

2020-01

REPOTENCIAMIENTO DEL TREN DE CONFORMACIÓN DE UNA PERFILADORA EN EMPRESA PRODUCTORA DE PERFILES

JIMÉNEZ RABY, FRANCISCO JOSÉ

<https://hdl.handle.net/11673/49643>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



**REPOTENCIAMIENTO DEL TREN DE
CONFORMACIÓN DE UNA PERFILADORA EN
EMPRESA PRODUCTORA DE PERFILES**

FRANCISCO JOSÉ JIMÉNEZ RABY

MEMORIA DE TÍTULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: RAFAEL MENA YANSSEN

ENERO - 2020

Resumen

Los productos de acero que se fabrican en frío mediante trenes de conformación como perfiles y paneles, han tenido un gran impacto en el desarrollo de la construcción a nivel mundial. Con el tiempo, los productos fabricados por este método se han implementado en otras áreas como por ejemplo la agronomía, energía, etc.

Con un aumento constante en la demanda de productos de este tipo, se hace necesario por parte de los proveedores, mejoras en la productividad de sus líneas de formación, con el fin de satisfacer esta constante demanda, y a la vez, satisfacer las distintas necesidades de los clientes.

En este trabajo se presentan las modificaciones necesarias que se deben realizar en una línea fabricadora de perfiles de acero, con el fin de aumentar su producción, lo que implica modificación e inclusión de nuevos componentes y modificaciones del layout de la máquina.

Primero se presenta un acercamiento a lo que son las máquinas perfiladoras, mostrando los componentes más importantes de una línea típica de fabricación de perfiles de acero.

Por otro lado se analizan las regulaciones existentes que se aplican en el mercado de la fabricación de perfiles, normas aplicadas tanto al material, procesos de galvanizado y dimensiones finales de productos. Analizando también la capacidad productiva a nivel nacional de la fabricación de perfiles.

Luego se presentan y realizan los cálculos necesarios para poder lograr el objetivo de aumentar la producción mensual de una máquina perfiladora, considerando una distribución de componentes estándar.

Finalmente se presenta el aumento de producción de la línea de perfilado con sus modificaciones. Este aumento corresponde a un 312% para el caso de producto sin perforación y de un 512% para el caso de producto perforado, ambos valores con respecto a la producción original de la máquina.

Palabras clave: Conformado, Perfiladora, Perfilado, Panelera

Abstract

Steel products that are manufactured cold by forming trains such as profiles and panels have had a great impact on the development of construction worldwide. Over time, products manufactured by this method have been implemented in other areas such as agronomy, energy, etc.

With a constant increase in the demand for products of this type, it is necessary on the part of the suppliers, improvements in the productivity of their forming lines, in order to meet this constant demand, and at the same time, meet the different needs of the clients.

This work presents the necessary modifications that must be made in a profile fabrication line, in order to increase its productivity to more than double, which implies modification and inclusion of new components and modifications of the machine layout.

First, an approach to what are profiling machines is presented, showing the most important components of a typical steel profile manufacturing line.

On the other hand, the existing regulations that are applied in the profile manufacturing market, standards applied to the material, galvanizing processes and final product dimensions are analyzed. Analyzing also the productive capacity at national level of the manufacture of profiles.

The necessary calculations are then presented and performed to achieve the objective of increasing the monthly production of a profiling machine, considering a distribution of standard components.

Finally, the production increase of the profiling line with its modifications is presented. This increase corresponds to 312% for the case of product without perforation and 512% for the case of perforated product, both values with respect to the original production of the machine.

Keywords: Conforming, Roll forming machine, Profile, Paneling machine.

Índice de Contenidos

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Glosario	8
1. Introducción	9
1.1. Perfiladoras	9
1.2. Objetivos	10
2. Estado del arte de perfiladoras	11
2.1. Comienzos.....	11
2.2. Siglo XX	13
3. Teoría del perfilado.....	15
3.1. Partes principales del tren de formación	15
3.2. Cantidad de pasos	20
3.3. Diagrama de flor	21
3.4. Rodillos formadores.....	23
3.5. Potencia del tren de formación.....	25
3.6. Elementos principales de una línea de perfilado.....	28
4. Análisis de la industria y sus capacidades productivas	31
4.1. Normas aplicadas a la industria	31
4.1.1. Norma aplicada a la denominación de los aceros	31
4.1.2. Norma aplicada al recubrimiento del material	33
4.1.3. Norma aplicada al producto terminado	35
4.2. Capacidades productivas.....	36
5. Propuesta de repotenciamiento – Análisis teórico y Desarrollo empírico	38
5.1. Situación actual de la perfiladora.....	39
5.2. Producción actual de la perfiladora.....	40
5.2.1. Producción mensual producto no perforado	41
5.2.2. Producción mensual producto perforado	41
5.3. Propuesta de repotenciamiento	42
5.3.1. Reemplazo del motor principal del tren de formación.....	42
5.3.2. Medición de consumo de motor.....	48
5.3.3. Modificación del Layout de la máquina.....	49
6. Análisis de resultados y conclusiones del trabajo	58
6.1. Análisis de resultados	58

6.1.1.	Reemplazo del motor principal del tren de formación.....	58
6.1.2.	Modificación del Layout de la Máquina	59
6.1.3.	Análisis de aumento de producción	59
6.2.	Conclusiones	60
7.	Bibliografía	62
7.	Anexo.....	63
7.1.	Detalle cálculos punto 5.3.1.....	63
7.2.	Corrección formula cantidad de pasos	65
7.3.	Reemplazo de valores en ejemplo cantidad de pasos.....	67

Índice de Figuras

Figura 1: Plano Leonardo Da Vinci.[en línea] www. https://www.alamy.es [Consulta: 25 septiembre 2019].....	13
Figura 2: Deformación del producto. HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-3 p.	15
Figura 3: Rodillo formador superior. Voestalpine [en línea] < http://www.rfcorp.com/technologies/roll-forming > [Consulta: 25 septiembre 2019].....	16
Figura 4 Bastidores de paso: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 2-10 p.	17
Figura 5 Caja de transmisión de un bastidor: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 2-22 p.	18
Figura 6 Partes de un tren de conformado: FMC [en línea] https://fabmach.com/media/qvw-200-tooling-roll-forming-section.jpg [Consulta: 27 septiembre 2019].....	19
Figura 7 Diagrama de flor separado: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-4 p.	22
Figura 8 Diagrama de flor superpuesto: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-4 p.	22

Figura 9: Enredo de material en paso formador: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-46 p.	24
Figura 10: Proceso de enredo de material en paso formador: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-46 p.	25
Figura 11 Vista transversal de un perfil con las variables principales. THE PREDICTION OF ROLL LOAD IN COLD ROLL-FORMING por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987.....	27
Figura 12 Vista lateral dos pasos con las variables principales. THE PREDICTION OF ROLL LOAD IN COLD ROLL-FORMING por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987.....	27
Figura 13: Vista frontal línea de formación. Modificación de figura de HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 4-12 p.....	28
Figura 14 Vista frontal línea de formación. Modificación de figura de HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 4-12 p.....	29
Figura 15 Vista alzado de la distribución de la perfiladora a modificar. [Elaboración propia, 2019]	39
Figura 16. Comportamiento teórico con dimensiones del fleje según el radio mínimo de curvatura del material. [Elaboración propia,2019]	51
Figura 17. Pozo de almacenamiento de material según comportamiento del fleje. [Elaboración propia, 2019]	52
Figura 18. Vista alzado de nuevo layout de máquina. [Elaboración propia, 2019]	59

Índice de Tablas

Tabla 1: Valores de reemplazo para obtención de número de pasos perfil U o Canal.....	21
Tabla 2: Sistemas SAE, AISI y UNS para clasificar aceros. Compendio de normas para productos de acero, GERDAU AZA., 3era. Ed. Renca, Santiago, Chile., 2000. 4-12 p.	33
Tabla 3. Características principales de la perfiladora a modificar. [Elaboración propia, 2019]	40
Tabla 4. Variables de la ecuación de Bhattacharyya junto con el estado de cada una. [Elaboración propia, 2019]	43
Tabla 5. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a las propiedades mecánicas del acero con que trabaja la perfiladora. [Elaboración propia, 2019].....	43
Tabla 6. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a las dimensiones del material y del tren de formación. [Elaboración propia, 2019]	44
Tabla 7. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a las distancias del perfil con respecto a los puntos de los rodillos formadores del siguiente paso. [Elaboración propia, 2019]	44
Tabla 8. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a cada paso, al ángulo de incrementación en la deformación del perfil, al segundo momento de área de la forma del perfil y el largo del ala a deformar. [Elaboración propia, 2019]	45
Tabla 9. Muestra los resultados del reemplazo de los valores anteriores en las dos partes de la ecuación de Bhattacharyya, dando como resultado la fuerza total en cada paso. [Elaboración propia, 2019]	45
Tabla 10. Muestra los resultados del torque obtenido en cada paso del tren de formación. [Elaboración propia, 2019]	46
Tabla 11. Muestra los resultados de potencia mecánica por paso y total del tren de formación en base al torque y la velocidad angular de cada paso. [Elaboración propia, 2019]	47
Tabla 12 Resumen de dimensiones del pozo. [Elaboración propia, 2019]	53
Tabla 13. Especificaciones de alimentadores marca COE. COE Press Equipment. ServoMaster Series 2 Roll Feeds [en línea]. < https://www.cpec.com/uploads/2/7/3/7/27375281/3-servomaster_series_2.pdf > [Consulta: 15 Octubre 2019]	55
Tabla 14. Resumen de tiempo y distancia recorrida por el material incluyendo perforado. [Elaboración propia, 2019]	56

Glosario

Bastidor: Elemento mecánico que soporta y transmite la potencia proveniente del motor a los ejes donde se montan los rodillos formadores.

Conformado: Dar forma a algo.

Diámetro de cama: Diámetro del rodillo inferior del último paso del tren de formación en el centro de este.

Diámetro del eje: Diámetro del eje donde se soportan los rodillos formadores, diseñado en base al espesor, esfuerzo y desarrollo máximo del material a conformar.

Distancia horizontal: Es la distancia entre pasos, medida desde centro a centro de ejes de forma horizontal.

Distancia vertical: Distancia máxima entre el centro del eje superior e inferior.

Eje superior motorizado: En algunos casos el rodillo superior puede ser motorizado o “loco” en caso de que el eje no tenga transmisión conectada.

Encoder: Dispositivo electromecánico que permite codificar el movimiento mecánico en distintos tipos de impulsos eléctricos.

Layout: Distribución de los elementos de una máquina representado de forma esquemática.

Paso: Distancia entre dos bastidores

Pass Line: Es la distancia entre la bancada y la parte inferior del material en el último paso en el centro.

Perfiladora: Máquina que fabrica perfiles.

Productividad Total: Relación entre producción total y suma de factores de insumo utilizados.

Rodillo Formador: Pieza mecanizada que mediante su giro en un eje, se encarga de ir deformando el producto a medida que este avanza por la bancada formadora.

Tren de Formación: Este provee la potencia y soporta los elementos mecánicos que forman deforman el material de entrada. Se le conoce también como Bancada Formadora.

1. Introducción

1.1. Perfiladoras

El rubro de las perfiladoras se ha perfeccionado con el tiempo gracias a los rápidos avances tecnológicos de los últimos años en el ámbito de la electrónica principalmente. La demanda constante de los productos tales como perfiles y paneles, han obligado a la industria a progresar para poder satisfacer las distintas solicitudes de los clientes.

Es por esto que se ha convertido prácticamente en una necesidad, el mejoramiento continuo de las líneas de conformado por parte de los proveedores, para satisfacer necesidades de calidad, cantidad, tiempo y precio de los productos. Al existir distintos competidores en el mercado, tanto como pequeñas y grandes empresas, los clientes que sientan que el proveedor no cumple con sus expectativas, podrán buscar en otras empresas lo que no encontraron en el primer proveedor.

De lo anterior, existen diversas modificaciones que se pueden realizar a una línea de conformado, según lo que se pretenda mejorar. Por ejemplo si se quiere mejorar la calidad del producto, se pueden realizar modificaciones en la línea de rodillos, cambios en la calidad del material, calibraciones constantes en la máquina, etc. Si se quieren disminuir los costos, sin sacrificar la calidad, se puede aumentar la producción diaria de la máquina, manteniendo constante la mano de obra, lo que implicaría un aumento en la velocidad de la máquina. De la misma forma si se quiere disminuir el tiempo de producción y por ende el de entrega.

