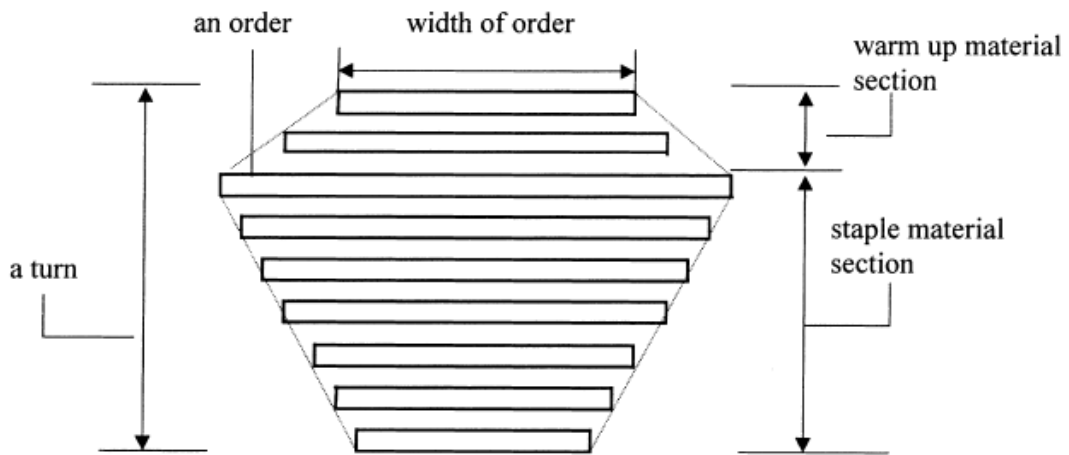


Ilustración 22: Esquema de secuenciación de un turno de producción en BAOSHAN. Cada rectángulo representa una orden de producción.  
Fuente: (Liu, Tang, Rong, & Yang, 2000)

El modelo debe ajustarse para que cada viajante inicie con la ciudad con la que terminaría el turno anterior. Además, se debe considerar que no se vuelve a laminar la misma orden al finalizar cada turno, sino que la ruta queda abierta para el siguiente turno. Los autores hacen esta adaptación agregando una “ciudad falsa” que servirá de nexo entre los turnos de producción y que la llaman “Dummy Node”. Una publicación previa del Pergamon Press de Gran Bretaña (Lenstra & Rinoooy Kan, 1975) usa un método similar, agregando una variable “ $J_*$ ”.

Modelo Matemático:

Se definen las variables:

Sufijo  $i$  representa la ciudad de inicio y  $j$  representa la ciudad de llegada de cada iteración.

$X_{ij}$ = Representa un valor binario, que es 1 en los siguientes casos:

- 1, el producto  $j$  es antecedido por el producto  $i$  en el mismo turno.
2. Si  $j$  es el primero del turno en producir.
3. Si la orden  $i$  es la última del turno.

$C_{ij}$ =Es el costo de penalidad por un cambio de medida del producto  $i$  al producto  $j$ .

Está determinado por la sumatoria de los costos:

$$C_{ij} = P_{ij}^w + P_{ij}^g + P_{ij}^h \quad (21)$$

$$i, j \in \{1, \dots, N\}, \quad i \neq j,$$

En la ecuación anterior (21) las variables  $P_{ij}^w$ ,  $P_{ij}^g$  y  $P_{ij}^h$  representan las penalidades de saltos de ancho (width), espesor (gauge) y dureza (hardness) respectivamente.

El modelo matemático se representa con la siguiente ecuación:

Minimizar:

$$\sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{N+M} C_{ij} X_{ij} \quad (22)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{N+M} X_{ij} = 1, \quad j \in \{1, 2, \dots, N+M\}, \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^{N+M} X_{ij} = 1, \quad i \in \{1, 2, \dots, N+M\}, \quad (24)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{i \in S} X_{ij} \leq |S| - 1, \quad (25)$$

$$s \subset \{1, \dots, N+M\}, \quad 2 \leq |S| \leq N+M-2,$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j \in \{1, \dots, N+M\}, \quad (26)$$

La función objetivo (22) minimizará los costos de los cambios de medida sujeto a las siguientes restricciones: (23) indica que sólo se realizará una tarea antes de la orden  $j$ , (24) indica que sólo se ejecutará una orden después de la orden  $i$ . (25) Evita la generación de sub secuencias, y hace que la secuencia sea continua. La restricción (26) indica que las variables  $X_{ij}$  sólo pueden tomar valores binarios de 0 o 1.

En esta publicación los autores complementaron su modelo aplicando algoritmos genéticos y lograron demostrar que era factible la secuenciación con un modelo matemático, y lo aplicaron en línea en la programación de la producción mediante un desarrollo en C++ y usando una base de datos "SYBASE" con la información de pedidos de Shanghai Baoshan Iron & Steel. El sistema demostró una mejora del 20% con respecto al modelo anterior realizado manualmente.

### 2.3. Aplicación de SDST en línea de producción (Schaller, Guptab, & Vakharia, 1999)

Esta publicación hace un análisis de distintas metodologías empleadas para secuenciar una línea de células de manufactura con varias máquinas y varias tareas (Jobs). El autor modela el caso tomando como referencia modelos previos y hace uso de diversas metodologías heurísticas para evaluar y determinar su error y efectividad con el fin de reducir el tiempo de procesamiento.

En este caso el número de trabajos está determinado por:

$$N = \{1,2,3, \dots, n\} \quad (27)$$

En la investigación de Schaller, el número de máquinas está determinado por  $m$  y los trabajos están organizados en familias  $K$ . Cuando se cambia de un producto de una familia al producto de otra familia entonces se considera un tiempo de cambio "Setup Time". El tiempo de procesamiento  $i$  en la máquina  $j$  está determinado por  $P_{ij}$ . Asimismo, el tiempo de cambio por cambiar de la familia  $r$  a la familia  $f$ , en la máquina  $j$  se representa de la siguiente manera:

$$S_{rf}^j \quad (28)$$

(Tiempo de cambio de  $r$  a  $f$  en  $j$ )

Asimismo, se deduce que el tiempo de cambio entre productos de la misma familia es cero:

$$\forall (f, f' > 0) S_{ff'}^j = 0. \quad (29)$$

Los trabajos  $n$  pertenecientes a la  $K$ -ésima familia se verían representados de la siguiente manera:

$$n = n_1 + n_2 + n_3 \dots + n_K \quad (30)$$

El parámetro  $N_f$  representa los trabajos que pertenecen a una familia, para  $K$  familias:

$$N_f = \{1, 2, \dots, K\} \quad (31)$$

El tiempo de procesamiento de la tarea  $\sigma(i)$  en una secuencia:  $\sigma = (\sigma(1), \dots, \sigma(n))$  en una máquina  $j$ ,  $C(\sigma(i), j)$ , está dado por la siguiente relación:

$$C(\sigma(i), j) = \max \{C(\sigma(i), j - 1); C(\sigma(i - 1), j) + s_{qf}^j\} + P_{\sigma(i), j}, \quad (32)$$

Este problema intenta encontrar una secuencia  $\sigma$  que reduzca la cantidad de cambios:  $C(\sigma) = C(\sigma(n), m)$ . En el caso que cada familia contenga una sola tarea, entonces el problema se convierte en un flowshop con tiempos en función de la secuencia (*sequence dependent setup times*).

## 2.4. Planificación integrada de Coladas continuas y Trenes de laminación en caliente (Imke, 2013)

La investigación realizada por el alemán Imke Matik en el libro “Integrated Scheduling of Continuous Casters and Hot Strip Mills” presenta un estudio detallado de la industria siderúrgica y hace propuestas del planeamiento logístico de la cadena de suministros y de la programación de producción en corto y largo plazo.

Uno de los primeros modelos de secuenciación y determinación de tamaños de lote es el modelo de Wagner-Whitin publicado en 1958 que tiene una notación similar al modelo del EOQ (Economic Order Quantity), que se utiliza para determinar los lotes económicos para compra logística (Imke, 2013).

Minimizar:

$$\sum_{t=1}^T (sc_t y_t + hc_t s_t) \quad (33)$$

Sujeto a:

$$s_{t-1} + x_t = d_t + s_t \quad (34)$$

$$x_t \leq sd_{tk} * y_t \quad (35)$$

$$x_t, s_t \geq 0; y_t \in \{0, 1\} \quad (36)$$

En el modelo de Wagner-Whitin (Jans & Degraeve, 2004) se encuentran 3 variables:  $x_t$  es el nivel de producción,  $s_t$  es la variable de inventario,  $sc_t$  es el costo de cambio de medida y  $hc_t$  es el costo por mantener  $s_t$  en stock. Adicionalmente se agrega una variable binaria  $y_t$  para determinar las combinaciones de cambios de medida. En la ecuación (33) se visualiza fácilmente que es similar a la ecuación (22) (Tang, Rong, & Yang, 1999) presentada en el caso anterior con excepción que ahora se está considerando el costo del inventario y los lotes de producción.

La función objetivo (33) busca minimizar el costo total de producción, cambio de medida (setup) e inventario. Y las restricciones del modelo son: 1. La producción en exceso del periodo se trasladan como inventario al siguiente periodo (34). 2. El tamaño del lote de producción se considera cero si no se realiza el cambio de medida respectivo para procesar ese producto (35). 3. Las variables de decisión son positivas y la de cambio de medida es binaria (36).

## 2.5. Planificación de Producción en Manufactura de Acero (Tren de laminación y Acabado) (Li, 2014)

El autor de esta investigación, Li Wanxin, hace una recopilación de modelos de secuenciación de plantas de acero y elabora un modelo para planificar la producción de un tren de laminación de planchas en conjunto con la línea de acabado. A diferencia de los casos anteriores, en esta investigación se presentó una matriz de tiempos de cambio específica para el tren de laminación. Que fue utilizada como un input para determinar la secuencia más óptima.

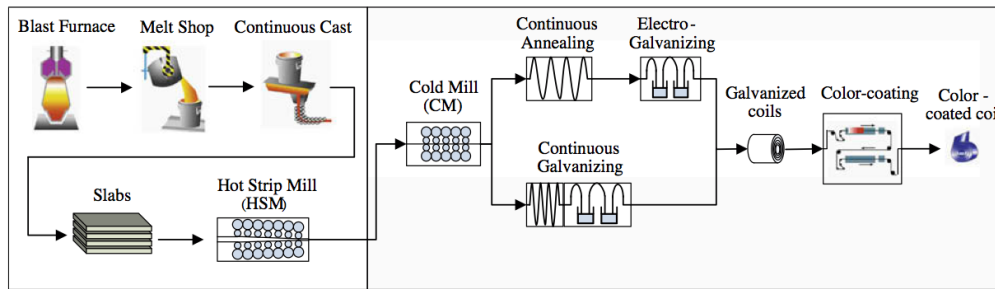


Ilustración 23: Flujo de proceso de rollos y planchas  
Fuente: (Li, 2014)

Li Wanxin enfoca su investigación en un proceso de laminación de planchas. En la Ilustración 23 se puede apreciar el flujo de proceso: Empezando por el alto horno, acería y colada continua; posteriormente el proceso de laminación de planchones en el HSM, para después pasar al proceso de acabado en el laminado en frío, galvanizado continuo, electro-galvanizado, recocido y finalmente revestimiento de color. Esta investigación se enfoca en el proceso de acería, que es donde se fabrican las palanquillas (véase la Ilustración 24 donde se muestra la etapa final de la producción de palanquillas en la acería), y el proceso de laminación, donde se procesan las palanquillas de la acería y se laminan para obtener productos terminados.

El modelo propuesto se presenta de manera similar a un modelo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. (*vehicle routing problema with time window - VRPTW*), que es un modelo NP-Hard y se plantea como un modelo de Programación Lineal Entera Mixto (MILP).



Ilustración 24: Colada continua de 4 líneas en Azerbaiyán donde se visualiza la fabricación de palanquillas "billets"  
Fuente: (BAKU Steel Company, s.f.)

El objetivo del modelo es elaborar una secuencia que consiga los siguientes beneficios: 1) Tratar de hacer la menor cantidad posible de cambios de calidad de acero en la acería, por motivo que ello conlleva tiempos de parada. 2) En la laminación se trata de agrupar los productos con dimensiones similares para reducir el número de cambios de medida que impliquen un elevado intercambio de utillaje. Básicamente el modelo busca reducir los costos atribuibles a los cambios de formato y considera penalidades por producir productos fuera de la fecha requerida por el cliente.

a) Parámetros:

$I_i$  : Parámetro binario del Inventario para el batch i. 0 es que no hay inventario y 1 es que sí se tiene inventario suficiente para laminar el batch i.

$N$  : Número de batches de producción.

$i, j$  : Índices de cada batch de producción.

$L_i$  : Penalidad por tardanza en una unidad de tiempo para el batch i.

$C_{ij}$  : Tiempo de cambio de medida en la acería entre los batch i y j.

$S_{ij}$  : Tiempo de cambio de medida en la laminación entre los batch i y j.

$T_1$  : Tiempo total disponible en la acería para el periodo.

$T_2$  : Tiempo total disponible en la Laminación para el periodo.

$D_i$  : Tiempo programado para batch i.

$T_{1i}$  : Tiempo de procesamiento para el batch i en la acería.

$T_{2i}$  : Tiempo de procesamiento para el batch i en la laminación.

$T_{break}$  : Tiempo mínimo requerido entre la acería y la laminación para el mismo batch.

$M$ : Parámetro auxiliar.

b) Variables de decisión:

$x_{ij}$  : Elementos en la matriz de cambio de medida en la acería

$y_{ij}$  : Elementos en la matriz de cambio de medida en la laminación

$t_{1i}$  : Tiempo de inicio del batch en la acería

$t_{2i}$  : Tiempo de inicio del batch en la laminación

$l_i$  : Total retraso del batch i

$k_i$  : Variable auxiliar del batch i

c) Función objetivo:

Minimizar:

$$\alpha \sum_i \sum_j C_{ij} x_{ij} + \beta \sum_i \sum_j S_{ij} y_{ij} + \sum_i L_i * l_i \quad (37)$$

Minimiza la sumatoria de los costos (de acería y laminación) por cambio de medida y de las penalidades.

d) Restricciones:

Sujeto a:

$$(t_{1i} + T_{1i} + T_{break}) * (1 - l_i) \leq t_{2i} \forall i$$

La producción de laminación debe ser después de producir las palanquillas en la acería o contar con suficiente inventario de palanquillas ( $l_i$ )

(38)

$$t_{1i} + T_{1i} + C_{ij} - (1 - x_{ij}) \cdot T_1 \leq t_{1j} \quad \forall i, j; i \neq j$$

Garantiza la secuencia del batch j después del batch i en la acería, y especifica que el inicio del batch j sea después del batch i más el tiempo de cambio entre ambos ( $C_{ij}$ ).

(39)

$$t_{2i} + T_{2i} + S_{ij} - (1 - y_{ij}) \cdot T_2 \leq t_{2j} \quad \forall i, j; i \neq j$$

Es igual que la restricción anterior (39) pero para la laminación.

(40)

$$l_i = \max\{0, t_{2i} + T_{2i} - D_i\} \quad \forall i, i$$

La variable  $l_i$  calcula el retraso del batch i.

(41)

$$0 \leq l_i \leq 0 + M \cdot k_i \quad \forall i$$

Continuación de la restricción (41)

(42)

$$t_2 + T_{2i} - D_i \leq l_i \leq t_{2i} + T_{2i} - D_i + M \cdot (1 - k_i) \quad \forall i$$

Continuación de la restricción (41)

(43)

$$\sum_j x_{ij} = 1 - I_i \quad i = 1, \dots, N; j = 0, 1, \dots, N$$
(44)

Garantiza que solo se considere una sola vez los productos finales del cambio de medida de laminación y que sea cuando hay stock de palanquilla  $I_j$ .

$$\sum_i x_{ij} = 1 - I_j \quad j = 1, \dots, N; i = 0, 1, \dots, N$$

Garantiza que solo se considere una sola vez los productos iniciales del cambio de medida de laminación y que sea cuando hay stock de palanquilla  $I_j$ . (45)

$$\sum_i y_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, N; i = 0, 1, \dots, N$$

Garantiza que solo se considere una sola vez los productos iniciales del cambio de medida de acería. (46)

$$\sum_j y_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, N; j = 0, 1, \dots, N$$

Garantiza que solo se considere una sola vez los productos finales del cambio de medida de acería. (47)

$$0 \leq t_{1i} \leq T_1 - T_{1i}, \forall i$$

Asegura que el batch  $i$  se planifique dentro del periodo actual de planificación en la acería. (48)

$$0 \leq t_{2i} \leq T_2 - T_{2i}, \forall i$$

Asegura que el batch  $i$  se planifique dentro del periodo actual de planificación en la laminación. (49)

$$k_i, x_{ij}, y_{ij} \in \{0, 1\}$$

Muestra las variables de decisión binarias. (50)

La estructura de este modelo presenta similitudes con el modelo clásico de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW por sus siglas en inglés), el cual está catalogado como NP-hard por varios autores (Tang, Rong, & Yang, 1999) y (Pinedo,

2016), y por este motivo el autor propone el uso de herramientas heurísticas que simplifican el modelo y las ensayó haciendo uso del solver CPLEX.

Tabla 5 : Matriz de tiempos de cambio de medida en el tren de laminación.

|        | Size 1 | Size 2 | Size 3 | Size 4 | ... |
|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| Size 1 | *      | 87     | 86     | 83     | ... |
| Size 2 | 59     | *      | 86     | 83     | ... |
| Size 3 | 60     | 64     | *      | 82     | ... |
| Size 4 | 63     | 60     | 64     | *      | ... |
| ...    | ...    | ...    | ...    | ...    | ... |

*Fuente: (Li, 2014)*

Para poder ejecutar el modelo propuesto el autor hace uso de una matriz de doble entrada (Tabla 5) en la que se encuentran los costos en tiempo de cada combinación de productos para cambios de formato. Y organizó los datos según una base de datos donde se enlista los productos a fabricar y sus características, cuyo encabezado se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Estructura de datos propuesta para organizar la información de los productos.

| 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6     | 7     | 8    | 9   | 10  | 11             | 12             |
|----|----|----|----|----|-------|-------|------|-----|-----|----------------|----------------|
| ID | T1 | T2 | S1 | S2 | Quant | Grade | Size | Due | Inv | Process Time 1 | Process Time 2 |

*Fuente: (Li, 2014)*

En esta publicación el autor demostró que es factible la implementación de modelos de optimización con programación lineal para mejorar la secuenciación en un programa de producción y que el mismo se podía optimizar para obtener mayores ganancias en la empresa.

## **CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL CASO**

En el presente capítulo se realizará la descripción de un tren de laminación de acero donde se desarrolla el estudio.

### **3.1. Descripción de la empresa**

La empresa se dedica a la fabricación y comercialización de productos de acero. Cuenta con mil trabajadores aproximadamente y tiene una sede donde se encuentran las plantas de producción y el tren de laminación del presente estudio.

### **3.2. Productos de la empresa**

La cartera de productos de la empresa es grande y está compuesta por productos importados y productos fabricados. Los productos fabricados son barras corrugadas, alambrones, barras trefiladas, perfiles angulares, canales, cuadrados, acero dimensionado, etc. Para efectos del estudio actual se están considerando sólo los productos del tren laminador y se han dividido en seis categorías: ángulos, canales, redondos, barras corrugadas, platinas y alambrones.

### **3.3. Descripción del Proceso Productivo**

El proceso se realiza en un tren de laminación de barras de 16 pasadas, las cuales conforman tres etapas: Tren de desbaste, tren intermedio y tren acabador. Este tren barras laminadas en caliente a partir de palanquillas. El proceso de laminación está descrito en el presente marco teórico y consiste en la reducción de la sección de una barra utilizando rodillos de laminación.

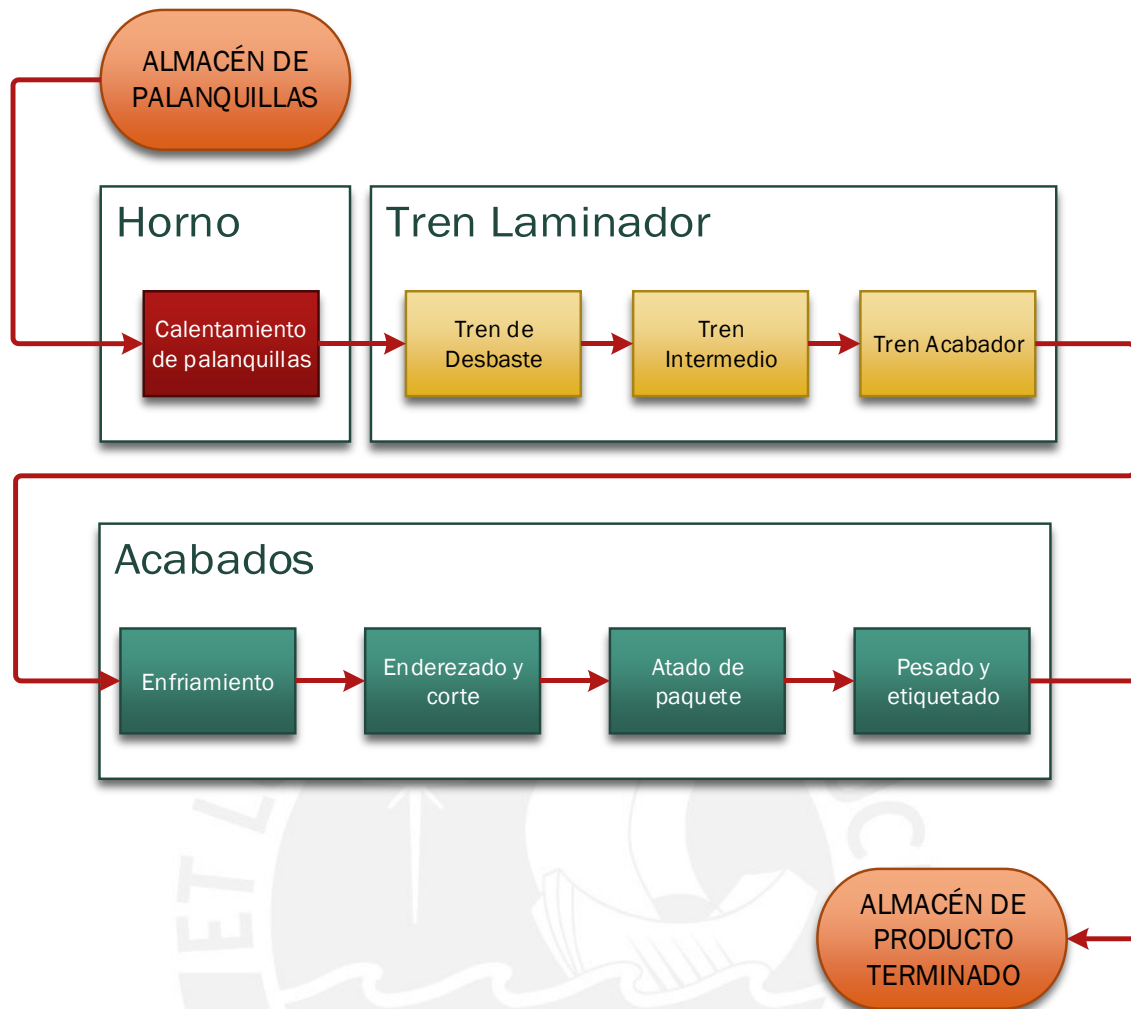


Ilustración 25: Diagrama de Flujo del proceso. Elaboración Propia

### 3.3.1. Horno de recalentamiento:

Es un dispositivo que se encarga de calentar de forma continua las palanquillas para que estén a una temperatura adecuada de laminación.

Cuenta con quemadores en la parte del techo para calentar la palanquilla y con una cubierta interior de varias capas de material refractario que protegen la estructura de la elevada temperatura. Asimismo, tiene un sistema galopante en la parte inferior que permite desplazar las palanquillas manera transversal desde su ingreso hasta su punto de salida.



Ilustración 26. Horno de recalentamiento diseñado por Danieli en un tren de laminación. Fuente: (DANIELI , 2019)

### 3.3.2. Tren Laminador

El conjunto de casetas que contiene los rodillos tiene el nombre de tren laminador. Tal como se ha descrito en el marco teórico de la presente tesis, el tren laminador cuenta con pares de rodillos motorizados que reducen la sección de las barras. Las casetas están dispuestas en forma continua, es decir, la barra que sale de una caseta ingresa inmediatamente a la siguiente a través de unas guías.

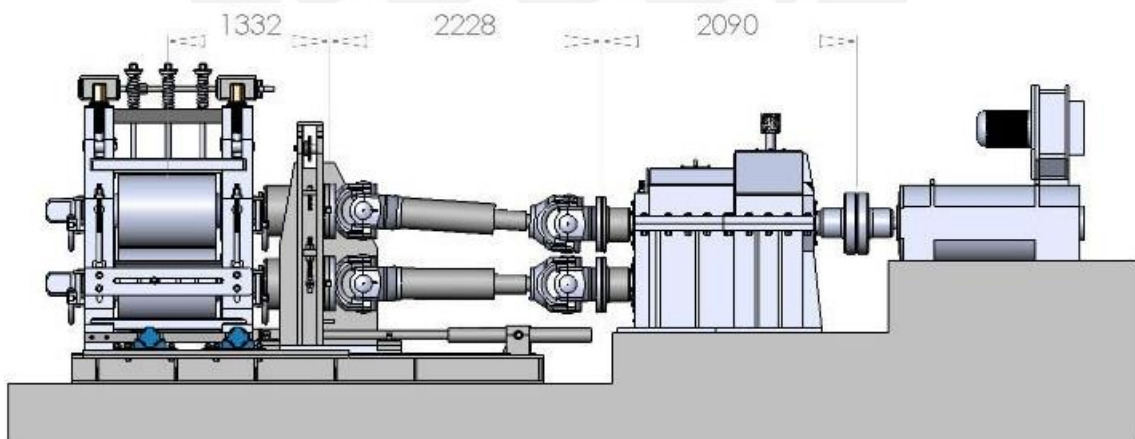


Ilustración 27: Imagen de una caseta con reductor, cardanes y motor. Fuente (TIG Ltd. Sti, s.f.)

Para mantener el flujo de masa, conforme se reduce la sección de la barra se incrementa la velocidad lineal de la misma. Por este motivo el tren cuenta con sistemas

de control electrónico con variadores de velocidad y con formadores de bucles en el tren acabador para controlar las tensiones entre las casetas.