Es por esto que aumentar la productividad total de una línea de conformado siempre traerá beneficios tanto para el proveedor como para el cliente, sin embargo, se debe tener claro hacia donde se quiere apuntar con la mejora, ya que no siempre se obtienen beneficios directos en la cadena completa de procesos. Por ejemplo, si se aumenta la velocidad de una línea y ese producto necesita pasar posteriormente por un proceso de perforado, y en este proceso se genera un cuello de botella, no valdrá la pena invertir en el aumento de velocidad de la línea.

Por otro lado, si se incorpora el proceso de perforado en la misma línea de conformado, y luego se aumenta la velocidad de la línea, se mejorarán los tiempos entrega, aumentando la cantidad de productos por turno. Disminuyendo los reprocesos se disminuye la mano de obra haciendo que el margen de utilidad sea mayor, lo que permite bajar el precio del producto siempre manteniendo la misma calidad.

Es por esto que analizando bien una mejora en la velocidad de una línea, teniendo claro los objetivos que se lograrán con las modificaciones, va a traer sin dudas mejoras tanto para el proveedor como para el cliente.

1.2. Objetivos

El aumento de velocidad de una línea de producción se debe analizar de manera correcta para lograr al objetivo deseado. Con la información presentada en este trabajo se pretende aumentar la productividad total de una línea de conformado, realizando tareas claves como modificaciones de componentes existentes, inclusión de componentes nuevos en la línea de conformado y modificaciones del layout original de la máquina.

Objetivo General:

Repotenciar una línea de conformado de acero denominada perfiladora, con el fin de aumentar su productividad. También se pretende analizar teóricamente las variables necesarias para cumplir este objetivo y compararlas con mediciones empíricas.

Objetivos Específicos:

- Estado del arte de perfiladoras.
- Teoría del conformado
- Análisis de la industria y sus capacidades productivas
- Propuesta de repotenciamiento – Análisis teórico y Desarrollo empírico
- Análisis de resultados y conclusiones del trabajo

2. Estado del arte de perfiladoras.

2.1. Comienzos

Antes de la utilización de los metales, nuestros ancestros utilizaron herramientas de madera y piedra por millones de años. Alrededor del 6000 A.C. comenzaron a dar forma a los metales disponibles (oro, cobre, etc.) mediante golpes para hacer adornos, herramientas y armas. Posteriormente se descubrió la técnica de reducir minerales, fundir y mezclar metales, y utilizarlos para realizar productos más elaborados.

El oro era principalmente utilizado para joyas, debido a que es muy blando para utilizarlo para implementos. Con el cobre, agregándoles arsénico y estaño, se podían fabricar hachas y otros artículos de buena calidad, hechas por los primeros herreros de la era de bronce. Dado estos avances, la era de bronce reemplazó inevitablemente a la era de piedra.

El oro, cobre, estaño, plomo, plata, hierro y mercurio eran los siete metales conocidos y utilizados hasta el siglo trece y solo cinco nuevos metales se descubrieron hasta el siglo diecisiete. Hoy, se sabe que dos tercios de todos los elementos conocidos corresponden a metales.

Los primeros productos de hierro datan del 3000 al 4000 A.C., pero eran escasos y costosos. Los bordes de estos artículos eran blandos y por ende, calificaban para ornamentos pero no como herramientas o armas. El descubrimiento del proceso de añadir carbono al hierro alrededor del 1200 al 1300 A.C, trajo grandes cambios y anuncio el comienzo de la era de hierro. Los productos de acero mejoraron para su utilización como herramientas y armas. La transición fue lenta, pero eventualmente el acero fundido y forjado comenzó a reemplazar al bronce en la mayoría de las áreas. Los hornos se hicieron más grandes y el acero mejor. Los primeros herreros produjeron hachas de muy buena calidad, cinceles, espadas y otros implementos. Alrededor del año 1350, los trabajadores del hierro en Europa central, triunfaron en fundir y forjar hierro, mediante el uso primitivo de “altos hornos”.

Haciendo elementos completos, tales como armaduras ensambladas por cientos de piezas de placas martilladas y alambres, requerían habilidad y experiencia. El proceso era extremadamente laborioso debido a las largas horas de martilleo constante. De hecho, hasta el siglo diecisiete, hasta el amanecer de la revolución industrial, todos los elementos que no

fuesen fundidos, dese ornamentales hasta utilitarios, eran hechos a mano, mediante laboriosa forja. No mucha gente podía darle el lujo de poseer productos de metal.

Durante la revolución industrial de los siglos dieciocho y diecinueve, muchas de las herramientas hechas a mano utilizadas en la manufactura de los metales, fueron siendo reemplazadas gradualmente por maquinaria impulsadas por energía. Molinos de agua, motores a vapor, y posteriormente, motores eléctricos proveyeron gran potencia. En 1855, Bessemer patentó el primer método de fabricación de acero en Inglaterra, un proceso que proveía grandes cantidades de acero de mejor calidad. Originalmente, el acero estaba destinado a fundiciones (cañones), pero eventualmente la mayoría era procesado mediante forja, utilizando grandes prensas.

Uno de los logros más significantes de la revolución industrial, fue el remplazo del arte del martilleo (forja) por un par de rodillos rotatorios para cambiar la forma o el espesor de los metales. Basado en la experiencia de la forja, y sabiendo que el acero es más flexible cuando está caliente, el procesos de laminado era realizado a altas temperaturas. El laminado reduce el espesor e incrementa el área en contacto con el aire. El enfriamiento rápido de las grandes superficies, limita el espesor mínimo que se puede alcanzar mediante laminado en caliente. La introducción de volantes de inercia, embragues, motores de vapor reversibles y motores eléctricos, contribuyeron a un proceso de conformado de acero más rápido, permitiendo alcanzar menores espesores de los productos laminados. Sin embargo, mientras más delgado se vuelve el meta, más larga su superficie y más rápida su tasa de enfriamiento. Es por esto, que aún con el equipamiento más moderno, el mínimo espesor comercial disponible en acero laminado en caliente es del orden del 1.5 a 1.8 mm.

Laminado a temperatura ambiente no es una tecnología nueva. Laminado en frío primitivamente, era utilizado en el siglo catorce para oro y plata. Los primeros laminadores de acero que existe registro, fueron diseñados por Leonardo da Vinci en 1480. A fines del siglo dieciséis y comienzos del diecisiete, un par de rodillos fueron utilizados para formar planos de materiales blandos como oro, plomo y estaño, probablemente a temperatura ambiente. El laminado en frío también fue utilizado para planear platos de estaño. El conformado a temperatura ambiente del acero, comenzó a fines del siglo dieciocho y comenzó a ser más utilizado durante el siglo diecinueve. A fines del siglo diecinueve y durante el siglo veinte, una variedad inmensa de aluminio, cobre, latón, plomo, estaño, titanio, zirconio y aleaciones

especiales conformadas en frío y en caliente se disponían comercialmente. Si estos productos laminados planos, la vida actual y el estándar de vida serían inimaginables.¹



Figura 1: Plano Leonardo Da Vinci.[en línea] [www. https://www.alamy.es](http://www.alamy.es) [Consulta: 25 septiembre 2019]

2.2. Siglo XX

Aunque el proceso de conformado era utilizado a comienzos del siglo XX, fue después de la segunda guerra mundial cuando tomó un porcentaje significativo en la producción de hojas de metal de prensas y otros tipos de formado. Debido a la alta eficiencia del conformado por rodillos, la mano de obra de muchos productos fue drásticamente reducida.

Techos, revestimientos, graneros, contenedores de almacenamiento de granos (silos), estanterías, racks de almacenamiento, lámparas fluorescentes, productos eléctricos, refrigeración, calefacción, ventilación, vagones de ferrocarril, plantas de energía, puertas, ventanas, divisiones de baños, ruedas de bicicleta, chimeneas , muebles, electrodomésticos,

¹ HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 1-1, 1-2 p.

aviones, naves espaciales, piscinas e innumerables productos han sido conformados por rodillos eficientemente.

En las décadas del 50 y 60, los encoders rotatorios fueron introducidos y la aplicación de prensas neumáticas, soldadura en línea, pre punzonado y el conformado de metales pre pintados se propago rápidamente. Eventualmente, más y más operaciones se fueron incorporando a las líneas de conformado o perfiladoras.

En la década del 70 y 80, el pre punzonado se convirtió en algo más sofisticado mediante el uso de diferentes controles y punzones. Innovaciones fueron introducidas para reducir el tiempo de cambio de herramientas, bancadas, rodillos, etc. Sistemas de aceleración en el punzonado se volvieron más sofisticados y los largos más precisos. Aceros con más de 1960 MPa de fluencia y metales más exóticos fueron conformados exitosamente. A fines de la década del 70 y principios del 80, sistemas asistidos por computadores fueron introducidos.

En la década del 90, una gran cantidad de controladores programables y computadores fueron añadidos para controlar las líneas. El producto, así como la tolerancia del material, se volvió más preciso y la demanda de una manufactura flexible fue creciendo. Los clientes presionaron a los proveedores por equipamiento de mejor calidad y línea más eficientes, incluyendo manejo automatizado del producto terminado. La competitividad, llevó a la disminución de la cantidad de operadores por línea, llevando incluso a que un operador pueda manejar dos o más líneas, a una mayor velocidad y una mayor tasa de utilización².

² HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 1-2, 1-3 p.

3. Teoría del perfilado

3.1. Partes principales del tren de formación

El Perfilado o Roll Forming, se define como:

“Formar una tira de metal a lo largo de líneas de curvatura longitudinales y paralelas con múltiples pares de rodillos contorneados sin cambiar el espesor del material y a temperatura ambiente”³

Lo anterior, se puede explicar de otra manera como un proceso de plegado continuo, en donde la tira de metal va pasando por distintos pares de rodillos, los cuales le van dando la forma al material, siendo los últimos rodillos los que le dan la forma final al producto, todo esto sin modificar el espesor y a temperatura ambiente.

En la siguiente figura se puede observar la transformación del acero al pasar por el proceso de perfilado:

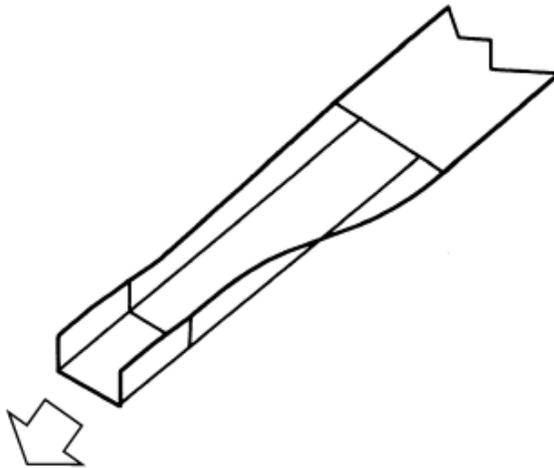


Figura 2: Deformación del producto. HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-3 p.

³ HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 1-3 p.

Se observa que, según la dirección de perfilado (indicada por la flecha), el material comienza con forma plana y termina con forma de U (en su sección transversal), perfil conocido como canal. Esto se logra al hacer pasar el material por los distintos rodillos formadores.