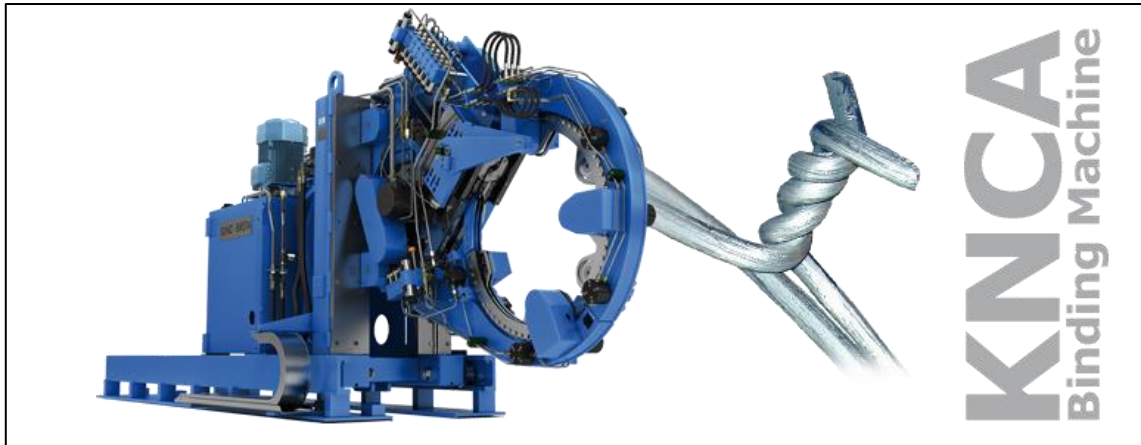
*Ilustración 28: Tren de laminación Continuo de la planta de Pisco de la Corporación Aceros Arequipa. Fuente: (C.A.A.S.A., 2016)*

### **3.3.3. Acabados**

En el área de acabados se da las características finales al producto: Longitud, cantidad de barras, atado y etiquetado con el peso apropiado. Para eso cuenta con una cizalla (Ilustración 29), un contador manual o automático, un conjunto de atadoras (Ilustración 30) y una balanza.



*Ilustración 29: Cizalla de corte de un tren de laminación fabricada por la marca italiana NCO Fuente (NCO SRL., s.f.)*



*Ilustración 30: Atadora automática de paquetes de barras, hecha por el fabricante Sund-Birsta. Fuente (Sund Birsta AB, s.f.)*



## CAPÍTULO 4. DIAGNÓSTICO DE LA EMPRESA

### 4.1. Diagnóstico a nivel macro

La industria siderúrgica es considerada como un motor de desarrollo e indicador de progreso en las sociedades alrededor del mundo (Alacero, 2019) debido a dos características básicas: Primero porque el consumo de acero es un claro indicador del desarrollo económico y de crecimiento de la infraestructura de un país, y segundo por la elevada capacidad de las empresas siderúrgicas para generar gran cantidad de empleos, fomentar el desarrollo tecnológico e impulsar el crecimiento de las comunidades cercanas. Por este motivo las mejoras del sector, avances tecnológicos y tendencias tienen una repercusión a nivel mundial.

Dado que la industria siderúrgica tiene una relación estrecha con el desarrollo y la infraestructura, es uno de los primeros sectores productivos que se ve afectado cuando se presentan fluctuaciones en el crecimiento económico de los países.

Con la globalización y la reducción de brechas arancelarias entre los países gracias a los TLC, la industria siderúrgica debe competir a nivel mundial. Esta competencia ha originado el cierre de muchas fábricas a nivel mundial cuyos costos no eran competitivos (Faraco, 2018). Este caso de cierre de fábricas se ha visto agravado con la evidencia de prácticas desleales de comercio (Dumping) realizadas por países como China.

En Latinoamérica, la Asociación Latinoamericana del Acero (Alacero) ha denunciado la competencia desleal de China, y diversos medios han publicado que solo el 2015 la importación de acero de China incrementó en 75% (Justo, 2015), por lo cual muchas empresas del mundo han exigido a sus gobiernos la aplicación de medidas y sanciones a esta competencia desleal (Alacero, 2018).

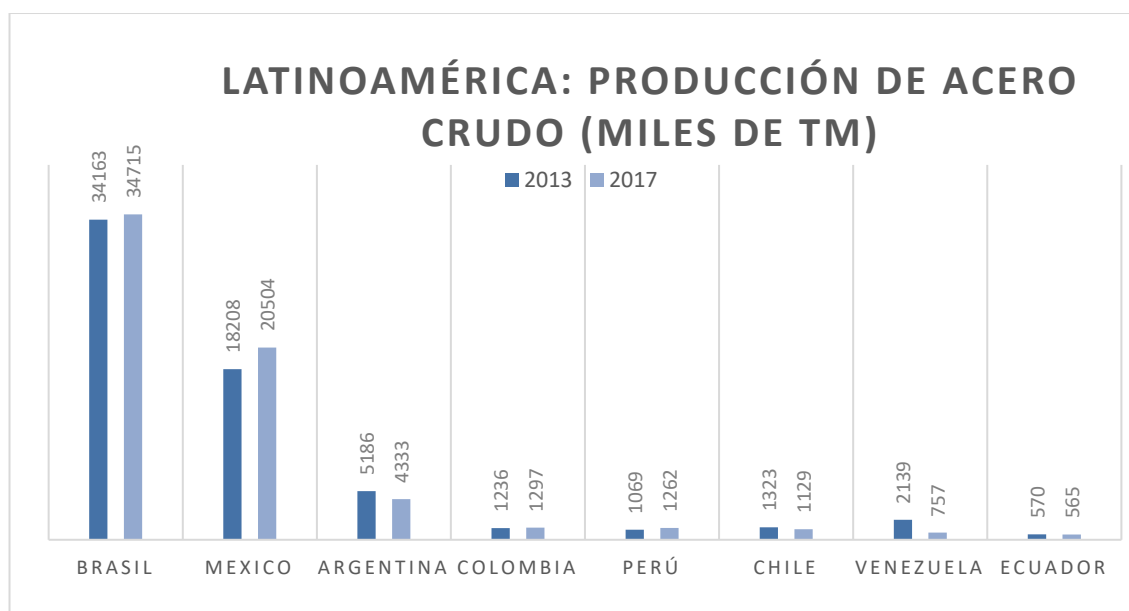


Ilustración 31: Comparación de la producción de acero crudo en Latinoamérica entre el 2013 y el 2017. Fuente: Memoria de empresas de Alacero (MINCETUR, 2018)

El Perú no es ajeno a esta coyuntura global y el 2016 la Corporación Aceros Arequipa se vio obligada a cerrar su primera planta en la ciudad de Arequipa, e indicaron que el motivo principal era la competencia por los productos importados a precio de Dumping (Gestión, 2016).

Es definitivo entonces, que la supervivencia de las empresas siderúrgicas depende de su capacidad de optimizar sus procesos, reducir costos y hacerse más competitivos.

## 4.2. Diagnóstico a nivel micro

El Perú es el quinto productor de acero crudo de Latinoamérica, y su industria está conformada por dos empresas (Corporación Aceros Arequipa S.A. y Siderperú), quienes facturan más de 1,100 millones de dólares anuales. El mercado nacional con productos largos (barras de construcción, barras lisas y perfiles) y productos planos (bobinas, planchas, tubos y calaminas) está cubierto por producción nacional más las importaciones. Se estima que, en 2017, la producción de la industria nacional ascendió a 1 684 TM (incluye acero crudo 1 262 TM), de los cuales, el 88% fue orientado al mercado interno y el 12% restante al mercado externo (US\$ 129 millones) (MINCETUR, 2018).

Las empresas nacionales tienen una fuerte competencia por la importación de productos largos. Aproximadamente el 32% de la venta de productos laminados largos proviene de importaciones y el 68% es producción nacional. Por este motivo, la industria nacional busca reducir sus costos implementando tecnologías que les permitan dejar de importar palanquilla: La construcción de un nuevo tren laminador en Pisco que costó US \$145 millones y la aprobación de US \$180 millones para la construcción de un nuevo horno eléctrico (MINCETUR, 2018).

Asimismo, la siderúrgica local ha denunciado la presencia de “competencia desleal” por prácticas de dumping en los productos provenientes de China. Tal como se mencionó anteriormente, esto motivó el 2016 al cierre de una planta de laminación en Arequipa (Gestión, 2016).

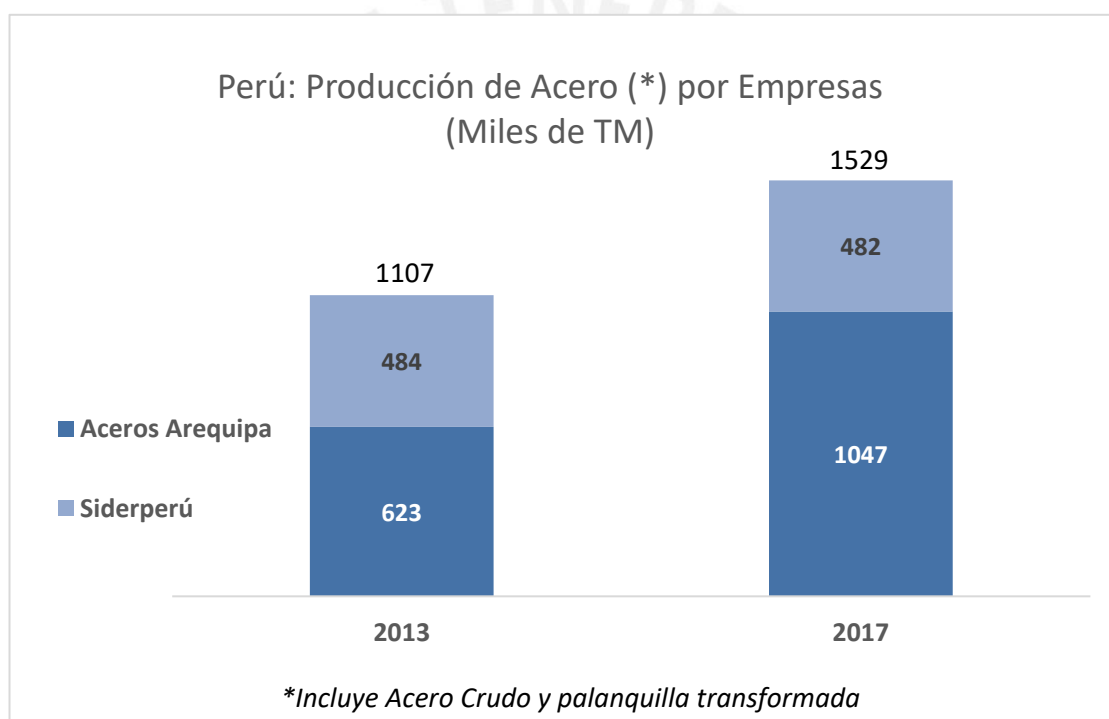


Ilustración 32: Producción de Acero por las empresas nacionales. Fuente: Sunat y (MINCETUR, 2018)

INDECOPI, por su parte, publicó el 2017 que los principales indicadores de la industria nacional siderúrgica han tenido una evolución desfavorable y que hay evidencias suficientes para sospechar que México y Brasil están realizando prácticas de Dumping en sus exportaciones hacia Perú, por lo que publicó la resolución 213-2017/CDB-INDECOPI, donde declara el inicio de investigaciones al respecto (INDECOPI, 2017).

### 4.3. Diagnóstico a nivel Empresa

El diagnóstico se va a enfocar en la planta de laminación, que es donde se transforma las planchillas en barras largas laminadas.

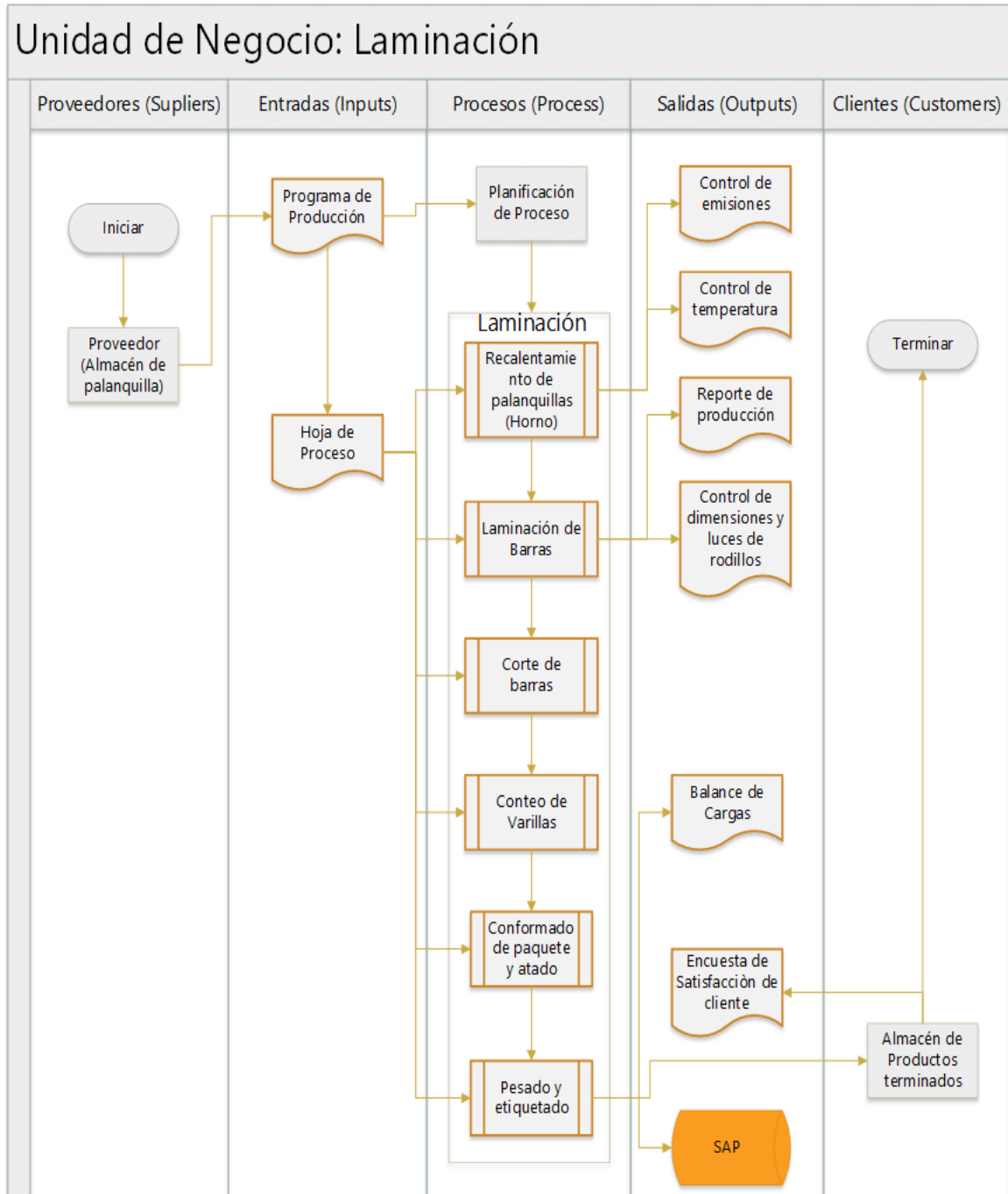


Ilustración 33: Diagrama SIPOC del proceso. Elaboración Propia

El proceso de laminación, tal como se ha expuesto dentro del marco teórico, consiste en la deformación de la barra en caliente, con una temperatura mayor a 900°C. Es por este motivo que no existe forma de tener stock en proceso entre las etapas. Sin embargo, se cuenta con buffers propios del proceso (cadenas, camino de rodillos, mesa de enfriamiento) que pueden servir para nivelar ritmos entre dos procesos distintos, pero no se pueden considerar stock en proceso debido a que contienen muy poco stock.



Ilustración 34: Layout del tren de laminación. Fuente: La empresa

Con el fin de identificar las oportunidades de mejora en el proceso de laminación, se hizo un diagrama VSM (véase la Ilustración 35). En el VSM se identificó que no existe inventario entre las etapas de laminación, principalmente porque la barra se lamina en caliente y no se puede tener inventario en proceso debido a que la barra pierde temperatura. Sin embargo, se evidencia que se tiene elevados tiempos de cambio en las zonas del tren (desbaste, intermedio y acabador), y se tiene un elevado inventario antes de despacharse al cliente (900 horas), lo cual se debe a que con el tiempo de cambio actual no se puede producir menor cantidad sin afectar considerablemente el costo unitario.

Para hacer un análisis más profundo de los hallazgos del VSM, se hizo un diagrama 5 por qué, para determinar las causas raíz y definir acciones correctivas apropiadas.

# VSM DE TREN DE LAMINACIÓN

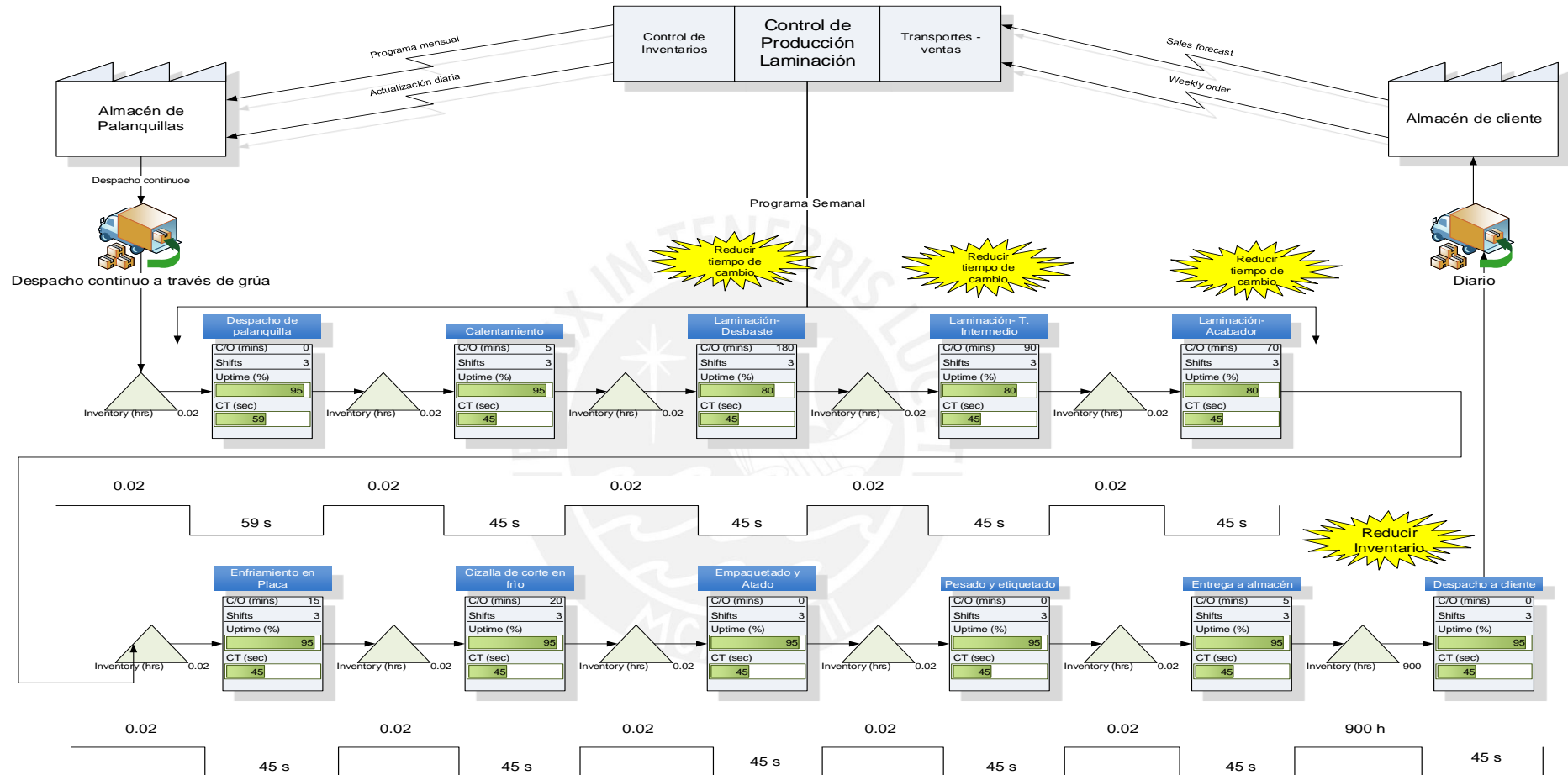


Ilustración 35: Diagrama VSM de un tren de laminación. Elaboración Propia

## 5 por qué

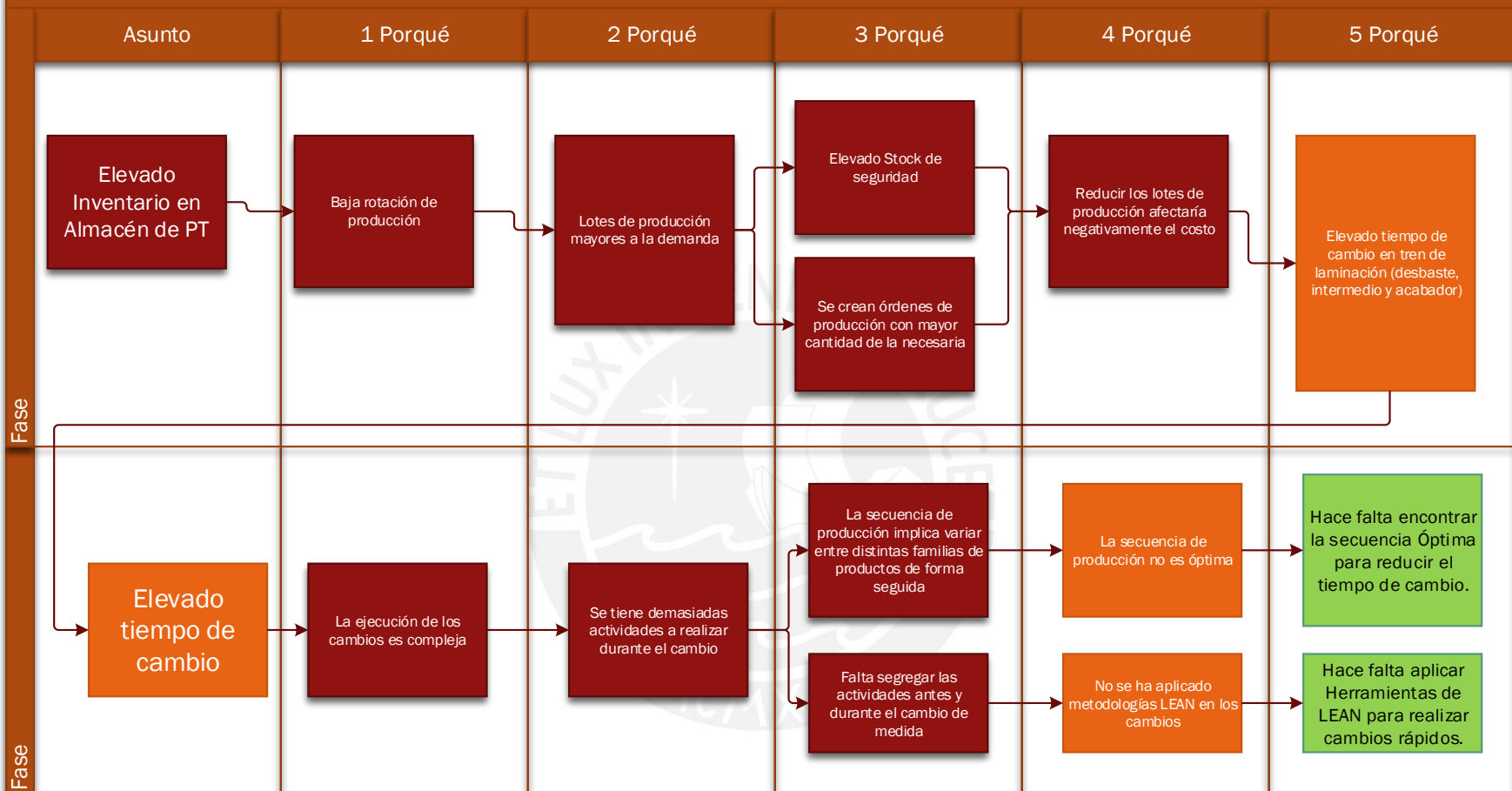


Ilustración 36: "Diagrama 5 por qué" de las oportunidades de mejora. Elaboración Propia

# CAPÍTULO 5. DESARROLLO DE PROPUESTAS DE MEJORA

Las propuestas de mejora se realizan según los resultados del diagnóstico realizado. Como Causa raíz se identificó 02 aspectos:

- Hace falta encontrar la secuencia Óptima para reducir el tiempo de cambio.
- Hace falta aplicar Herramientas de LEAN para realizar cambios rápidos.

Las propuestas de mejora están enfocadas en una primera instancia en aplicar modelos de optimización con el fin de encontrar la secuencia óptima de producción, con el fin de reducir los tiempos de cambio en el intervalo de tiempo que se haya evaluado.

En segundo lugar, se hará la propuesta de aplicación de herramientas Lean con el fin de realizar una ejecución más rápida de los tiempos de cambio de medida.

## 5.1. Aplicación de modelos de optimización

Para aplicar modelos de optimización al caso del tren de laminación se requiere minimizar el costo de los cambios de medida, considerando que los cambios son dependientes de la secuencia.

### 5.1.1. Objetivo propuesto

El modelo de optimización debe definir la secuencia de producción tal que se minimice el tiempo de cambio de medida permutando entre las secuencias posibles de productos. Para ello se ha realizado una base de datos referencial entre los productos que se laminan en un tren de laminación polifuncional, tal como los trenes de NUCOR -Utah o el tren de Aceros Arequipa – Pisco, que realizan varias familias de productos. En la Tabla 7 se aprecia una matriz de tiempos de cambios de medida entre 21 productos enumerados y ordenados por familia. El modelo presentado debería indicar la secuencia óptima para producir estos 21 productos.

Tabla 7: Matriz de tiempo en minutos por cambiar de un producto a otro.