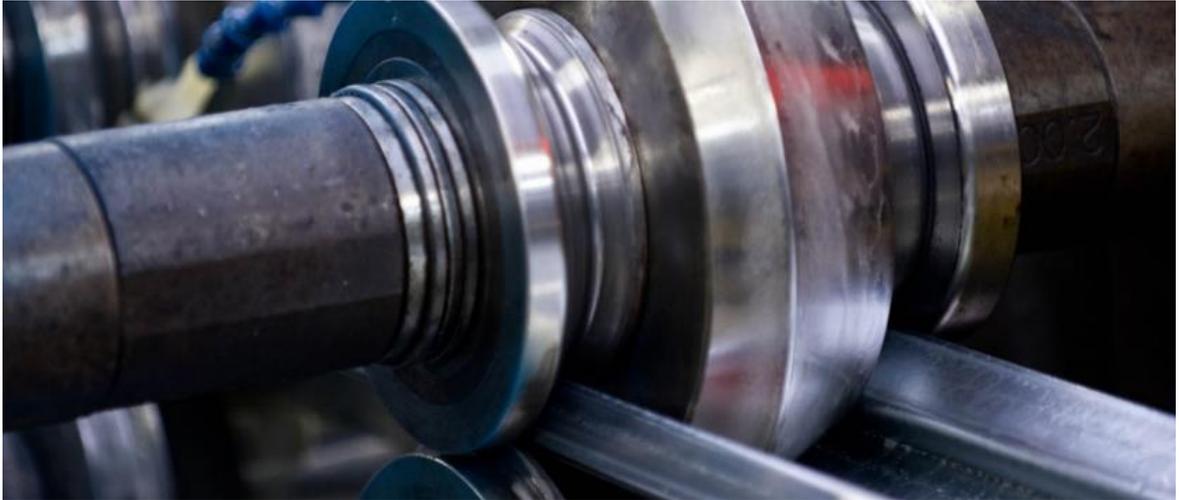


Figura 3: Rodillo formador superior. Voestalpine [en línea] <<http://www.rfcorp.com/technologies/roll-forming>> [Consulta: 25 septiembre 2019]

En la figura anterior, se observa un rodillo formador superior. Un conjunto de rodillos superiores e inferiores, corresponden a un paso del tren de rodillos formadores. Cada paso deformará al producto gradualmente desde el primer al último paso, para obtener la forma final al salir del tren de formación. Los rodillos van montados sobre un eje, los ejes de los rodillos superiores e inferiores se soportan en el elemento denominado bastidor.

Los bastidores pueden tener distintas configuraciones, la más común es que ambos lados del eje de los rodillos formadores (superior e inferior) descansen sobre bastidores, como se ve en la siguiente figura:

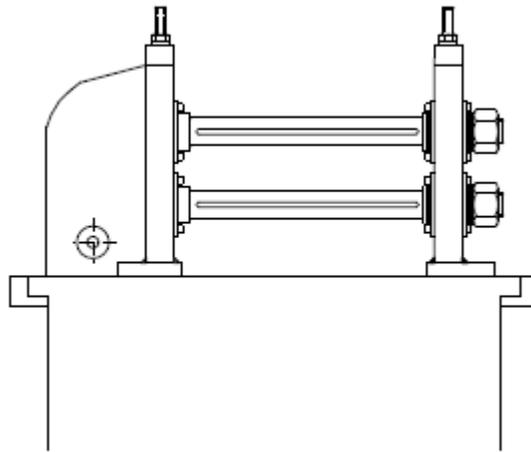


Figura 4 Bastidores de paso: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL, USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 2-10 p.

En la figura anterior, se observan los bastidores de un paso de configuración standard (ambos lados del eje apoyados). En la parte izquierda se observa el bastidor fijo, el cual se encarga de transmitir el movimiento al eje inferior y superior, o en algunos casos solo al inferior. En el lado derecho se observa el bastidor móvil, el cual se debe extraer para montar y desmontar los rodillos formadores del paso correspondiente.

El eje inferior de la configuración anterior no tiene movimiento en sentido vertical. El eje superior si, y este se puede bajar o subir, de manera de que el rodillo pueda presionar de mayor o menor forma al producto.

En el bastidor fijo se tiene la transmisión, esta puede tener distintas configuraciones, tales como cadena, cardan, sinfín corona, etc. Estos bastidores van soportados en la bancada principal de la máquina.

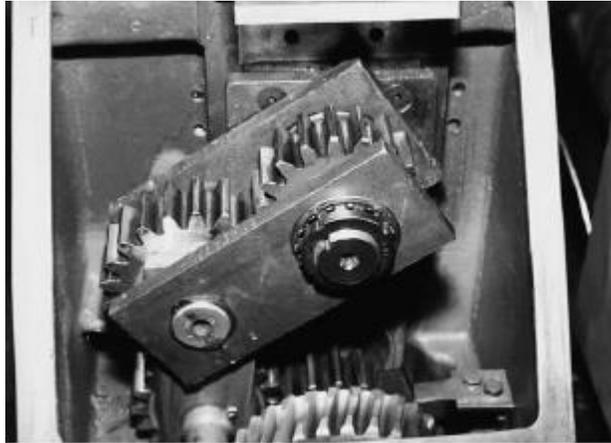


Figura 5 Caja de transmisión de un bastidor: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL, USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 2-22 p.

En la figura anterior se observa la caja de transmisión del bastidor fijo de un paso del tren de formación. Se observa en la parte inferior una corona, la cual se encuentra en el mismo eje que el del rodillo formador inferior, luego mediante un sistema de engranes, se transmite el movimiento al eje superior, haciéndolo girar en el sentido contrario.

El motor principal del tren de formación, generalmente un motor eléctrico, transmite su movimiento mediante poleas, cadenas, correas, acoples, etc. a los bastidores. En base a la figura anterior, el motor principal transmite movimiento a un eje el cual se encuentra acoplado a un sinfín, el cual le transmite movimiento a la corona al interior del bastidor. Esta configuración se repite para todos los pasos del tren de formación.

A continuación se observan las partes principales de un tren de formación:

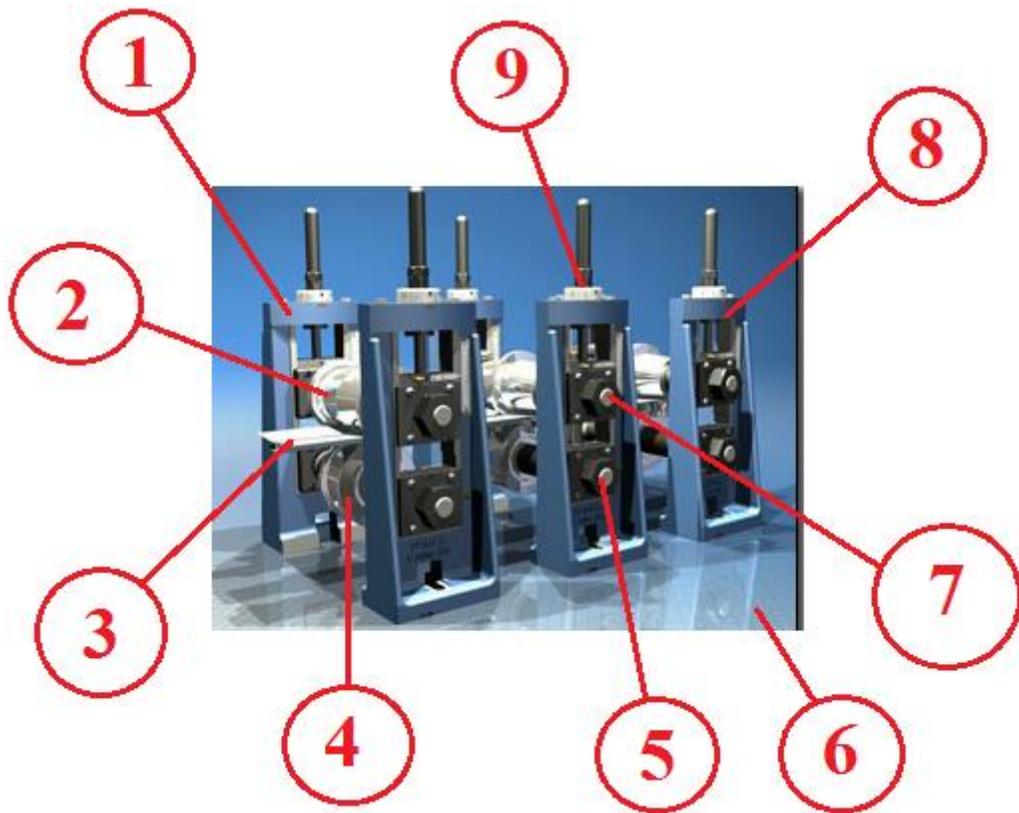


Figura 6 Partes de un tren de conformado: FMC [en línea] <https://fabmach.com/media/qvw-200-tooling-roll-forming-section.jpg> [Consulta: 27 septiembre 2019]

1. Bastidor Fijo
2. Rodillo Superior
3. Material
4. Rodillo Inferior
5. Eje inferior
6. Bancada
7. Eje superior
8. Bastidor Móvil
9. Regulador de altura eje superior

3.2. Cantidad de pasos

La cantidad de pasos para formar un producto, dependerá de muchos factores tanto económicos como propios del material y del diseñador. Un tren de formación con una cantidad excesiva de pasos, tendrá como consecuencia una gran inversión y altos costos de mecanizado de rodillos una vez que estos se desgasten por el uso. Por otro lado, una cantidad de pasos menor a la requerida, tendrá consecuencias negativas para el producto final, generando laminación excesiva dado los altos esfuerzos necesarios para deformar el producto en cada paso imposibilitando alcanzar de manera óptima el diseño deseado.

Algunos factores principales al definir la cantidad de pasos son:

- Espesor del material
- Continuidad del material
- Perforaciones previas

Existen varias formas de definir la cantidad de pasos, muchas concluidas por diversos autores a lo largo del tiempo, sin embargo se recomienda utilizar la siguiente, proveniente de libro Roll Forming Handbook:

$$n = \left[0.237h^{0.8} + \frac{0.834}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{0.003Y^{2.1}}{U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

Ecuación 1: Definición del número de pasos de un tren de formación: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL, USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-69 p.

Esta fórmula se encuentra corregida, debido a que presenta un error en su transformación del sistema imperial al sistema métrico en el libro de referencia (ver anexo 7.2.).

n = Número de pasos (solo guía)

h = Altura máxima de la sección en [mm]

t = Espesor del material en [mm]

α = Suma total de ángulos a un lado desde el centro del producto (lado más largo)

Y = Esfuerzo de fluencia en [MPa]

U = Resistencia a la tracción en [MPa]

z = Perforación pre punzonada / muesca y factor de continuidad del material (0 a 2) (ver anexo)

s = Factor de forma (1 – 1.6) (ver anexo)

e = Número de pasos extra (0, 1, 2, etc.) por ejemplo, para acanalar, duplica el último paso.

f = factor de tolerancia (0 a 2) (ver anexo)

Para obtener un número preciso de pasos, se debe realizar un ingreso correcto de las variables, lo que requiere experiencia por parte del diseñador.

Por ejemplo para realizar el cálculo de un perfil U o Canal, con las siguientes características se tiene:

	Métrico
h	15,9
t	1,5
α	90
Y	310
U	379
z	0
s	1
e	0
f	1,2

Tabla 1: Valores de reemplazo para obtención de número de pasos perfil U o Canal.

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación se obtiene **n = 5,1 pasos**, por lo que el diseño debe tener 6 pasos para que el material se conforme de manera correcta. Recordar que esta fórmula es solo una guía y se debe tener otras consideraciones de diseño basado en experiencia. (Ver anexo 7.3.)

3.3. Diagrama de flor

El diagrama de flor corresponde a la sección transversal del perfil a la salida de cada paso. El diseñador de la línea debe realizar todos los quiebres necesarios, entre la cantidad de pasos calculada para que a la salida del último paso, el producto tenga las características finales.

A continuación se observa un diagrama de flor de un producto denominado comúnmente como costanera, en un total de 10 pasos formadores:

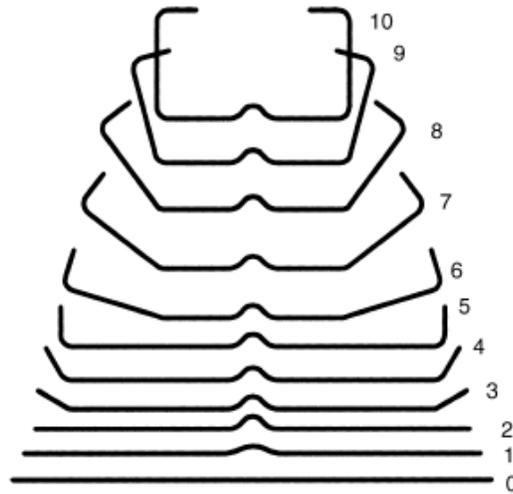


Figura 7 Diagrama de flor separado: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-4 p.

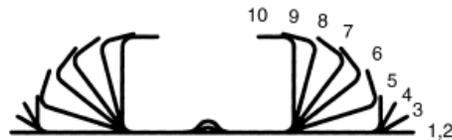


Figura 8 Diagrama de flor superpuesto: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-4 p.