|            |    | ANGULOS |     |     |     | CANALES |     |     | REDONDOS |     |     | CORRUGADOS |     |     | PLATINAS |     |     |     | ALAMBRONES |    |    |    |
|------------|----|---------|-----|-----|-----|---------|-----|-----|----------|-----|-----|------------|-----|-----|----------|-----|-----|-----|------------|----|----|----|
|            |    | 1       | 2   | 3   | 4   | 5       | 6   | 7   | 8        | 9   | 10  | 11         | 12  | 13  | 14       | 15  | 16  | 17  | 18         | 19 | 20 | 21 |
| ANGULOS    | 1  |         | 69  | 57  | 52  | 62      | 197 | 169 | 157      | 98  | 76  | 81         | 90  | 88  | 76       | 81  | 96  | 82  | 93         | 87 | 85 | 87 |
|            | 2  | 69      |     | 83  | 78  | 50      | 170 | 210 | 197      | 103 | 79  | 81         | 90  | 77  | 89       | 105 | 116 | 90  | 95         | 90 | 80 | 80 |
|            | 3  | 57      | 83  |     | 68  | 81      | 226 | 171 | 195      | 118 | 85  | 90         | 85  | 83  | 90       | 117 | 80  | 106 | 114        | 77 | 87 | 86 |
|            | 4  | 52      | 78  | 68  |     | 84      | 210 | 188 | 225      | 96  | 78  | 79         | 90  | 83  | 85       | 100 | 82  | 88  | 91         | 84 | 81 | 78 |
|            | 5  | 62      | 50  | 81  | 84  |         | 150 | 226 | 160      | 106 | 84  | 82         | 90  | 78  | 76       | 101 | 95  | 95  | 100        | 75 | 82 | 81 |
| CANALES    | 6  | 197     | 170 | 226 | 210 | 150     |     | 118 | 102      | 97  | 86  | 76         | 81  | 88  | 84       | 107 | 109 | 100 | 85         | 90 | 81 | 80 |
|            | 7  | 169     | 210 | 171 | 188 | 226     | 118 |     | 89       | 115 | 84  | 89         | 85  | 79  | 84       | 115 | 110 | 92  | 102        | 85 | 87 | 76 |
|            | 8  | 157     | 197 | 195 | 225 | 160     | 102 | 89  |          | 115 | 87  | 87         | 90  | 78  | 82       | 108 | 117 | 112 | 108        | 75 | 77 | 80 |
| REDONDOS   | 9  | 98      | 103 | 118 | 96  | 106     | 97  | 115 | 115      |     | 82  | 83         | 81  | 78  | 82       | 94  | 86  | 112 | 82         | 80 | 87 | 78 |
|            | 10 | 76      | 79  | 85  | 78  | 84      | 86  | 84  | 87       | 82  |     | 76         | 78  | 79  | 76       | 115 | 81  | 106 | 83         | 84 | 87 | 90 |
|            | 11 | 81      | 81  | 90  | 79  | 82      | 76  | 89  | 87       | 83  | 76  |            | 79  | 88  | 80       | 102 | 86  | 116 | 110        | 88 | 79 | 88 |
| CORRUGADOS | 12 | 90      | 90  | 85  | 90  | 90      | 81  | 85  | 90       | 81  | 78  | 79         |     | 76  | 84       | 99  | 117 | 84  | 86         | 81 | 84 | 86 |
|            | 13 | 88      | 77  | 83  | 83  | 78      | 88  | 79  | 78       | 78  | 79  | 88         | 76  |     | 83       | 85  | 80  | 119 | 84         | 75 | 77 | 90 |
|            | 14 | 76      | 89  | 90  | 85  | 76      | 84  | 84  | 82       | 82  | 76  | 80         | 84  | 83  |          | 82  | 106 | 80  | 114        | 78 | 85 | 79 |
| PLATINAS   | 15 | 81      | 105 | 117 | 100 | 101     | 107 | 115 | 108      | 94  | 115 | 102        | 99  | 85  | 82       |     | 75  | 76  | 77         | 90 | 79 | 88 |
|            | 16 | 96      | 116 | 80  | 82  | 95      | 109 | 110 | 117      | 86  | 81  | 86         | 117 | 80  | 106      | 75  |     | 75  | 90         | 82 | 76 | 79 |
|            | 17 | 82      | 90  | 106 | 88  | 95      | 100 | 92  | 112      | 112 | 106 | 116        | 84  | 119 | 80       | 76  | 75  |     | 81         | 79 | 85 | 80 |
|            | 18 | 93      | 95  | 114 | 91  | 100     | 85  | 102 | 108      | 82  | 83  | 110        | 86  | 84  | 114      | 77  | 90  | 81  |            | 78 | 76 | 75 |
| ALAMBRONES | 19 | 87      | 90  | 77  | 84  | 75      | 90  | 85  | 75       | 80  | 84  | 88         | 81  | 75  | 78       | 90  | 82  | 79  | 78         |    | 35 | 30 |
|            | 20 | 85      | 80  | 87  | 81  | 82      | 81  | 87  | 77       | 87  | 87  | 79         | 84  | 77  | 85       | 79  | 76  | 85  | 76         | 35 |    | 36 |
|            | 21 | 87      | 80  | 86  | 78  | 81      | 80  | 76  | 80       | 78  | 90  | 88         | 86  | 90  | 79       | 88  | 79  | 80  | 75         | 30 | 36 |    |

Elaboración propia

### 5.1.2. Modelo Matemático

Para esto se ha mencionado en el marco de la presente tesis que el modelo más apropiado es el TSP, que bajo un modelo de programación entera se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{array}{ll} \text{F.O.} & \text{Minimizar :} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} & \end{array} \quad (51)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad (52)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, n, \quad (53)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (54)$$

$$(n-1)x_{ij} + u_i - u_j \leq (n-2), \quad i, j = 2, 3, \dots, n \quad (55)$$

Nótese que se agregó la restricción MTZ (55) que garantiza que no haya sub rutas dentro del modelo.

### 5.1.3. Modelo de Programación en AMPL

Para poder ejecutar el modelo, se utiliza el lenguaje de programación AMPL con el motor de optimización CPLEX, por motivo que cuenta con una mayor capacidad de procesamiento para este tipo de problemas.

La programación del modelo propuesto es la siguiente:

```

#Número de productos para realizar:

param N integer > 2;                                #Parametro del número de
productos

#Sets
set Productos ordered := {1..N};
#Productos que se puede producir
set Cambios := {i in Productos, j in Productos: i <> j}; #combinaciones de
productos para de Cambios de medida

#Parametros
param C {(i,j) in Cambios};                          #Parámetro de C, que
representa el costo de cada combinación (cambio)

#Variables
var x {(i,j) in Cambios} binary;                    #Variable X es 1 o 0
dependiendo si se usara o no la combinación de sus subíndices
var u {Productos} >= 0;                              #Variable u,
representa el número de productos (ciudades) visitadas antes del subíndice i

*****
#Función objetivo *
*****
#Minimizar la sumatoria de los costos de cambios. es la función objetivo del
TSP
minimize Turlength: sum {(i,j) in Cambios} C[i,j]*x[i,j];

*****
# Restricciones *
*****
#Se ingresa una sola vez a cada producto (ciudad) (TSP)
subject to Regla1 {i in Productos}: sum{(i,j) in Cambios} x[i,j]=1;
#Se sale una sola vez de cada producto (ciudad) (TSP)
subject to Regla2 {i in Productos}: sum{(j,i) in Cambios} x[j,i]=1;

#Restricción MTZ Miller-Tucker-Zemlin para evitar subtours en el TSP
subject to NoSubtour {(i,j) in Cambios: i<>j and i>=2 and j>=2}:
u[i] - u[j] + N*x[i,j]-x[i,j]+1 <= N - 1;

```

#### 5.1.4. Parámetros del modelo

El parámetro principal del modelo es la matriz de tiempos de cambio entre los productos, que representan los costos de cambio que se deben optimizar.

Para ingresar la matriz se debe tener en cuenta una particularidad, y es que en el modelo TSP el viajante debe regresar al punto de partida, pero en el caso propuesto, al cierre del periodo optimizado, el nuevo periodo iniciará con otro producto que no necesariamente sea el mismo con el que se inició. Por ejemplo, si se tiene una

programación mensual, entre un mes y otro se pueden variar todos los productos a laminar. Por este motivo se debe excluir del programa el costo de regresar a laminar el primer producto de la secuencia, para esto se indica que el costo de regresar al producto 1 es cero. De tal manera que el modelo excluirá esa condición.

Para poder expresarlo se hace una nueva tabla considerando el cero como el costo de regresar al primer producto en la Tabla 8.

|    | 12   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19 | 20 | 21:= |
|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|
| 1  | .69  | 57  | 52  | 62  | 197 | 169 | 157 | 98  | 76  | 81  | 90  | 88  | 76  | 81  | 96  | 82  | 93  | 87 | 85 | 87   |
| 2  | 0.   | 83  | 78  | 50  | 170 | 210 | 197 | 103 | 79  | 81  | 90  | 77  | 89  | 105 | 116 | 90  | 95  | 90 | 80 | 80   |
| 3  | 083  | .   | 68  | 81  | 226 | 171 | 195 | 118 | 85  | 90  | 85  | 83  | 90  | 117 | 80  | 106 | 114 | 77 | 87 | 86   |
| 4  | 078  | 68  | .   | 84  | 210 | 188 | 225 | 96  | 78  | 79  | 90  | 83  | 85  | 100 | 82  | 88  | 91  | 84 | 81 | 78   |
| 5  | 050  | 81  | 84  | .   | 150 | 226 | 160 | 106 | 84  | 82  | 90  | 78  | 76  | 101 | 95  | 95  | 100 | 75 | 82 | 81   |
| 6  | 0170 | 226 | 210 | 150 | .   | 118 | 102 | 97  | 86  | 76  | 81  | 88  | 84  | 107 | 109 | 100 | 85  | 90 | 81 | 80   |
| 7  | 0210 | 171 | 188 | 226 | 118 | .   | 89  | 115 | 84  | 89  | 85  | 79  | 84  | 115 | 110 | 92  | 102 | 85 | 87 | 76   |
| 8  | 0197 | 195 | 225 | 160 | 102 | 89  | .   | 115 | 87  | 87  | 90  | 78  | 82  | 108 | 117 | 112 | 108 | 75 | 77 | 80   |
| 9  | 0103 | 118 | 96  | 106 | 97  | 115 | 115 | .   | 82  | 83  | 81  | 78  | 82  | 94  | 86  | 112 | 82  | 80 | 87 | 78   |
| 10 | 079  | 85  | 78  | 84  | 86  | 84  | 87  | 82  | .   | 76  | 78  | 79  | 76  | 115 | 81  | 106 | 83  | 84 | 87 | 90   |
| 11 | 081  | 90  | 79  | 82  | 76  | 89  | 87  | 83  | 76  | .   | 79  | 88  | 80  | 102 | 86  | 116 | 110 | 88 | 79 | 88   |
| 12 | 090  | 85  | 90  | 90  | 81  | 85  | 90  | 81  | 78  | 79  | .   | 76  | 84  | 99  | 117 | 84  | 86  | 81 | 84 | 86   |
| 13 | 077  | 83  | 83  | 78  | 88  | 79  | 78  | 78  | 79  | 88  | 76  | .   | 83  | 85  | 80  | 119 | 84  | 75 | 77 | 90   |
| 14 | 089  | 90  | 85  | 76  | 84  | 84  | 82  | 82  | 76  | 80  | 84  | 83  | .   | 82  | 106 | 80  | 114 | 78 | 85 | 79   |
| 15 | 0105 | 117 | 100 | 101 | 107 | 115 | 108 | 94  | 115 | 102 | 99  | 85  | 82  | .   | 75  | 76  | 77  | 90 | 79 | 88   |
| 16 | 0116 | 80  | 82  | 95  | 109 | 110 | 117 | 86  | 81  | 86  | 117 | 80  | 106 | 75  | .   | 75  | 90  | 82 | 76 | 79   |
| 17 | 090  | 106 | 88  | 95  | 100 | 92  | 112 | 112 | 106 | 116 | 84  | 119 | 80  | 76  | 75  | .   | 81  | 79 | 85 | 80   |
| 18 | 095  | 114 | 91  | 100 | 85  | 102 | 108 | 82  | 83  | 110 | 86  | 84  | 114 | 77  | 90  | 81  | .   | 78 | 76 | 75   |
| 19 | 090  | 77  | 84  | 75  | 90  | 85  | 75  | 80  | 84  | 88  | 81  | 75  | 78  | 90  | 82  | 79  | 78  | .  | 35 | 30   |
| 20 | 080  | 87  | 81  | 82  | 81  | 87  | 77  | 87  | 87  | 79  | 84  | 77  | 85  | 79  | 76  | 85  | 76  | 35 | .  | 36   |
| 21 | 080  | 86  | 78  | 81  | 80  | 76  | 80  | 78  | 90  | 88  | 86  | 90  | 79  | 88  | 79  | 80  | 75  | 30 | 36 | .;   |