Se observa primero un diagrama de flor del producto separado entre cada paso, mientras que más abajo se encuentra el mismo diagrama pero superpuesto.

Se debe mencionar que no existe una regla para el diseño de los diagramas de flor, si no que el diseñador, basándose en su experiencia, debe realizar los quiebres del producto de manera que el esfuerzo para deformarlo se reparta lo más equitativamente en el tren de formación.

El diagrama de flor es uno de los aspectos más importantes en el diseño de los rodillos formadores. Este revelará anticipadamente el flujo del material y el esfuerzo requerido para el proceso de formación. Mientras más parejo sea el incremento en los quiebres de material, hay menos probabilidades de tener problemas.

Una vez diseñado el diagrama de flor, este generalmente se modifica muchas veces hasta llegar al diagrama final. Anteriormente, este proceso se realizaba de forma manual, hoy en día se han reducido considerablemente los tiempos al utilizar programas de computación para diseñar y modificar los diagramas.

3.4. Rodillos formadores

Una vez obtenido el diagrama de flor final, se procede con el diseño de los rodillos. Este trabajo debe realizarse tomando todas las consideraciones de la máquina y del producto. Las principales consideraciones son:

- Tipo de bastidores
- Diámetro del eje de los bastidores
- Distancia entre pasos
- Distancia vertical entre ejes de los pasos
- Distancia entre el eje inferior y la bancada o base del bastidor
- Dimensiones de los chaveteros y chavetas de los ejes de bastidores
- Transmisión en ejes superiores
- Transmisión de todos los ejes inferiores ya que algunos pasos pueden no tener transmisión
- Relación de transmisión entre eje superior e inferior
- Altura del Pass Line
- Dirección de la línea – Derecha a Izquierda o Viceversa
- Velocidad de la línea
- Número de pasos
- Cambio de rodillos formadores
- Rodillos partidos
- Diámetro de los rodillos

Se observa que el trabajo de diseño de rodillos es muy complejo y se debe tener mucha experiencia para tomar en cuenta todas estas variables.

Anteriormente se definió el concepto de “Diámetro de Cama” el cual corresponde al diámetro del rodillo inferior del último paso en el centro. Este diámetro será el que definirá la velocidad

tangencial de la máquina, sin embargo, se debe considerar que no todos los pasos tendrán el mismo diámetro en el centro, haciendo que existan distintas velocidades tangenciales en la máquina.

Lo anterior se hace a propósito, de manera que el último paso siempre tenga el mayor diámetro, de manera que los pasos anteriores tengan siempre un diámetro menor y así asegurar que la máquina vaya siempre “tirando” al producto desde el último paso al primero.

Si no se respeta esto, se genera un conflicto, debido a que un paso anterior podría empujar el producto con respecto al paso siguiente y generar un enredo de material en el tren de formación como se observa a continuación:

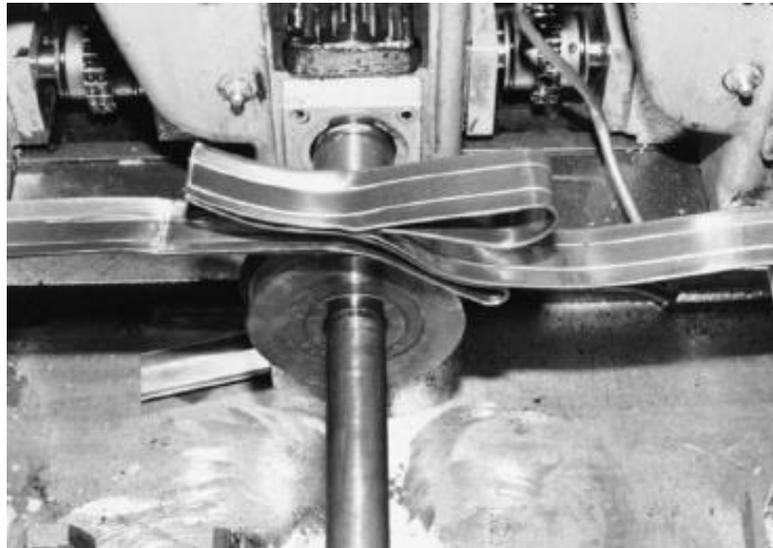


Figura 9: Enredo de material en paso formador: HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-46 p.

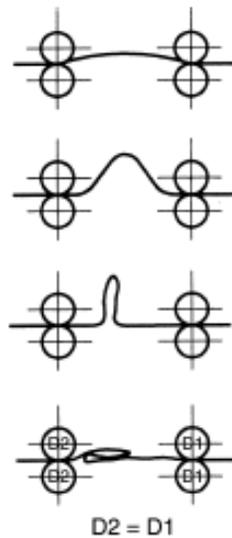


Figura 10: Proceso de enredo de material en paso formador: HALMOS, *Roll Forming Handbook* (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL, USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 5-46 p.

Para prevenir lo anterior, el diseñador de la línea debe ir aumentando el diámetro de los rodillos gradualmente en el orden de 0,4 a 0,6 mm. Este aumento en el diámetro no debe ser mucho, de lo contrario la velocidad tangencial de los rodillos podría generar que el material se estire entre un paso y otro.

3.5. Potencia del tren de formación

Usualmente, la potencia del motor a utilizar, se realiza en base a máquinas y productos similares, de forma empírica, midiendo el consumo de otros motores de máquina similares y aplicando algún factor de seguridad. Sin embargo, esto puede traer consecuencias negativas, ya que el motor seleccionado puede ser muy pequeño para el trabajo solicitado, lo que traerá pérdidas económicas, o también puede utilizarse un motor demasiado grande y realizar una inversión excesiva.

En un esfuerzo por llegar a una ecuación matemática para definir la carga en los rodillos formadores, Bhattacharyya en 1987⁴, llegó a la siguiente ecuación:

⁴ THE prediction of roll load in cold roll-forming por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987

$$F = Y \sqrt{\frac{2t^3\theta^3a}{3 \sin^2 \theta}} + \frac{3hEI}{(D - X)^3}$$

Ecuación 2: Carga en los rodillos formadores de un paso en un tren de formación. THE prediction of roll load in cold roll-forming por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987

Donde:

F = Carga en el rodillo

Y = Esfuerzo de fluencia del material

t = Espesor del material

θ = Es el ángulo de incrementación en la flor desde el paso previo hasta el actual

a = Largo del ala que se deforma con respecto al ángulo θ

h = Elevación vertical que tiene el producto en el siguiente paso con respecto al punto de apoyo

E = Modulo de Young del material

I = Segundo Momento de Área o Segundo Momento de Inercia

D = Distancia horizontal entre pasos

x = Distancia horizontal desde el centro del rodillo en donde el producto hace contacto con este.

Se observa que la ecuación anterior tiene dos partes. La primera parte de la ecuación corresponde a la flexión y estiramiento del perfil a medida que se va formando, mientras que la segunda representa la fuerza hacia abajo que ejerce el perfil sobre el paso debido a que el fleje se curva hacia abajo en el paso anterior y luego se levanta en el paso a calcular

Las principales variables del primer término se muestran a continuación:

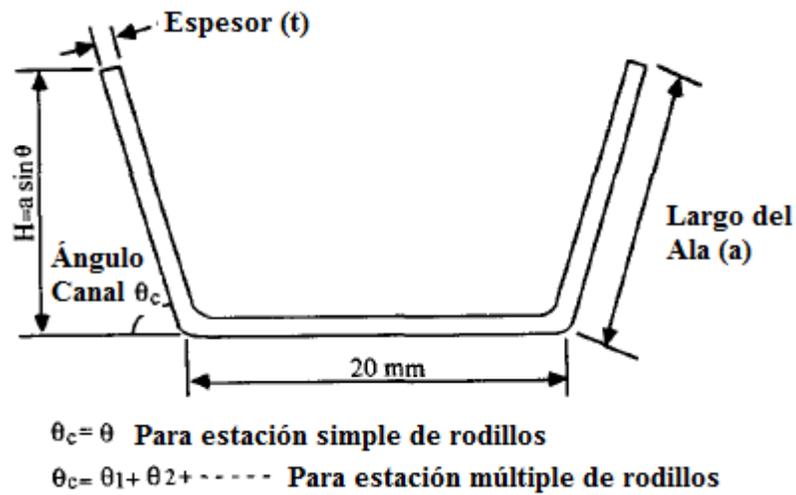


Figura 11 Vista transversal de un perfil con las variables principales. THE PREDICTION OF ROLL LOAD IN COLD ROLL-FORMING por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987

Las principales variables del segundo término se muestran a continuación:

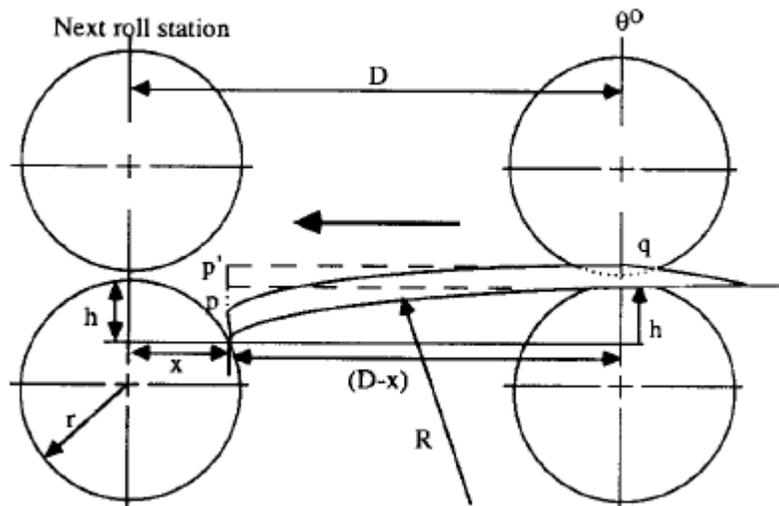


Figura 12 Vista lateral dos pasos con las variables principales. THE PREDICTION OF ROLL LOAD IN COLD ROLL-FORMING por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987

La ecuación propuesta por Bhattacharyya, difiere entre un 0% - 20% con los resultados medidos empíricamente en su trabajo, por lo que si se aplica se podría obtener valores muy cercanos a los reales.

3.6. Elementos principales de una línea de perfilado

Una línea de perfilado, o perfiladora, consta de más elementos aparte del tren de formación. Los elementos principales son:

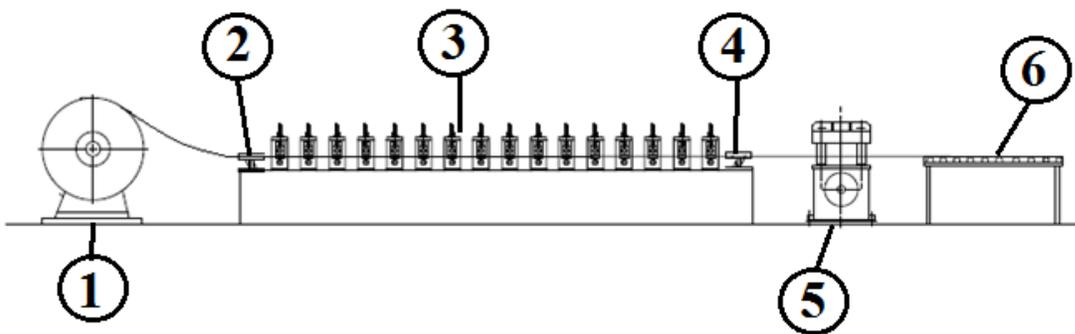


Figura 13: Vista frontal línea de formación. Modificación de figura de HALMOS, *Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing)*, 1st Ed. Boca Raton, FL, USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 4-12 p.

- 1. Desenrollador:** En este se monta el material o fleje que se quiere procesar, este puede ser accionado por la bancada al tirar del material, como también puede tener motorización eléctrica, neumática o hidráulica. Este puede ser simple o doble.
- 2. Guía de entrada:** Esta se encarga de que el material entre de forma centrada al tren de formación. Siempre habrá una o más al inicio del tren de formación y pueden haber otras intermedias entre algunos pasos.
- 3. Tren de formación:** Aquí se forma el producto, el motor del tren de formación se encarga de tirar el producto hasta el final del tren. Generalmente tiene un sistema de lubricación para que el material fluya de mejor manera a través de los rodillos formadores.