Tabla 8: Parámetros a ingresar en AMPL

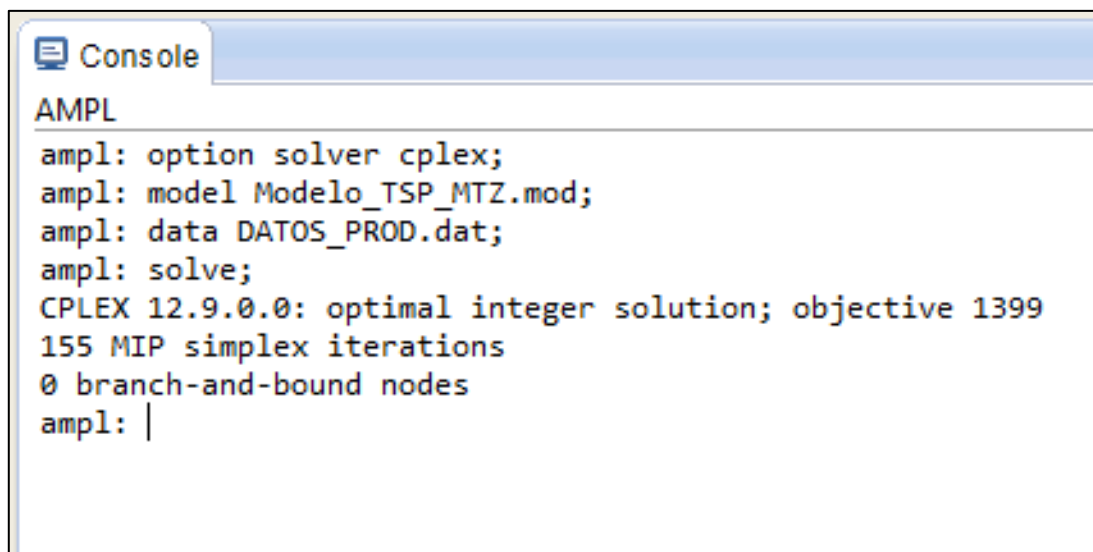
|    | 1 | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19 | 20 | 21 |
|----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
| 1  |   | 69  | 57  | 52  | 62  | 197 | 169 | 157 | 98  | 76  | 81  | 90  | 88  | 76  | 81  | 96  | 82  | 93  | 87 | 85 | 87 |
| 2  | 0 |     | 83  | 78  | 50  | 170 | 210 | 197 | 103 | 79  | 81  | 90  | 77  | 89  | 105 | 116 | 90  | 95  | 90 | 80 | 80 |
| 3  | 0 | 83  |     | 68  | 81  | 226 | 171 | 195 | 118 | 85  | 90  | 85  | 83  | 90  | 117 | 80  | 106 | 114 | 77 | 87 | 86 |
| 4  | 0 | 78  | 68  |     | 84  | 210 | 188 | 225 | 96  | 78  | 79  | 90  | 83  | 85  | 100 | 82  | 88  | 91  | 84 | 81 | 78 |
| 5  | 0 | 50  | 81  | 84  |     | 150 | 226 | 160 | 106 | 84  | 82  | 90  | 78  | 76  | 101 | 95  | 95  | 100 | 75 | 82 | 81 |
| 6  | 0 | 170 | 226 | 210 | 150 |     | 118 | 102 | 97  | 86  | 76  | 81  | 88  | 84  | 107 | 109 | 100 | 85  | 90 | 81 | 80 |
| 7  | 0 | 210 | 171 | 188 | 226 | 118 |     | 89  | 115 | 84  | 89  | 85  | 79  | 84  | 115 | 110 | 92  | 102 | 85 | 87 | 76 |
| 8  | 0 | 197 | 195 | 225 | 160 | 102 | 89  |     | 115 | 87  | 87  | 90  | 78  | 82  | 108 | 117 | 112 | 108 | 75 | 77 | 80 |
| 9  | 0 | 103 | 118 | 96  | 106 | 97  | 115 | 115 |     | 82  | 83  | 81  | 78  | 82  | 94  | 86  | 112 | 82  | 80 | 87 | 78 |
| 10 | 0 | 79  | 85  | 78  | 84  | 86  | 84  | 87  | 82  |     | 76  | 78  | 79  | 76  | 115 | 81  | 106 | 83  | 84 | 87 | 90 |
| 11 | 0 | 81  | 90  | 79  | 82  | 76  | 89  | 87  | 83  | 76  |     | 79  | 88  | 80  | 102 | 86  | 116 | 110 | 88 | 79 | 88 |
| 12 | 0 | 90  | 85  | 90  | 90  | 81  | 85  | 90  | 81  | 78  | 79  |     | 76  | 84  | 99  | 117 | 84  | 86  | 81 | 84 | 86 |
| 13 | 0 | 77  | 83  | 83  | 78  | 88  | 79  | 78  | 78  | 79  | 88  | 76  |     | 83  | 85  | 80  | 119 | 84  | 75 | 77 | 90 |
| 14 | 0 | 89  | 90  | 85  | 76  | 84  | 84  | 82  | 82  | 76  | 80  | 84  | 83  |     | 82  | 106 | 80  | 114 | 78 | 85 | 79 |
| 15 | 0 | 105 | 117 | 100 | 101 | 107 | 115 | 108 | 94  | 115 | 102 | 99  | 85  | 82  |     | 75  | 76  | 77  | 90 | 79 | 88 |
| 16 | 0 | 116 | 80  | 82  | 95  | 109 | 110 | 117 | 86  | 81  | 86  | 117 | 80  | 106 | 75  |     | 75  | 90  | 82 | 76 | 79 |
| 17 | 0 | 90  | 106 | 88  | 95  | 100 | 92  | 112 | 112 | 106 | 116 | 84  | 119 | 80  | 76  | 75  |     | 81  | 79 | 85 | 80 |
| 18 | 0 | 95  | 114 | 91  | 100 | 85  | 102 | 108 | 82  | 83  | 110 | 86  | 84  | 114 | 77  | 90  | 81  |     | 78 | 76 | 75 |
| 19 | 0 | 90  | 77  | 84  | 75  | 90  | 85  | 75  | 80  | 84  | 88  | 81  | 75  | 78  | 90  | 82  | 79  | 78  |    | 35 | 30 |
| 20 | 0 | 80  | 87  | 81  | 82  | 81  | 87  | 77  | 87  | 87  | 79  | 84  | 77  | 85  | 79  | 76  | 85  | 76  | 35 |    | 36 |
| 21 | 0 | 80  | 86  | 78  | 81  | 80  | 76  | 80  | 78  | 90  | 88  | 86  | 90  | 79  | 88  | 79  | 80  | 75  | 30 | 36 |    |

Elaboración Propia

### 5.1.5. Ejecución del modelo

Se hizo la corrida con el Software AMPL usando el solver CPLEX ingresando la siguiente información en la consola y se obtuvo como resultado 1399 iteraciones en total (véase la Ilustración 37).

```
ampl: option solver cplex;  
ampl: model Modelo_TSP_MTZ.mod;  
ampl: data DATOS_PROD.dat;  
ampl: solve;
```



```
Console  
AMPL  
ampl: option solver cplex;  
ampl: model Modelo_TSP_MTZ.mod;  
ampl: data DATOS_PROD.dat;  
ampl: solve;  
CPLEX 12.9.0.0: optimal integer solution; objective 1399  
155 MIP simplex iterations  
0 branch-and-bound nodes  
ampl: |
```

*Ilustración 37: Consola del programa AMPL durante la ejecución del modelo.  
Elaboración Propia*

Para poder conocer el orden de los productos con los que se puede obtener el resultado indicado, se utiliza la variable  $x$  del modelo, que es la que indica qué combinación se va a considerar (véase la Ilustración 38) o también de la variable  $u$ , que indica el número de orden de cada producto (véase la Ilustración 39).

La secuencia obtenida es:

|   |   |   |    |    |    |    |   |    |   |    |    |    |   |   |    |   |    |    |    |   |
|---|---|---|----|----|----|----|---|----|---|----|----|----|---|---|----|---|----|----|----|---|
| 1 | 4 | 3 | 16 | 17 | 15 | 18 | 9 | 12 | 6 | 11 | 10 | 14 | 5 | 2 | 13 | 8 | 20 | 19 | 21 | 7 |
|---|---|---|----|----|----|----|---|----|---|----|----|----|---|---|----|---|----|----|----|---|

```

Console
AMPL
ampl: display x;
x [*,*]
:   1  2  3  4  5  6  7  8  9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 :=
1   .  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
2   0  .  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0
3   0  0  .  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0
4   0  0  0  1  .  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
5   0  1  0  0  .  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
6   0  0  0  0  0  .  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0
7   1  0  0  0  0  0  .  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
8   0  0  0  0  0  0  0  .  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
9   0  0  0  0  0  0  0  0  .  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0
10  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  0  0  0  1  0  0  0  0  0
11  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  .  0  0  0  0  0  0  0
12  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  .  0  0  0  0  0  0  0
13  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  .  0  0  0  0  0  0  0
14  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  .  0  0  0  0  0  0
15  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  0  0  1  0  0
16  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  1  0  0  0
17  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1  .  0  0  0
18  0  0  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  .  0  0
19  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  .  0
20  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  1
21  0  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0

:   20 21   :=
1   0  0
2   0  0
3   0  0
4   0  0
5   0  0
6   0  0
7   0  0
8   1  0
9   0  0
10  0  0
11  0  0
12  0  0
13  0  0
14  0  0
15  0  0
16  0  0
17  0  0
18  0  0
19  0  1
20  .  0
21  0  .
;

```

Ilustración 38: Consola del AMPL mostrando los valores de x como resultado del modelo de optimización. Elaboración Propia

```

Console
AMPL
ampl: display u;
u [*] :=
 1  0    4  0    7 19    10 10    13 14    16  2    19 17
 2 13    5 12    8 15    11  9    14 11    17  3    20 16
 3  1    6  8    9  6    12  7    15  4    18  5    21 18
;
ampl: |

```

Ilustración 39: Valor de las variables  $u$ , que indica la posición de cada producto.  
Elaboración Propia

## 5.2. Metodología SMED

La aplicación de la metodología SMED es necesaria para reducir los tiempos de ejecución de los cambios de formato. Si bien se puede reducir la magnitud del cambio con un programa óptimo de la secuencia, existen contingencias como pedidos urgentes de clientes, o caídas de stock mínimo imprevistas que generan alteraciones en el programa de producción y no permiten el cumplimiento del programa óptimo. Asimismo, aún con la secuencia más óptima, se puede reducir los tiempos de cambio con la correcta aplicación de la metodología.

### 5.2.1. Cambio de medida

El cambio de medida está compuesto por varias etapas.

#### a. Traslado de casetas a zona de trabajo.

En la Ilustración 40 se aprecia el movimiento que se debe hacer con la grúa de las casetas, si en un cambio promedio se debe cambiar 6 casetas, se debe realizar 6 veces.

#### b. Remoción de las casetas.

Las casetas que se van a retirar deben desbloquearse, desacoplarse y retirarse del stand.

**c. Instalación de nuevas casetas.**

Las nuevas casetas deben instalarse en la ubicación que se requiere según el proceso a realizar. Este proceso implica encajar en el marco, acoplar los cardanes (superior e inferior) y ajustar los 4 pernos de fijación.

**d. Alineamiento y verificación de las guías en el canal.**

Se debe alinear y verificar que las guías se encuentren apropiadamente ajustadas y en el canal correspondiente. En el caso que las guías no estén en la caseta, deben colocarse.

**e. Calibración de las luces en las casetas.**

En el caso de las casetas de desbaste y tren intermedio se utiliza un compás y un calibrador para medir la luz entre los rodillos, de tal manera que se garantice que el producto laminado tenga las medidas apropiadas al salir de ese par de rodillos. En el caso de las casetas del tren acabador se hace pasar una barra caliente a través de los rodillos y se mide para ver las medidas finales que tendrá el producto.

**f. Alinear las casetas con el eje de laminación**

Una vez que todas las casetas se han calibrado, se deben alinear con el eje de laminación. Para esto se hace uso de un tablero local a través del cual se desplaza axialmente la caseta con pistones hidráulicos.

**g. Colocar conos guías**

Se coloca los conos guías que garantizan que la barra ingrese a la guía de la caseta.

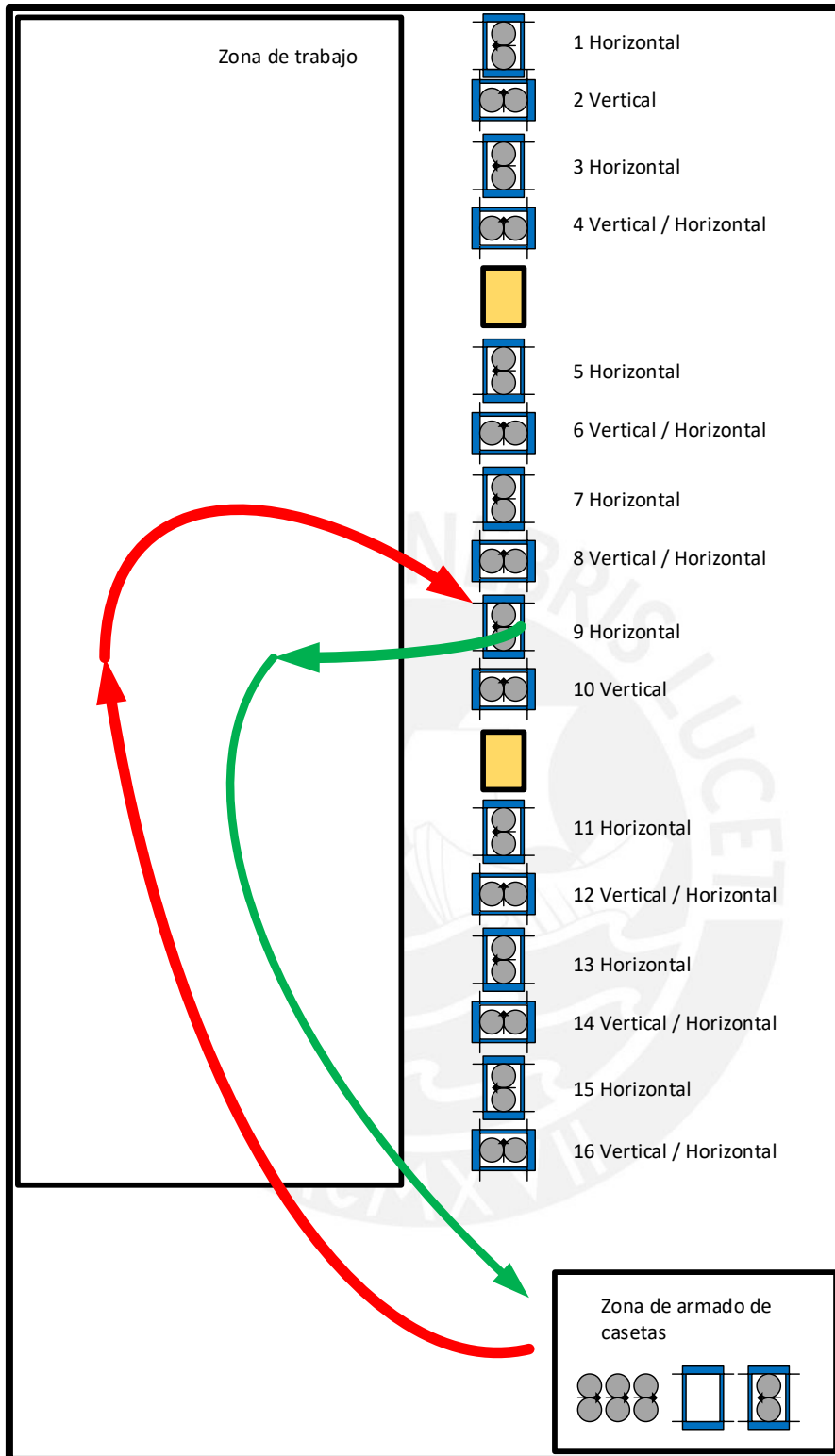


Ilustración 40: Layout de cambio de casetas durante el cambio de medida. Elaboración Propia.

## 5.2.2. Aplicación de la metodología

### a. Etapa Preliminar:

Para complementar esta etapa se debe complementar con video grabaciones, toma de tiempos.

### b. Etapa 1:

Este es el paso en el que se separan las actividades internas y externas:

**Tabla 9:** Separación entre actividades internas y externas

|   | Interna | externa |
|---|---------|---------|
| Armado de casetas                                     |         | X       |
| Colocar guías en las casetas                          |         | X       |
| Traslado de casetas a zona de trabajo.                | X       |         |
| Remoción de las casetas.                              | X       |         |
| Instalación de nuevas casetas.                        | X       |         |
| Alineamiento y verificación de las guías en el canal. | X       |         |
| Calibración de las luces en las casetas.              | X       |         |
| Alinear las casetas con el eje de laminación          | X       |         |
| Colocar conos guidores                                | X       |         |

*Elaboración propia*

### c. Etapa 2:

En esta etapa se convierte las actividades que hacen de manera interna y se han identificado como tal, en actividades externas.