4. **Enderezador:** Se encarga de alinear el producto para que pueda ingresar de manera correcta al proceso de corte.
5. **Sistema de corte:** Acá se corta el producto según el largo deseado, este sistema puede ser por disco de sierra, corte con pérdida de material (tipo punzón) o corte por cizalle (sin pérdida de material), puede ser accionado mediante un motor, de forma neumática o hidráulica. También puede ser estático o volante (corte sin detención del producto)
6. **Mesa de Salida:** Luego del corte el material se deposita sobre la mesa de salida para su posterior traslado.

Existen muchos elementos que se pueden agregar a una perfiladora, con el fin de aumentar su productividad total e integrar procesos de manera de obtener un producto final en una sola pasada, como se ve a continuación.

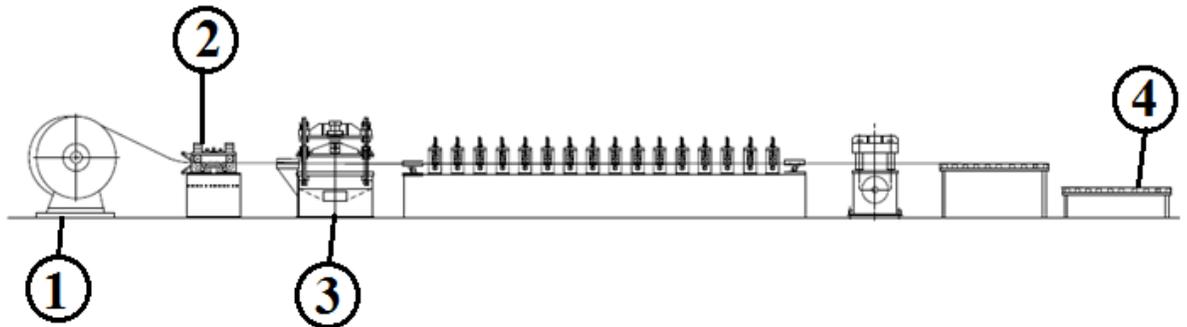


Figura 14 Vista frontal línea de formación. Modificación de figura de HALMOS, *Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing)*, 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006. 4-12 p.

Algunos de los elementos agregados en la figura anterior son:

1. **Desenrollador doble:** Permite al operador montar el siguiente fleje en el desenrollador sin detener la perfiladora.
2. **Soldador de Punta y Cola:** Permite unir la parte posterior del fleje que se acaba, con la punta del nuevo fleje. De esta manera el operador no debe enhebrar cada vez que se acaba el fleje.

3. **Sistema de Perforado:** Existen productos que llevan perforaciones con distintos fines, este proceso se puede integrar previamente al tren de formación y así evitar un reproceso del producto.
4. **Mesa de Bulto:** Luego de la mesa de salida, se puede acumular una cierta cantidad de material en un bulto para ser retirada posteriormente y no detener el proceso por mesa de salida llena.

Se observa que una perfiladora puede partir con un formato muy básico, y con el tiempo convertirse en una línea de producción muy completa. Hoy en día, con la ayuda de los sistemas de control electrónicos, se pueden controlar todos los elementos de una perfiladora de forma muy precisa y segura, reduciendo los tiempos de producción, mano de obra y aumentando la seguridad mediante la inclusión de sensores, relés térmicos, protecciones de elementos para cuidar tanto del operador como también de los propios elementos de la máquina.

4. Análisis de la industria y sus capacidades productivas

4.1. Normas aplicadas a la industria

La industria de los productos perfilados se encuentra presente alrededor de todo el mundo, haciendo necesario establecer estándares de calidad para los productos obtenidos mediante este proceso de transformación.

Existen muchas normas que se encargan de asegurar que un producto cuenta con ciertas características mínimas que hacen factible su utilización en un ámbito específico. Estas normas pueden ser tanto locales como globales.

En la industria del perfilado, existen distintas normas que se pueden aplicar tanto a la empresa productora y sus procesos como también normas enfocadas al producto y su calidad final. En este caso, se analizarán las normas que hacen referencia al producto terminado.

En el caso de productos perfilados, se tienen propiedades tanto del material que se está procesando, como también del producto final que se está comercializando, algunas de las propiedades principales son:

- **Denominación de los aceros:** Propiedades químicas y mecánicas del acero utilizado.
- **Tipo de recubrimiento:** Propiedades del recubrimiento del material.
- **Producto terminado:** Dimensiones del producto final y tolerancias

4.1.1. Norma aplicada a la denominación de los aceros

La American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE) se han encargado de denominar los aceros al carbono y aleados utilizando cuatro dígitos. Los dos primeros indican los elementos aleantes y sus porcentajes, mientras que los otros dos indican el contenido de carbono en peso. Por otro lado la American Society for Testing and Materials (ASTM) presenta otro sistema de numeración incorporando las denominaciones de las dos entidades mencionadas anteriormente, incluyendo especificaciones estándar para los productos de acero. En el caso de metales ferrosos, la denominación consiste en la letra “A” seguida de número arbitrarios.

El sistema de numeración unificado, Unified Numbering System (UNS), adoptado ampliamente por la industria de metales ferrosos y no ferrosos, consta de una letra que indica

la clase general de la aleación, seguido de cinco dígitos que denominan la composición química. Estas letras son:

G: Acero AISI y SAE al carbono y aleados.

J: Aceros fundidos.

K: Aceros diversos y aleaciones ferrosas.

S: Aceros inoxidable y superaleaciones.

T: Aceros para herramientas.

A continuación se observa una tabla con los distintos tipos de acero al carbono y aleados (tipo G):

Designación		TIPOS DE ACEROS
AISI - SAE	UNS	
10XX	G10XXX	Aceros al Carbono comunes
11XX	G11XXX	Aceros maquinables, con alto S
12XX	G12XXX	Aceros maquinables, con alto P y S
13XX	G13XXX	Aceros al Manganeso, con 1,75 % Mn
15XX	G15XXX	Aceros al Manganeso, con Mn sobre 1%
40XX	G40XXX	Aceros al Molibdeno, con 0,25% Mo
41XX	G41XXX	Aceros al Cromo-Molibdeno, con 0,40 a 1,1% Cr y 0,08 a 0,35% Mo
43XX	G43XXX	Aceros al Ni-Cr-Mo, con 1,65 a 2% Ni, 0,4 a 0,9% Cr y 0,2 a 0,3% Mo
46XX	G46XXX	Aceros Ni-Mo, con 0,7 a 2% Ni y 0,15 a 0,3% Mo
47XX	G47XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 1,05% Ni, 0,45% Cr y 0,2% Mo
48XX	G48XXX	Aceros NI-Mo, con 3,25 a 3,25% Ni y 0,2 a 0,3% Mo
51XX	G51XXX	Aceros al Cromo, con 0,7 a 1,1% Cr
E51100	G51986	Aceros al Cromo (horno eléctrico), con 1,0% Cr
E52100	G52986	Aceros al Cromo (horno eléctrico), con 1,45% Cr
61XX	G61XXX	Aceros Cr-V, con 0,6 a 0,95% Cr y 0,1 o 0,15% V mínimo
86XX	G86XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,55% Ni, 0,5% Cr y 0,2% Mo
87XX	G87XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,55% Ni, 0,5% Cr y 0,25% Mo
88XX	G88XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,55% Ni, 0,5% Cr y 0,3 a 0,4% Mo

9260	G92XXX	Aceros al Silicio, con 1,8 a 2,2% Si
50BXX	G50XXX	Aceros al Cr, con 0,2 a 0,6% Cr y 0,0005 a 0,003% boro
51B60	G51601	Aceros al Cr, con 0,8% Cr y 0,0005 a 0,003% boro
81B45	G81B51	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,3% Ni, 0,45 de Cr, 0,12% Mo y 0,0005 a 0,003% B
94BXX	G94XXX	Aceros Ni-Cr-Mo, con 0,45% Ni, 0,4 de Cr, 0,12% Mo y 0,0005 a 0,003% B

Tabla 2: Sistemas SAE, AISI y UNS para clasificar aceros. Compendio de normas para productos de acero, GERDAU AZA., 3era. Ed. Renca, Santiago, Chile., 2000. 4-12 p.

4.1.2. Norma aplicada al recubrimiento del material

En algunos casos, es necesario que el producto tenga un recubrimiento para tener una mayor resistencia en ambientes corrosivos, como por ejemplo lugares costeros donde la concentración salina y la humedad son muy altas. En ámbitos como la construcción, transporte, agricultura, generación de energía, automotriz, etc... es esencial una buena protección a la corrosión para tener una mayor durabilidad del material.

En el caso del acero, es muy común utilizar zinc fundido para recubrir la pieza terminada o la lámina de acero. Para el caso de los perfiles de acero, y con el fin de aumentar la productividad del proceso, se compra la bobina de acero galvanizada previamente, para luego ser procesada en la perfiladora.

El proceso de galvanizado consta de sumergir el material en Zinc fundido a unos 450 °C, en donde el espesor del recubrimiento se controla mediante la acción de limpieza de una corriente de aire o vapor. El espesor de este recubrimiento se mide en peso por unidad de área generalmente entre 150 a 900 g/m².⁵

La norma ASTM A123⁶ especifica los revestimientos de Zinc (galvanizados por inmersión en caliente) en productos de fierro y acero, hechos de secciones laminadas y forjadas, piezas fundidas, placas, barras y flejes.

⁵ KALPAKJIAN y SEROPE. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5a ed. México. Prentice Hall, 2008. 1074 p

⁶ ASTM International, *Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products, ASTM A123 / A123M-17*, West Conshohocken, PA, 2017.

Cubre tanto productos fabricados como no fabricados, por ejemplo, productos de acero ensamblados, fabricaciones estructurales de acero, tubos grandes ya doblados o soldados antes del galvanizado, y trabajos en alambre fabricados con alambre de acero no recubierto.

Esta especificación no se aplica al alambre, cañerías, tubos ni láminas de acero galvanizados en línea especializadas o continuas ni al acero de menos de calibre 22 (0,76 mm) de espesor.

De lo anterior, se observa que esta norma se aplica a flejes, el cual corresponde al material que se monta en el desenrollador para luego ingresar a la línea de perfilado y obtener el producto final.

La norma UNE-EN ISO 1461⁷ especifica las propiedades generales y los métodos de ensayo de los recubrimientos aplicados mediante inmersión de productos acabados de hierro y acero (incluidas ciertas piezas de fundición) en un baño de Zinc fundido (que no contenga más del 2% de otros metales). Esta norma no es aplicable a las chapas, a los alambres y a los productos de tela metálica tejida o soldada galvanizados en caliente en continuo; A los tubos y conductos galvanizados en caliente en instalaciones automáticas; a los productos galvanizados en caliente (como elementos de fijación) para los que existan normas específicas que pueden incluir requisitos adicionales o diferentes de los que contiene esta norma internacional.

La norma NCh3346:2013⁸ especifica los recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero como también requisitos y métodos de ensayo.

La norma NCh3348/1:2014⁹ especifica los recubrimientos de zinc - Orientaciones y recomendaciones para la protección en contra de la corrosión de hierro y acero en estructuras - Parte 1: Principios generales de diseño y resistencia a la corrosión.

⁷ ASOCIACIÓN Española de Normalización y Certificación (AENOR), Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero, UNE-EN ISO 1461, Génova, Madrid, España.

⁸ INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Recubrimientos de galvanización en caliente sobre piezas de hierro y acero - Requisitos y métodos de ensayo. NCh 3346:2013. Santiago, 2013.

⁹ INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Recubrimientos de zinc - Orientaciones y recomendaciones para la protección en contra de la corrosión de hierro y acero en estructuras - Parte 1: Principios generales de diseño y resistencia a la corrosión. NCh3348/1:2014. Santiago, 2014.

La norma NCh3348/2:2014¹⁰ especifica los recubrimientos de zinc - Orientaciones y recomendaciones para la protección en contra de la corrosión de hierro y acero en estructuras - Parte 2: Galvanización en caliente.

4.1.3. Norma aplicada al producto terminado

En el caso de producto terminado, existen algunas normas que se aplican pero que no son comúnmente utilizadas por las empresas nacionales.

La norma **NCh3576:2018¹¹** especifica: Acero - Perfil abierto estructural de acero al carbono conformado en frío - Requisitos.