**Tabla 10:** Aplicación de la etapa 2 de SMED

|   | Interna | externa |
|---|---------|---------|
| Armado de casetas                                     |         | X       |
| Colocar guías en las casetas                          |         | X       |
| Traslado de casetas a zona de trabajo.                | →       | X       |
| Remoción de las casetas.                              | X       |         |
| Instalación de nuevas casetas.                        | X       |         |
| Alineamiento y verificación de las guías en el canal. | →       | X       |
| Calibración de las luces en las casetas.              | X       |         |
| Alinear las casetas con el eje de laminación          | X       |         |
| Colocar conos guidores                                | X       |         |

*Elaboración propia*

**d. Etapa 3:**

En esta etapa se busca eliminar los desperdicios, generalmente utilizando KAIZEN.

Tabla 11: Oportunidades de mejora para la etapa 3 del SMED

|  | Interna | externa | Oportunidad de mejora  |
|--|---------|---------|--|
| <b>Armado de casetas</b>                                     |         | X       |  |
| <b>Colocar guías en las casetas</b>                          |         | X       |  |
| <b>Traslado de casetas a zona de trabajo.</b>                |         | X       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Definir ubicaciones específicas de las casetas de recambio para cada stand e identificarlas visualmente.</li> <li>Garantizar que todas las casetas estén trasladadas antes del cambio con un checklist.</li> </ul>      |
| <b>Remoción de las casetas.</b>                              | X       |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Evaluar cambiar los pernos de fijación por otro mecanismo que no requiera herramientas. Por ejemplo, bloqueos excéntricos con palanca y leva (véase la Ilustración 41).</li> </ul>                                      |
| <b>Instalación de nuevas casetas.</b>                        | X       |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>El cambio de pernos por bloqueos excéntricos también mejoraría este proceso.</li> </ul>   |
| <b>Alineamiento y verificación de las guías en el canal.</b> |         | X       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Estandarizar las medidas de calibración de las guías para hacerlo antes del cambio.</li> </ul>  |
| <b>Calibración de las luces en las casetas.</b>              | X       |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Implementar probetas de otro material para poder medir las luces fuera antes del cambio de medida.</li> </ul>   |
| <b>Alinear las casetas con el eje de laminación</b>          | X       |         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Automatizar el posicionamiento de las casetas con un encoder lineal y usando como parámetro la distancia del eje del canal con el borde del cilindro, de esta manera se podría alinear de manera automática.</li> </ul> |
| <b>Colocar conos guidores</b>                                | X       |         |  |

*Elaboración propia*

Cam Levers  
with bolt
18080

**Material**  
Heat-treated steel.  
Handle: plastic coated.

**Technical Notes**  
Cam lever for centre clamping.

| Order No.   | Type         | m   | h   | g  | <br>g |
|-------------|--------------|-----|-----|----|-------|
| 18080.W0001 | With Bolt    | M12 | 110 | 25 | 500   |
| 18080.W0002 | With Bolt    | M16 | 120 | 30 | 610   |
| 18080.W0100 | Without Bolt | -   | -   | -  | 310   |

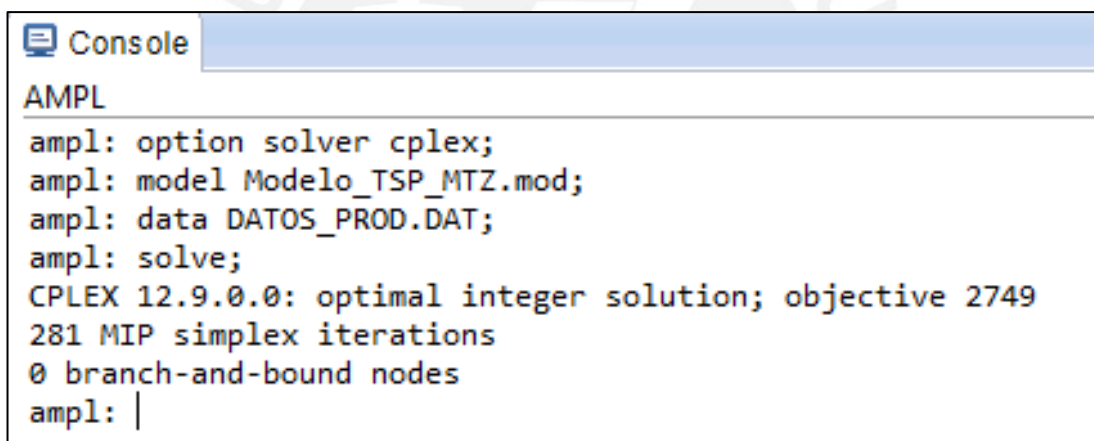
*Ilustración 41: Bloqueo con palanca y leva en reemplazo de sistemas de tuercas.  
Fuente: (Wixroyd International Ltd)*

## CAPÍTULO 6. IMPACTO ECONÓMICO

### 6.1. Proyección de impacto por secuencia óptima.

Para evaluar el impacto de la óptima secuenciación de los productos se cambió la función objetivo para obtener el máximo tiempo que podría demorar en cambios de medida en caso de tener el panorama más ineficiente, y se obtuvo 2749 minutos de cambio (véase Ilustración 42). En el resultado más eficiente se obtuvo 1399 (véase Ilustración 37). Por lo tanto, se tiene 1350 minutos de diferencia en el mes. Asumiendo que la programación manual no es la más ineficiente sino un punto intermedio, dividimos la diferencia entre dos, y se obtiene una diferencia tentativa de 675 minutos en un mes.

El costo por parada de planta en este tipo de plantas industriales es de aproximadamente 2000 dólares por hora, por lo que el modelo estaría generando un ahorro potencial de **22,500.00 USD** dólares mensuales.



```
Console
AMPL
ampl: option solver cplex;
ampl: model Modelo_TSP_MTZ.mod;
ampl: data DATOS_PROD.DAT;
ampl: solve;
CPLEX 12.9.0.0: optimal integer solution; objective 2749
281 MIP simplex iterations
0 branch-and-bound nodes
ampl: |
```

*Ilustración 42: Resultado en software AMPL después de cambiar la función objetivo a “maximizar”, para obtener el tiempo máximo de cambios de medida. Elaboración propia.*

## 6.2. Proyección de impacto por SMED

Los autores que han desarrollado la metodología SMED aseguran que durante el primer paso de la metodología se obtienen mejoras por lo menos del 30% del tiempo de cambio al separar las actividades internas de las externas. Incluso aseguran que el 30% en realidad es un dato conservador con el verdadero potencial de reducción de los tiempos.

Si se propone reducir el 30% del tiempo total de cambio, en el panorama más eficiente se tendría que los 1399 minutos de la secuencia óptima se reducirían a 980 minutos con un diferencial de 419 minutos, lo cual representa para una planta de laminación aproximadamente **14,000.00 USD** dólares de ahorro por disminución de los costos fijos del tiempo de parada de planta (considerando un costo de 2,000.00 USD por costo de hora de parada).

En una primera etapa no se considera montos de inversión pues las medidas a tomar para realizar los dos primeros pasos son administrativas, y las medidas de ingeniería se aplican en pasos posteriores y servirán para elevar aún más el potencial de ahorro.

## 6.3. Reducción de tamaños de lotes

La reducción de tiempos de cambios de formato tiene muchos aspectos positivos en la industria. Desde el punto de vista de disponibilidad de tiempo, la reducción del tiempo de cambio de medida implica una reducción de las horas totales que los recursos humanos y de maquinaria que se imputan a una orden de proceso específica, por lo que el costo total se ve reducido al tener menos horas asignadas a la orden, por lo que se le imputan menos costos fijos.

$$C_{fijo/unidad} = \frac{C_h * (T_c + T_p)}{n} \quad (56)$$

Elaboración propia basada en el análisis de Costo-volumen- utilidad (Horngren, Datar, & Rajan, 2012)

En la ecuación (56) se presenta un resumen de la ecuación de los costos fijos unitarios. Donde  $C_h$  es el costo por hora de producción,  $T_c$  es el tiempo de cambio para ingresar al producto,  $T_p$  es el tiempo de producción y  $n$  es el número de unidades fabricadas.

La contabilidad tradicional fomenta el incremento del número de unidades fabricadas ( $n$ ) con el fin de reducir los costos fijos, siguiendo el concepto de “economías de escala”. El SMED contradice esta iniciativa, pues el incremento de unidades producidas genera un incremento en los niveles de inventario, lo cual afecta la liquidez de la empresa, y también reduce flexibilidad.

Se ha evidenciado que hay empresas que intencionalmente reducen su cartera de productos con el fin de incrementar los lotes de producción, sin embargo, indirectamente afectan el nivel de satisfacción de los clientes al dejar de atender necesidades de productos más personalizados. Un ejemplo conocido son las marcas de autos que anteriormente fabricaban un único modelo con muy pocas variaciones (P. Ej. Modelo “bug” de Volkswagen), mientras que hoy en día una ventaja competitiva de las empresas exitosas es la diversificación de sus productos que son más adaptados a las necesidades de sectores de mercado cada vez más específicos y exigentes (Shingo, 1983).

Con una reducción importante en los tiempos de cambio de medida, se disminuiría el costo de cambios y, por lo tanto, el lote económico sería muy pequeño, lo cual daría la posibilidad de reducir los lotes de fabricación y eventualmente reducir todos los niveles de inventario, desde MP (palanquillas) hasta producto terminado.

# CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo, se colocarán las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas del estudio realizado.

## 7.1. Conclusiones

A continuación, se muestran las principales conclusiones de este proyecto de investigación:

- Se demostró la viabilidad de aplicar el algoritmo TSP y modelos de optimización para secuenciar la producción en un tren de laminación. De esta manera se obtienen secuencias óptimas que reducen el tiempo total de cambio en el intervalo seleccionado.
- Se utilizó el software AMPL – CPLEX y se comprobó que es apropiado para aplicaciones industriales de secuenciación de producción y tiene un elevado potencial de procesamiento aun utilizando modelos determinísticos.
- Se evidenció que la metodología SMED es altamente aplicable a las plantas de laminación en caliente y tiene un elevado potencial de ahorro económico por disminución de los tiempos de cambio.
- La aplicación de la metodología SMED en conjunto con la aplicación de modelos de optimización es perfectamente compatible y complementaria. La aplicación secuencial o en paralelo de ambas estrategias brinda resultados positivos para la reducción de los tiempos de cambio de formato.
- Se demostró que de aplicar los modelos de optimización se podrían obtener ahorros sustanciales en el costo del producto, y que aplicar la metodología SMED eleva el potencial ahorro en casi el doble de su magnitud.

## 7.2. Recomendaciones

A continuación, se muestran las principales conclusiones de este proyecto de investigación:

- La aplicación de las herramientas SMED que se han desarrollado en la presente tesis se ha expuesto en un contexto de una planta siderúrgica de laminación, sin embargo, es perfectamente aplicable a procesos industriales de cualquier otro rubro que impliquen cambios de formato.
- El modelo de optimización que se ha desarrollado, utilizando el algoritmo TSP se ha empleado para secuenciar los productos a laminar en una planta siderúrgica, pero es aplicable a cualquier proceso que utilice cambios de medida para cambiar el producto a producir y cuando la magnitud y los tiempos de cambio dependan directa o indirectamente de la secuencia de los productos.
- Se debe promover el uso de modelos de optimización en las industrias para aprovechar el potencial de ahorro que presentan, con lo cual podrían mejorar su competitividad.
- Muchas empresas e instituciones restringen las mejoras en plantas industriales a un solo campo de acción, a través de Lean, six sigma, estandarización ISO, etc. Durante la presente investigación se ha evidenciado que en muy pocos casos se presentan combinaciones de metodologías distintas, o que se utilice modelos de optimización en conjunto con herramientas Lean, Six Sigma, o de calidad ISO cuando en realidad el uso de varias estrategias podría brindar sinergias que elevan los beneficios a obtener.

## Bibliografía

- Alacero. (19 de 11 de 2018). Alacero hace un llamado urgente a la defensa del mercado siderúrgico de Guatemala. *Alacero*. Obtenido de <https://www.alacero.org/es/page/prensa/noticias/alacero-hace-un-llamado-urgente-a-la-defensa-del-mercado-siderurgico-de>
- Alacero. (2019). Recuperado el 06 de 2019, de Desarrollo del Acero: <https://www.alacero.org/es/page/el-acero/desarrollo>
- Alkhoraifa, A., Rashidb, H., & McLaughlina, P. (2018). Lean implementation in small and medium enterprises: Literature review. *Operations Research Perspectives*.
- Allahverdi, A., & Soroush, H. (2008). The significance of reducing setup times/setup costs. *European Journal of Operational Research*, 978-984. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.09.010>
- Allahverdi, A., Cheng, T. E., & Kovalyov, M. Y. (2008). *A Survey of Scheduling Problems with Setup Times or Costs (No Publicado)*. Hong Kong: -.
- Applegate, D., Bixby, R., Chvátal, V., & Cook, W. (2008). The Traveling Salesman Problem: A Computational Study. *The Use of Spreadsheet Software in the Application of Management Science and Operations Research*, 344-345. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/20141573>
- ArcelorMittal Warszawa. (2013). *Arcelor Mittal - Warszawa record production in the rolling mill- SMED*. Obtenido de <http://arcelormittal-warszawa.com/warszawa-record-production-in-the-rolling-mill>
- Arora, S., Balas, E., Barvinok, A., Fischetti, M., Frieze, A., Gimadi, E., . . . Zverovitch, A. (2007). *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*. (G. Gutin, & A. P. Punnen, Edits.) -: Springer.
- Baker, K. R., & Trietsch, D. (2019). *Principles of Sequencing and Scheduling*. Hoboken, USA: Wiley Series in Operations Research and Management Science.
- BAKU Steel Company. (s.f.). *BAKU Industrial achievements*. Recuperado el 20 de 04 de 2019, de <https://www.bakusteel.com/en/our-achievements/industry/>  
<https://www.bakusteel.com/en/our-achievements/industry/>
- Bédek, P. (2016). *Beyond Lean*. Heidelberg: Springer.
- Bhasin, S. (2015). *Lean Management Beyond Manufacturing*. Switzerland: Springer.
- Bigras, L.-P., Gamache, M., & Savard, G. (2008). The time-dependent traveling salesman problem and single machinescheduling problems with sequence dependent setup times. *Discrete Optimization*, 685-699.