Sin embargo, es común que las empresas se basen en sus propias normas en cuanto al producto terminado, por ejemplo, tolerancias de largos, espesores, radios, ángulos, distancia de perforaciones etc. De esta manera, las empresas pueden tener un mayor control, según sea la calidad de sus máquinas perfiladoras.

Dentro de las principales empresas del rubro del acero, existen normas internas tales como:

- **Norma IMEL 202-MA-7-2¹²** – Norma interna empresa IMEL que especifica características generales de rectángulos de grandes dimensiones.
- **Norma ET-11/MA-7-2¹³** – Norma interna empresa CINTAC que abarca perfiles abiertos tales como ángulos, costaneras y canales.

¹⁰ INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Recubrimientos de zinc - Orientaciones y recomendaciones para la protección en contra de la corrosión de hierro y acero en estructuras - Parte 2: Galvanización en caliente. NCh3348/2:2014. Santiago, 2014.

¹¹ INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Acero - Perfil abierto estructural de acero al carbono conformado en frío - Requisitos. NCh3576:2018. Santiago, 2018.

¹² IMEL [en línea] <http://www.imel.cl/html-productos/perfiles-grandes-dimensiones-rectangulos.html> [Consulta: 27 septiembre 2019]

¹³ CINTAC [en línea] <https://www.cintac.cl/pdf/Catalogo-productos-y-sistemas-cintac-febrero-2019.pdf> [Consulta: 27 septiembre 2019]

4.2. Capacidades productivas

El consumo aparente de productos finalizados de acero en Chile, para el año 2017, fue de 2,8 millones de toneladas¹⁴. El consumo aparente o ASU por sus siglas en inglés (Apparent Steel Use), se define como la producción más las importaciones netas y menos las exportaciones netas.

Las exportaciones de productos terminados de acero el año 2017, fueron de 99 mil toneladas, mientras que las importaciones de productos terminados de acero el mismo año fueron de 1,719 Millones de Toneladas.¹⁵

Tomando en cuenta lo anterior, en base a la definición de consumo aparente, se puede obtener una producción nacional de productos terminados. Al consumo aparente, se le suman las exportaciones y se le restan las importaciones, dando como resultado una producción nacional de 1,18 millones de toneladas de productos terminados de acero para el año 2017.

Los productos terminados refieren al acero incluido en alguno de estos 3 grupos: Productos largos (acero para concreto, barras, alambón, **perfiles**, rieles), aceros planos (hojas y bobinas laminadas, recubiertas, prepintadas, acero inoxidable, hojalata, cincados, cromados) y tubos sin costura.¹⁶

Considerando que no existe producción de tubos sin costura, aceros planos ni rieles, quedan dentro de la producción nacional anterior el acero para concreto, barras, alambón y perfiles.

¹⁴ ASOCIACIÓN Latinoamericana del Acero (ALACERO). América Latina en Cifras 2018. [en línea]. Sao Paulo, SP, Brasil.
<https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america_latina_en_cifras_2018_es-en.pdf>
[Consulta: 28 septiembre 2019]

¹⁵ ASOCIACIÓN Latinoamericana del Acero (ALACERO). América Latina en Cifras 2018. [en línea]. Sao Paulo, SP, Brasil.
<https://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america_latina_en_cifras_2018_es-en.pdf>
[Consulta: 28 septiembre 2019]

¹⁶ INSTITUTO Chileno del Acero (ICHA). América Latina presentó mejoría de producción y consumo de acero durante el 1er semestre de 2017 [en línea]. <<https://icha.cl/america-latina-presento-mejoria-de-produccion-y-consumo-de-acero-durante-el-1er-semestre-de-2017/>> [Consulta: 28 septiembre 2019]

Según la Cámara Chilena de la Construcción el índice de despacho de barras de acero para el año 2017 fue del orden de 500 mil toneladas¹⁷

Descontándole el valor anterior a la producción nacional de 1,08 Millones de Toneladas, queda un total de 680 mil toneladas de productos terminados de acero (sin considerar las barras), las cuales quedarían dispuestas a la producción nacional de Perfiles y Alambrón.

Una empresa que su principal enfoque es la producción de perfiles de acero, es CINTAC S.A.I.C. Esta empresa en su memoria anual del año 2017, indicó que despachó durante el mismo año 223 mil toneladas de acero¹⁸.

Analizando la variedad de productos de esta empresa, se observa que abarca cuatro sectores principales correspondientes a: Construcción, Industrial, Infraestructura, Vial y el de Comercialización. Dentro de todas los sectores que enfocan su producción, alrededor de un 90% corresponden al procesamiento de procesamiento del acero mediante conformación en frío, ya sean como perfiles, paneles, cubiertas, Metalcon®, TuBest®, etc...

Es por esto que aproximadamente CINTAC S.A.I.C., despachó un aproximado de 200 Mil Toneladas en el año 2017, correspondiente a acero procesado en frío y conformado mediante un tren de formación, en base a lo visto en los capítulos anteriores.

De lo anterior se tiene que la capacidad productiva nacional en producción de materiales conformados en frío, mediante un tren de formación para obtener un producto final tal como perfil, panel, cubierta, etc. se encuentra entre las 200 y 680 mil toneladas por año.

¹⁷ CAMARA Chilena de la Construcción. Indicador: Índice Despacho de barras de acero [en línea]. <<https://www.cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/despacho-de-barras-de-acero>> [Consulta: 28 septiembre 2019]

¹⁸ CINTAC. Memoria Anual 2017 [en línea]. Santiago, Chile. <<https://www.cintac.cl/wp-content/uploads/2018/03/Memoria-Cintac-Final-2017.compressed.pdf>> [Consulta: 30 septiembre 2019]

5. Propuesta de repotenciamiento – Análisis teórico y Desarrollo empírico

Generalmente las inversiones en el ámbito de perfiladoras, se realizan en base a un estudio de demanda del mercado y en base a una proyección de este. En el caso de productos comunes como ángulos, canales, costaneras, etc. el estudio tiene una mayor precisión, ya que va de la mano con el crecimiento del mercado de la construcción. En el caso de otros productos, más específicos y con otros fines (ej: perfiles para la agronomía), el estudio puede tener menor precisión y con la incorporación de una perfiladora nueva, el interés de distintos clientes puede hacer que rápidamente la capacidad de la perfiladora se vea sobrepasada.

Al momento de tener en producción la perfiladora y tener un aumento en la demanda del producto, existen distintas opciones para satisfacer esta demanda:

- Continuar con la perfiladora y dejar que la demanda la satisfaga otra compañía
- Invertir en una nueva perfiladora
- Repotenciar la perfiladora actual

La inversión de una nueva perfiladora implica generalmente un mayor tiempo de proyecto, ya que se debe solicitar la inversión (generalmente para el año siguiente), considerar mano de obra extra para operar la nueva máquina, considerar tiempo de fabricación de la perfiladora y traslado, entre otros factores.

Repotenciar una perfiladora, es un proceso que puede hacerse en un par de semanas si el proyecto se realiza de forma correcta.

En este caso particular, se tiene una perfiladora con una cierta velocidad y una demanda que sobrepasa la capacidad de producción. Considerando las distintas opciones descritas anteriormente, se observa que la opción más viable y rápida, considera en repotenciar la perfiladora actual ya que tiene beneficios como:

- Bajo tiempo de implementación.
- Menor gasto de inversión.
- Se mantiene la misma cantidad de operadores en la perfiladora.

Es por esto que el repotenciamiento de una perfiladora es muy común en la industria, y en algunos casos es la opción más viable para satisfacer la demanda existente de una forma rápida y segura.

5.1. Situación actual de la perfiladora

Se pretende repotenciar una máquina perfiladora con el fin de aumentar su productividad total. La máquina en cuestión cuenta con los siguientes componentes:

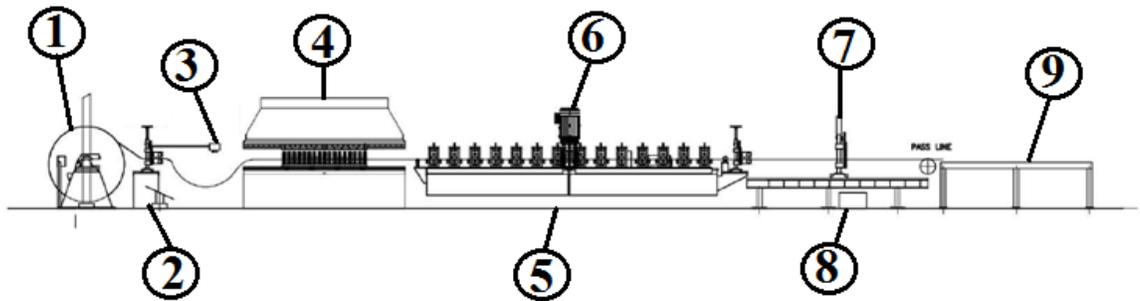


Figura 15 Vista alzado de la distribución de la perfiladora a modificar. [Elaboración propia, 2019]

Los elementos principales son:

1. **Desenrollador:** De tipo simple con sistema de freno neumático, para evitar embalamiento.
2. **Pinch Roll:** Este se encarga de tirar el material del desenrollador, mediante dos polines y un motor, para formar un loop antes del plegado y evitar que la bancada formadora tire directamente desde el desenrollador.
3. **Sensor Loop:** Este sensor controla el accionamiento del pinch roll, a mayor profundidad del loop, el pinch roll girará a menor velocidad y viceversa.
4. **Plegadora:** Se encarga de realizar el proceso de perforado.
5. **Tren de formación:** Se encarga de dar la forma al producto final.
6. **Motor principal bancada:** Encargado de transmitir movimiento a los rodillos formadores del tren de formación.
7. **Carro de corte:** Volante, corta a la velocidad de la línea.
8. **Central hidráulica:** Activa el movimiento del cilindro hidráulico para realizar el corte.
9. **Mesa de salida:** Aquí se deposita el producto final.

Las características principales de los elementos anteriores son:

DESENROLLADOR		
Tipo	Simple	
Capacidad	3	[Ton]
PINCH ROLL		
Potencia Motor	4	[kW]
Velocidad Tangencial [m/min]	19,1	[m/min]
SENSOR LOOP		
Rango medición	2	[m]
PLEGADORA		
Carga Nominal [kN]	1250	[kN]
Tiempo de ciclo de Punzonado [s]	2,5	[s]
TREN DE FORMACIÓN		
Potencia Motor	15	[kW]
Velocidad de giro motor	1495	[RPM]
Índice de reducción reductor	48,57	[-]
Velocidad salida reductor	30,8	[RPM]
Diámetro de cama	132,0	[mm]
Velocidad tangencial	12,8	[m/min]
Velocidad promedio de producción	7,2	[m/min]
CARRO DE CORTE		
Velocidad máxima corte	50	[m/min]
Ciclo de Corte [s]	0,5	[s]

Tabla 3. Características principales de la perfiladora a modificar. [Elaboración propia, 2019]

5.2. Producción actual de la perfiladora

La producción mensual de la perfiladora se puede analizar para dos productos distintos.

- **Producto no perforado:** El producto no lleva perforaciones.
- **Producto perforado:** El producto debe ser perforado en la misma línea de producción.

A continuación se observan ambas producciones mensuales.

5.2.1. Producción mensual producto no perforado

Se observa que la perfiladora tiene una velocidad tangencial máxima de 12,8 [m/min]

Considerando que el producto tiene un desarrollo de 125 [mm], un espesor de 1,5 [mm] y un largo estándar de 2.400 [mm], cada unidad tiene una masa de 3,53 [kg].

Considerando la velocidad de línea de 12,8 [m/min] a un largo de 2,4 [m] de producto, se pueden producir 5,3 productos por minuto, lo que implica una masa de 18,8 [kg/min]. Lo anterior llevado a un total de 180 [horas/mes] da un total de 203,0 [Ton/mes] de producto.

El valor anterior, al aplicarle un OEE¹⁹ de un 50%, da un total de 101,5 [Ton/mes]. Este valor será el estándar para compararlo con la producción mensual luego del repotenciamiento de la perfiladora.

5.2.2. Producción mensual producto perforado

La perfiladora, tiene una velocidad tangencial máxima de 12,8 [m/min], sin embargo, se debe detener el producto para realizar el proceso de perforado. Considerando estas detenciones, se obtiene una velocidad promedio de línea de 7,2 [m/min].

Considerando que el producto tiene un desarrollo de 125 [mm], un espesor de 1,5 [mm] y un largo estándar de 2.400 [mm], cada unidad tiene una masa de 3,53 [kg].

Considerando la velocidad de línea de 7,2 [m/min] a un largo de 2,4 [m] de producto, se pueden producir 3 productos por minuto, lo que implica una masa de 10,6 [kg/min]. Lo anterior llevado a un total de 180 [horas/mes] da un total de 114,5 [Ton/mes] de producto.

El valor anterior, al aplicarle un OEE de un 50%, da un total de 57,2 [Ton/mes]. Este valor será el estándar para compararlo con la producción mensual luego del repotenciamiento de la perfiladora.

¹⁹ Overall Equipment Efficiency o Eficiencia General del Equipo

5.3. Propuesta de repotenciamiento

Se pretende aumentar la velocidad de la máquina a 40 [m/min] y eliminar la detención del tren de formación para realizar el proceso de perforado. Esto se realizará con dos modificaciones principales en la perfiladora:

- **Reemplazo del motor principal del tren de formación:** Con el fin alcanzar los 40 [m/min] en el tren de formación, se deberá reemplazar el sistema motor-reductor principal de la perfiladora.
- **Modificación del Layout de la máquina:** Agregando y modificando elementos, se debe lograr que la perfiladora no se detenga para realizar el proceso de perforado.

A continuación se desarrollaran los dos puntos anteriores.

5.3.1. Reemplazo del motor principal del tren de formación

Para aumentar la velocidad de la máquina (sin cambiar de producto) se debe reemplazar el conjunto motor-reductor que tiene el tren de formación. Se sabe que el motor del tren de formación es de 15 [kW], sin embargo, se considerará que no se tiene conocimiento de exactamente cuanta potencia se consume para conformar el producto.

Se sabe que la potencia de un motor está definida por la multiplicación del torque por la velocidad angular de este. Conociendo la potencia nominal del motor, de 15 [kW] se podría multiplicar por la relación de aumento de velocidad que se quiere obtener (manteniendo el torque constante) y así definir una nueva potencia, sin embargo, si el motor solo consume, por ejemplo, un 30% de la potencia nominal se estaría sobredimensionando mucho el nuevo motor, es por esto que se puede utilizar la ecuación de Bhattacharyya, vista en el punto 3.6 para obtener un consumo de potencia teórico para conformar el producto.

$$F = Y \sqrt{\frac{2t^3\theta^3 a}{3 \sin^2 \theta}} + \frac{3hEI}{(D - X)^3}$$

Ecuación 3. Carga en los rodillos formadores de un paso en un tren de formación. THE prediction of roll load in cold roll-forming por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987

Para encontrar la carga (F) que hace el producto al pasar por el rodillo formador se deben encontrar las distintas variables que componen la ecuación, en la siguiente tabla se resumen todas las variables y como encontrarlas:

Variable de la ecuación	Estado
Y = Esfuerzo de fluencia del material	Se conoce de las propiedades del material
E = Modulo de Young del material	Se conoce de las propiedades del material
t = Espesor del material	Se conoce del producto
D = Distancia horizontal entre pasos	Se conoce del tren de formación
h = Elevación vertical que tiene el producto en el siguiente paso con respecto al punto de apoyo	Se debe obtener empíricamente
x = Distancia horizontal desde el centro del rodillo en donde el producto hace contacto con este.	Se debe obtener empíricamente
θ = Es el ángulo de incrementación en la flor desde el paso previo hasta el actual	Se obtiene con la flor del producto
a = Largo del ala que se deforma en con respecto al ángulo θ	Se obtiene con la flor del producto
I = Segundo Momento de Área o Segundo Momento de Inercia	Se obtiene con la flor del producto

Tabla 4. Variables de la ecuación de Bhattacharyya junto con el estado de cada una. [Elaboración propia, 2019]

El producto a conformar es acero A653 SS255, correspondiente a galvanizado en caliente y con las siguientes propiedades de nuestro interés:

Variable de la ecuación	Valor	Unidad
Y = Esfuerzo de fluencia del material ²⁰	255	[MPa]
E = Modulo de Young del material ²¹	200	[GPa]

Tabla 5. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a las propiedades mecánicas del acero con que trabaja la perfiladora. [Elaboración propia, 2019]

²⁰ AK Steel. Hot Dip Galvanized Steel [en línea]. <<https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-11/hot-dip-galvanized-steel.pdf>> [Consulta: 3 Octubre 2019]

²¹ AK Steel. Hot Dip Galvanized Steel [en línea]. <<https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-11/hot-dip-galvanized-steel.pdf>> [Consulta: 3 Octubre 2019]

Los valores propios de la máquina y del producto son:

Variable de la ecuación	Valor	Unidad
t = Espesor del material	1,5	[mm]
D = Distancia horizontal entre pasos	457	[mm]

Tabla 6. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a las dimensiones del material y del tren de formación. [Elaboración propia, 2019]

La elevación vertical que tiene el producto en el siguiente paso con respecto al punto de apoyo (h) junto con la distancia horizontal desde el centro del rodillo en donde el producto hace contacto con este (x), se considerarán como constante y un valor pequeño considerando lo visto en el proceso de enhebrado del material en el tren de formación, estos valores se consideran como:

Variable de la ecuación	Valor	Unidad
h = Elevación vertical que tiene el producto en el siguiente paso con respecto al punto de apoyo	1,5	[mm]
x = Distancia horizontal desde el centro del rodillo en donde el producto hace contacto con este.	16	[mm]

Tabla 7. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a las distancias del perfil con respecto a los puntos de los rodillos formadores del siguiente paso. [Elaboración propia, 2019]

Las otras tres variables (ángulo, largo del ala y segundo momento de área), se deben obtener mediante el análisis de la flor del producto a lo largo de los 14 pasos del tren de formación (ver anexo). En la siguiente tabla se observan estos:

Paso	Ángulo de incrementación θ [°]	Segundo Momento de Área I_y [mm ⁴]	Largo del ala a [mm]
1	20	$2,31 \cdot 10^5$	8
2	18	$2,29 \cdot 10^5$	8
3	15	$2,28 \cdot 10^5$	16
4	15	$2,21 \cdot 10^5$	16
5	36	$2,23 \cdot 10^5$	11
6	15	$2,19 \cdot 10^5$	16
7	15	$2,14 \cdot 10^5$	16

8	14	$1,94 \cdot 10^5$	42,5
9	14	$1,72 \cdot 10^5$	42,5
10	14	$1,44 \cdot 10^5$	42,5
11	14	$1,16 \cdot 10^5$	42,5
12	12	$9,06 \cdot 10^4$	52,5
13	12	$6,62 \cdot 10^4$	52,5
14	10	$4,88 \cdot 10^4$	52,5

Tabla 8. Muestra las variables de la ecuación de Bhattacharyya en relación a cada paso, al ángulo de incrementación en la deformación del perfil, al segundo momento de área de la forma del perfil y el largo del ala a deformar. [Elaboración propia, 2019]

Las variables vistas en la tabla anterior, se obtienen a partir de la flor del producto mediante cálculo como también mediante software de dibujo como AUTOCAD®.

Reemplazando todos los valores en la ecuación de Bhattacharyya, se obtienen los siguientes resultados:

Paso	Ptf [N]	Plb [N]	Fuerza total [N]
1	652	2423	3075
2	616	2407	3023
3	792	2391	3183
4	792	2315	3107
5	1075	2343	3418
6	792	2301	3092
7	792	2249	3041
8	1245	2038	3283
9	1245	1802	3047
10	1245	1514	2759
11	1245	1218	2463
12	1278	951	2228
13	1278	695	1972
14	1164	512	1675

Tabla 9. Muestra los resultados del reemplazo de los valores anteriores en las dos partes de la ecuación de Bhattacharyya, dando como resultado la fuerza total en cada paso. [Elaboración propia, 2019]

Se observa en la primera columna, el número del paso. En la segunda y tercera, el primer y segundo ítem de la ecuación de Bhattacharyya respectivamente y en la cuarta la suma de estas dos.

Una vez encontrada la fuerza total en cada paso, se procede a multiplicarlo por la mitad del diámetro de cama de cada paso, para obtener el torque:

Paso	Fuerza total [N]	Diámetro de cama [mm]	Torque [Nm]
1	3075	119	183,0
2	3023	120	181,4
3	3183	121	192,5
4	3107	122	189,5
5	3418	123	210,2
6	3092	124	191,7
7	3041	125	190,1
8	3283	126	206,8
9	3047	127	193,5
10	2759	128	176,6
11	2463	129	158,9
12	2228	130	144,8
13	1972	131	129,2
14	1675	132	110,6

Tabla 10. Muestra los resultados del torque obtenido en cada paso del tren de formación. [Elaboración propia, 2019]

Conocido el valor de torque de cada paso, se puede obtener la potencia mecánica de cada paso. Esto se hace multiplicándolo por la velocidad angular del eje²² donde se encuentra el rodillo formador.

Para el caso de este tren de formación se tiene que la velocidad angular del motor principal es de 1465 [RPM], el cual se encuentra acoplado a un reductor, que tiene un índice de reducción de 1:48.57. Esta reducción implica una velocidad de salida del reductor de 30.16 [RPM],

²² ZAMORANO, Nelson. Introducción a la Mecánica. 1era Ed. Santiago, Chile. Editorial Universitaria SA, Santiago, Chile. 328p.

posterior al reductor, el sistema de transmisión del tren de formación tiene relación 1:1 hasta conectarse al eje inferior de los rodillos formadores. De esto se tiene que la velocidad angular de 30.16 [RPM] corresponde a 3.16 [rad/s]. Con esta velocidad angular, se puede obtener la potencia mecánica de cada paso:

Paso	Torque [Nm]	Velocidad angular [rad/s]	Potencia mecánica [kW]
1	183,0	3,16	0,58
2	181,4	3,16	0,57
3	192,5	3,16	0,61
4	189,5	3,16	0,60
5	210,2	3,16	0,66
6	191,7	3,16	0,61
7	190,1	3,16	0,60
8	206,8	3,16	0,65
9	193,5	3,16	0,61
10	176,6	3,16	0,56
11	158,9	3,16	0,50
12	144,8	3,16	0,46
13	129,2	3,16	0,41
14	110,6	3,16	0,35
POTENCIA TOTAL [kW]			7.77

Tabla 11. Muestra los resultados de potencia mecánica por paso y total del tren de formación en base al torque y la velocidad angular de cada paso. [Elaboración propia, 2019]

De la tabla anterior, se observa que la multiplicación de la segunda por la tercera columna, indican la potencia mecánica de cada paso, la que se refleja en la cuarta columna. La suma de potencia de todos los pasos corresponde a **7,77 [kW]**. (Ver anexo 7.1)

Se observa de lo anterior, que de una potencia nominal del motor de 15 [kW], teóricamente, se estarían usando 7,77 [kW] para conformar el material, correspondiente a un 52% de la capacidad nominal de este.

La suma del torque de cada paso de la tabla anterior corresponde a 2458 [Nm].

Para tener una velocidad de 40 [m/min] en el paso 14 (el que define el diámetro de cama), se debe tener una velocidad angular en el eje de 10,10 [rad/s] o 96,45 [RPM], misma velocidad angular que se tendrán en los 14 pasos y a la salida del reductor.

Al multiplicar la velocidad angular de los ejes, por la sumatoria de torque de cada eje, se tiene una potencia total de **24,77 [kW]**. Esta potencia se debe tener en cuenta para el dimensionamiento del nuevo motor.

Considerando un motor estándar, que gira a 1465 [RPM], el índice de reducción del reductor debe ser de 1:15.19, para obtener una velocidad de 40 [m/min] en el tren de formación.

5.3.2. Medición de consumo de motor.

En las pantallas de los tableros de control de las perfiladoras se muestran los datos que son más relevantes para el manejo y control de una línea, de esta manera el operador puede tomar decisiones rápidas en base a la información desplegada.

Es por esto que uno de los valores que se observan regularmente es el consumo de corriente del motor principal de la bancada formadora, obtenido directamente desde el variador de frecuencia o driver del motor principal.

Este consumo permitirá que el operador o supervisor observe que tan forzado se encuentra el motor en base al producto que se está procesando, y luego podrá tomar decisiones como soltar algunas pasos en caso de que la corriente sea muy alta o informar a mantenimiento en caso de que se sobrepase el límite nominal.