- Billaut, J.-C. (1967). *Flexibility and robustness in scheduling* . Wiley.
- Brucker, P. (2006). *Scheduling Algorithms*. Berlin Heidelberg New York: Springer.
- C.A.A.S.A. (2007). *EL ACERO, Lo que hay que saber* (Segunda Edición ed.). Lima: Grupo Publicidad S.R.L. Obtenido de [http://www.acerosarequipa.com/fileadmin/templates/AcerosCorporacion/destacados/El\\_Acero.pdf](http://www.acerosarequipa.com/fileadmin/templates/AcerosCorporacion/destacados/El_Acero.pdf)
- C.A.A.S.A. (2016). *50 AÑOS*. (C. A. S.A., Ed.) LIMA, CALLAO, LIMA, PERÚ: Corporación Aceros Arequipa S.A. Recuperado el OCTUBRE de 2017, de <http://www.acerosarequipa.com/fileadmin/templates/AcerosCorporacion/PDF/Libro-50-anos.pdf>
- Carrizo-Moreira, A. (2014). Single Minute Exchange of Die. En J. L. García-Alcaraz, A. A. Maldonado-Macías, & G. Cortes-Robles (Edits.), *Lean Manufacturing in the Developing World*. New York: Springer.
- Cook, J. W. (2013). In Pursuit of the Traveling Salesman. *Interfaces*, 391. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/23481217>
- DANIELI . (05 de 2019). <https://www.danieli.com/en/products/processes-technologies/product-lines>. Obtenido de DANIELI Bar and Section Mills.
- Dutta, S. (2011). Hot Rolling Practice – An Attempted Recollection. *INSDAG*, 1-40.
- Faraco, M. E. (03 de 2018). Desarrollo del uso del acero en la construcción. (A. Latinoamericano, Entrevistador) Brasil: Asociación Latinoamericana del Acero.
- Gascon, A., Leachman, R., & P.Leafrancois. (1994). Multi-Item.Single-machine scheduling problem with stochastic demands: A comparison of heuristics. *International Journal of Production Research* , 583-596.
- Gestión. (25 de Julio de 2016). Aceros Arequipa: precios dumping de la competencia ha ocasionado la suspensión de nuestra planta de producción. *GESTIÓN*. Obtenido de <https://gestion.pe/empresas/aceros-arequipa-precios-dumping-competencia-ha-ocasionado-suspension-nuestra-planta-produccion-2166302>
- Harjunkoski, I., Maravelias, C. T., Bongers, P., Castro, P. M., Engell, S., Grossmann, I. E., . . . Wassick, J. (2014). Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. *Computers & Chemical Engineering*, 161-193.
- Held, M., & Karp, R. M. (1962). A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 10(1), 196 - 210. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/2098806>

- Hill, C. W., Jones, G. R., & Schilling, M. A. (2015). *Administración Estratégica: Teoría y Casos. Un enfoque integral*. México D.F.: Cengage Learning, Inc.
- Hirano, H. (2009). *JIT Implementation Manual* (Vol. 1). Tokyo: CRC - Taylor & Francis Group.
- Horngrén, C., Datar, S., & Rajan, M. (2012). *Cost Accounting 14° Edition*. Pearson.
- Imke, M. (2013). *Integrated Scheduling of Continuous Casters and Hot Strip Mills*. Berlin: Springer Gabler.
- INDECOPI. (2017). *RESOLUCIÓN 213-2017/CDB-INDECOPI*. Lima: LA COMISIÓN DE DUMPING, SUBSIDIOS Y ELIMINACIÓN DE BARRERAS COMERCIALES NO ARANCELARIAS DEL INDECOPI. Obtenido de <http://servicio.indecopi.gob.pe/buscadorResoluciones/getDoc?docID=workspace://SpacesStore/3d4ff274-b923-4f89-ab84-520e0128d6da>
- Janes, A., & Succi, G. (2014). *Lean Software Development in Action*. Heidelberg: Springer.
- Jans, R., & Degraeve, Z. (2004). META-HEURISTICS FOR DYNAMIC LOT SIZING: A REVIEW AND COMPARISON OF SOLUTION APPROACHES. *ERIM REPORT SERIES RESEARCH IN MANAGEMENT*.
- Jones, D. T., & Womack, J. P. (2012). *Lean Thinking*. Barcelona: Gestión 2000 - Grupo Planeta.
- Junjie, P., & Dingwei, W. (2006). An Ant Colony Optimization Algorithm for Multiple Traveling Salesman Problem. *First International Conference on Innovative Computing, Information and Control*. Beijing, China : IEEE .
- Justo, M. (30 de 03 de 2015). El acero barato de China que inunda el mundo. *BBC Mundo*. Obtenido de [https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150327\\_china\\_inunda\\_acero\\_barato\\_ac](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/03/150327_china_inunda_acero_barato_ac)
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Metal Rolling Processes and Equipment. En S. Kalpakjian, & S. R. Schmid, *Manufacturing: Engineering and Technology* (págs. 316-336). Singapore: Pearson Education South Asia Pte Ltd.
- Krajewski, L., Ritzman, L., & Malhotra, M. (2013). *Administración de Operaciones*. México D.F.: Pearson.
- Laporte, G. (2010). A Concise Guide to the Traveling Salesman Problem. *The Journal of the Operational Research Society*, 61(1), 35-40. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/40540226>
- Lee, Y. (2004). *Rod and Bar Rolling*. Pohang, Korea: Posco, Technical Research Laboratories .

- Lenstra, J. K., & Rinoooy Kan, A. (1975). Some Simple Applications of the Travelling Salesman Problem. *Operational Research Quarterly*, 26(4), 717-733.
- Li, W. (2014). *Production Scheduling in Integrated Steel Manufacturing (Theses and Dissertations) Paper 722*. The University of Wisconsin-Milwaukee, Wisconsin-Milwaukee.
- Lieberman, & Hillier. (2015). *Investigación de Operaciones*. Mc. Graw Hill.
- Liu, J., Tang, L., Rong, A., & Yang, Z. (2000). A multiple Traveling Salesman Problem model for hot Rolling scheduling in Shangai Baoshan Iron & Steel Complex. *European Journal of Operational Research*, 124 (2000), 267 - 282.
- LSSI. (s.f.). *SMED (Single-Minute Exchange of Die)*. Obtenido de <https://www.lssi-spanish.org/noticias-y-eventos/smed-single-minute-exchange-of-die>
- Luenberger, D. G., & Ye, Y. (2016). *Linear and Non Linear Programming*. Stanford: Springer.
- MINCETUR. (2018). *Reporte Comercial de Productos de Acero*. Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, Dirección General de Investigación y Estudios sobre comercio exterior. Lima: Mincetur. Obtenido de [https://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/comercio\\_exterior/estadisticas\\_y\\_publicaciones/estadisticas/exportaciones/Reporte\\_Comercial\\_Acero.pdf](https://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/comercio_exterior/estadisticas_y_publicaciones/estadisticas/exportaciones/Reporte_Comercial_Acero.pdf)
- Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3517–3535.
- NCO SRL. (s.f.). *Nuova Carpenteria Odolese - Rolling Mills*. Recuperado el 06 de 2019, de <http://www.nco.it/re-bar-wire-rod-rolling-mills.html>
- Nucor. (05 de 2019). *Nucor Products Reference Guide*. Obtenido de <https://www.nucor.com/products>
- Oleghe, O., & Salonitis, K. (2018). Leanness Assessment Tools and Frameworks. En O. Oleghe, K. Salonitis, S. L. Berger, G. L. Tortorella, C. M. Rodriguez, L. G. Pereira, . . . A. P. Castillo, & J. P. Davim (Ed.), *Progress in Lean Manufacturing* (págs. 1-39). Aveiro, Portugal: Springer.
- OZGUR, C., & BROWN, J. (1994). *A Two-Stage Traveling Salesman Procedure for the Single Machine Sequence-Dependent Scheduling Problem*. Great Britain: Pergamon.
- Picard, J.-C., & Queyranne, M. (1978). The Time-Dependent Traveling Salesman Problem and Its Application to the Tardiness Problem in One-Machine Scheduling. *OPERATIONS RESEARCH*, 26(1), 86-110. Obtenido de <https://www.jstor.org/stable/169893>
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling, Theory, Algorithms, and Systems*. New York: Springer.

- Pretorius, F. (2012). *A discrete-event simulation and production scheduling system for an FMCG plant manufacturing liquid products (Thesis)*. Pretoria: FACULTY OF ENGINEERING, BUILT ENVIRONMENT AND INFORMATION.
- Punnen, A. P. (2007). THE TRAVELING SALESMAN PROBLEM: Applications, Formulations and Variations. En T. T. Variations.. Springer.
- Roberts, W. L. (1983). *Hot Rolling of Steel*. (CRC, Ed.) United States of America: Taylor & Francis Group.
- Rodrigues, M. V. (2014). *Sistema de Produção Lean Manufacturing*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda.
- Rojas Polo, J., Cornejo Sánchez, C., Gilardino Arias, A., Benavente Sotelo, R., Cáceres Cansaya, A., & Muñante Chihuantito, P. (2017). *Guía de Investigación Operativa: A mathematical programming language (AMPL)*. Guía de Aprendizaje, PUCP, Ingeniería Industrial, Lima.
- RPP. (28 de 09 de 2017). Indecopi evalúa investigación por precios dumping de barras de acero. *El Comercio*. Obtenido de <https://rpp.pe/economia/economia/indecopi-evaluacion-de-investigacion-sobre-las-importaciones-a-precios-dumping-de-barras-de-acero-noticia-1079552>
- Salinas Coronado, J., Aguilar Duque, J. I., Tlapa Mendoza, D. A., & Amaya Parra, G. (2014). Lean Manufacturing in Production Process in the Automotive Industry. En J. Salinas Coronado, J. I. Aguilar Duque, D. A. Tlapa Mendoza, G. Amaya Parra, J. Salinas Coronado, J. L. García-Alcaraz, A. A. Maldonado-Macías, & G. Cortes-Robles (Edits.), *Lean Manufacturing in the Developing World*. Springer.
- Schaller, J. E., Guptab, J. N., & Vakharia, A. J. (1999). Scheduling a flowline manufacturing cell with sequence dependent family setup times. *European Journal of Operational Research*, 324-339.
- Sharif, M. (Enero de 2011). A new approach to compute convex hull. *Innovative Systems Design and Engineering*, 2(3). Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/236898954\\_A\\_new\\_approach\\_to\\_compute\\_convex\\_hull](https://www.researchgate.net/publication/236898954_A_new_approach_to_compute_convex_hull)
- Shingo, S. (1983). *A Revolution in Manufacturing: The SMED System*. Tokyo: Productivity Press: Cambridge, Massachusetts and Norwalk, Connecticut.
- Sommer, C. (27 de 02 de 2007). *Hamiltonian path*. Obtenido de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hamiltonian\\_path.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hamiltonian_path.svg)

- Sund Birsta AB. (s.f.). *Sund Birsta Products - Binding machines*. Recuperado el 06 de 2019, de <http://www.sundbirsta.com/products/barbeamtube-mill/binding-strapping-machines/binding-machine-knca>
- Sundar, A., Balaji, A., & SatheeshKumar, R. (2014). A Review on Lean Manufacturing Implementation Techniques. *Procedia Engineering*, 1875-1885.
- Suwa, H., & Sandoh, H. (2013). *Online Scheduling in Manufacturing*. London : Springer.
- Tanaev, V., Gordon, V., & Y.M., S. (1994). *Scheduling Theory, Single-Stage Systems*. Minsk, Byelorussia: Kluwer Academic Publishers.
- Tang, L., Rong, A., & Yang, Z. (1999). A MTSP Model for Hot Rolling Scheduling in Baosteel Complex. *14th Triennial World Congress, Beijing, P.R. China*, 7056 - 7061.
- Tetteh, E. G., & Uzochukwu, B. M. (2015). *Lean Six Sigma Approaches in Manufacturing, Services, and Production*. Pennsylvania: Business Science Reference.
- TIG Ltd. Sti. (s.f.). *Alibaba*. Recuperado el 05 de 2019, de Rolling Mill Stands Complete: [https://www.alibaba.com/product-detail/Rolling-Mill-Stands-Complete\\_123429552.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Rolling-Mill-Stands-Complete_123429552.html)
- Tilak, A. G., & Tech, B. (1974). A Single Machine Sequencing Problem with Multiple Criteria - Tesis de Maestría. Texas Tech university.
- Wilfahrt, R., & Sangho, K. (2017). Traveling Salesman Problem (TSP). *Encyclopedia of GIS (Springer)*, 2334 - 2337.
- Wilson, L. (2010). *How to Implement Lean Manufacturing*. McGraw-Hill.
- Wixroyd International Ltd. (s.f.). *Wixroyd International Ltd - productos*. Recuperado el 06 de 2019, de <https://www.wixroyd.com/media/files/datasheet/wh.mch.smc.ecc.pdf>