Para el caso del producto en cuestión, se observa que la corriente consumida por el motor, es de 51 [A], bajo una conexión trifásica de 380 [V]. En base a esto se puede obtener la potencia consumida por el motor en base a la siguiente ecuación:

$$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \cdot \cos\varphi$$

Ecuación 4 Potencia de la corriente alterna trifásica: KUZNETSOV, Fundamentos de Electrotecnia, 2da Ed. Moscú, Editorial MIR, 1967. 277 p.

Donde:

I: Corriente de la línea [A]

U: Tensión compuesta [V]

$\cos \varphi$: Factor de potencia

Considerando un factor de potencia de 0,82 según la placa del motor, una corriente de 51 [A], y un voltaje de 380 [V], se tiene:

$$P = 27,5 [kW]$$

De lo anterior se sabe que el producto consume 27,5 [kW] para formar el producto en cuestión a una velocidad de 40 [m/min].

5.3.3. Modificación del Layout de la máquina.

Para que el tren de formación de la perfiladora no se detenga a realizar el proceso perforado, se debe modificar el Layout actual de esta, agregando y reemplazando algunos componentes principales.

Para lograr lo anterior se realizarán las siguientes tareas principales:

- **Agregar pozos de acumulación de material:** Se deben agregar dos pozos de acumulación de material, antes y después del sistema de perforado.
- **Incorporación de un alimentador:** Este elemento permite el avance rápido del material entre cada ciclo de perforado.

A continuación se detallarán los puntos anteriores.

5.3.3.1. Agregar pozos de acumulación de material

Para lograr independizar el tren de formación con el proceso de perforado, se deben agregar dos pozos.

El primer pozo, ubicado antes del sistema de perforado, cumplirá la función de acumular material para que al momento de que se termine el ciclo de perforado, el alimentador (ubicado a continuación del sistema de perforado) disponga de material libre para tirar de este y poder realizar el siguiente ciclo de perforado.

El segundo pozo, ubicado después del sistema de perforado, cumplirá la función de acumular el material que tira el alimentador, para que el tren de formación, en el momento que se está realizando el ciclo de perforado, cuente con material para conformar.

A continuación se observa la forma de dimensionar ambos pozos.

- **Ancho:** Depende principalmente del desarrollo máximo del material que conformará la máquina.
- **Largo:** Depende de las propiedades del material que trabaja la máquina.
- **Profundidad:** Depende de cuánto material se quiera acumular en el pozo.

Ancho

Se sabe que el material que se conforma en la máquina tiene un desarrollo máximo de 125 [mm], por lo que el ancho del pozo podría ser sin problemas de 200 [mm]. Sin embargo, generalmente se debe considerar que el pozo debe permitir que una persona ingrese a este ante cualquier eventualidad, es por esto que el ancho del pozo se considerará de 600 [mm].

Largo

El largo del pozo depende de las propiedades del material, ya que este debe generar una curva al ingresar al pozo, otra curva al fondo y otra al salir del pozo, sin que se quiebre el material, ya que al quebrarse se pueden tener problemas en el perforado, alimentador o tren de formación.

Una forma utilizada de calcular el radio mínimo de curvatura (MBR) del material es:

$$MBR^{23} = 360 \cdot t$$

Ecuación 5. Radio mínimo de curvatura. THEIS, Henry. Handbook of Metalforming Processes. 1st ed. Herr-Voss Corporation Callery, Pennsylvania, USA. 254 p.

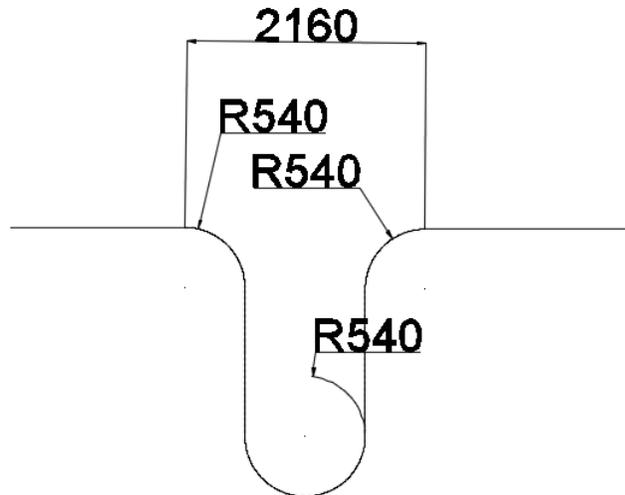
Donde:

MBR: Radio Mínimo de Curvatura o Minimum Bend Radius

t: Espesor del material [mm]

²³ THEIS, Henry. Handbook of Metalforming Processes. 1st ed. Herr-Voss Corporation Callery, Pennsylvania, USA. 254 p.

Para el caso del producto, se tiene un espesor de 1.5 mm, lo que al multiplicarlo por 360, da un MBR igual a 540 [mm]. De lo anterior se tiene que el largo del pozo debe ser:



*Figura 16. Comportamiento teórico con dimensiones del fleje según el radio mínimo de curvatura del material.
[Elaboración propia,2019]*

Se observa que entre la distancia entre el punto inicial donde comienza el radio de ingreso hacia el pozo y el punto final a la salida del pozo, hay una distancia de 2160 [mm], correspondientes a 4 MBR.

De lo anterior, se considerará el largo del pozo de 2500 [mm] para asegurar una holgura del material dentro de este.

Profundidad

Para definir la profundidad del pozo, se debe tener en cuenta la altura del material con respecto al suelo, en el punto donde se va a construir el pozo. En el caso de esta máquina, es igual a 1046 [mm]. Por otro lado se definirá que en el pozo se acumularán 3 tiras de material, correspondientes a un largo total de 7200 [mm] (recordar que el largo del producto es de 2400 [mm]). Teniendo esto se puede deducir la profundidad del pozo.

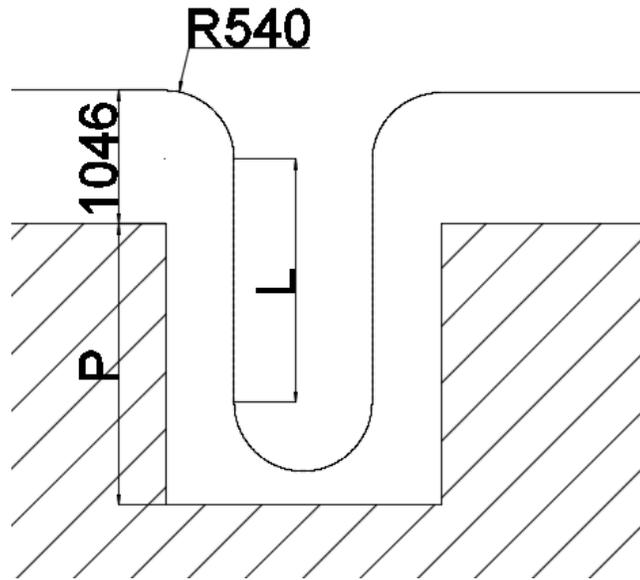


Figura 17. Pozo de almacenamiento de material según comportamiento del fleje. [Elaboración propia, 2019]

Se observa que P, corresponde a la profundidad del pozo y L al largo del material entre el radio de ingreso y el radio inferior. Primero se debe encontrar L. Sabiendo que se quiere acumular un largo de 7,200 [mm] dentro del pozo, se tiene:

$$\frac{2\pi r}{4} + \frac{2\pi r}{4} \cdot 2 + \frac{2\pi r}{4} + 2 \cdot L = 7200$$

Ecuación 6. Ecuación que define el comportamiento del fleje en el pozo para despejar largo "L". [Elaboración propia, 2019]

Se observa que al comienzo se tiene 1/4 del perímetro de una circunferencia, abajo del pozo se tiene 1/2 perímetro y a la salida de tiene 1/4 del perímetro, haciendo en total un perímetro completo de una circunferencia de radio 540. Por lo que la ecuación queda:

$$2\pi r + 2 \cdot L = 7200$$

Despejando L se obtiene:

$$L = 1904 \text{ [mm]}$$

Luego la distancia P corresponde a:

$$P + 1046 > L + 2 \cdot R$$

Ecuación 7. Inecuación para obtener la profundidad mínima del pozo "P". [Elaboración propia, 2019]

Se observa que la profundidad del pozo sumado a la altura del piso al material debe ser mayor que el largo L sumado 2 radios, esto implica:

$$P > 1904 + 2 \cdot 540 - 1046$$

$$P > 1937 \text{ [mm]}$$

Se observa que la profundidad del pozo debe ser mayor a 1937 [mm] para acumular 3 tiras de material en su interior, la profundidad final se definirá como 2200 [mm] de manera que el material tenga holgura al interior de este.

Dimensiones finales pozos

De lo anterior se tiene que los pozos deben tener las siguientes dimensiones:

Dimensión	Medida [mm]
Ancho	600
Largo	2500
Profundidad	2200

Tabla 12 Resumen de dimensiones del pozo. [Elaboración propia, 2019]

5.3.3.2. Incorporación de un alimentador

El alimentador permite tirar del material a una velocidad muy rápida y con poco tiempo de reacción, es por esto que se compone de un servomotor y dos polines, uno de los cuales (el inferior) se encuentra motorizado y el superior ejerce presión sobre el inferior mediante un cilindro neumático, ejerciendo presión sobre el fleje que se está tirando.

Para alcanzar la velocidad de 40 [m/min] incluyendo las detenciones para realizar el proceso de perforado, la velocidad del alimentador debe ser considerablemente superior que la del tren de formación. Conociendo el tiempo que toma el ciclo de plegado, de 2,5 [s], podemos obtener el tiempo que debe tener el alimentador para alimentar el largo de 2400 [mm] de la siguiente forma:

$$v = \frac{d}{t}$$

Ecuación 8. Movimiento Rectilíneo Uniforme. LARBURU, N., Máquinas Prontuario. Técnicas, Máquinas, Herramientas. 1era Ed. Imp. Ediciones Paraninfo SA. 1989. 114 p.

$$v_{\text{línea}} = \frac{\text{largo producto}}{\text{tiempo}_{\text{perforado}} + \text{tiempo}_{\text{alimentación}}}$$

$$40 \left[\frac{m}{\text{min}} \right] = 0,67 \left[\frac{m}{s} \right] = \frac{2,4 [m]}{2,5 [s] + t_{\text{alimentación}} [s]}$$

$$t_{\text{alimentación}} = 1,08 [s]$$

De lo anterior, se sabe que el tiempo de alimentación no puede superar 1.08 [s], de lo contrario el tren de formación superaría la velocidad promedio de la primera parte de la máquina, imposibilitando alcanzar una velocidad constante de 40 [m/min] de línea.

Para encontrar una velocidad aproximada del alimentador, de manera de encontrarlo en el mercado (sin considerar el tiempo de aceleración y desaceleración de este), se puede aproximar:

$$v_{\text{alim}} = \frac{2,4 [m]}{1,08 [s]}$$

$$v_{\text{alim}} = 2,22 \left[\frac{m}{s} \right] = 133,3 \left[\frac{m}{\text{min}} \right]$$

Se observa que la velocidad del alimentador debe superar los 133 [m/min] ya que se debe tener en cuenta la aceleración y desaceleración que tiene este para realizar el ciclo de alimentación.

A continuación se observan distintas alternativas de alimentadores, de la marca COE ServoMaster Serie 2.

Machine Specifications

Model CPRF SM-2	06	12	18	24	30
Maximum Material Width	6.0"	12.0"	18.0"	24.0"	30.0"
Thickness at Full Width	.187"	.156"	.125"	.090"	.060"
Maximum Velocity (FPM)	580	580	580	580	580
Maximum Acceleration (FPS ²)	80	70	60	50	40
Standard Drive Ratio*	2.4:1	2.4:1	2.4:1	2.4:1	2.4:1

Tabla 13. Especificaciones de alimentadores marca COE. COE Press Equipment. ServoMaster Series 2 Roll Feeds [en línea]. <https://www.cpec.com/uploads/2/7/3/7/27375281/3-servomaster_series_2.pdf> [Consulta: 15 Octubre 2019]

Se observa en rojo, en base al ancho máximo del material a conformar que modelo 06, puede trabajar hasta con 6.0'' o 152,4 [mm]. En base a este alimentador, su velocidad máxima y aceleración, se puede analizar si sirve para la prestación de esta máquina.

La velocidad máxima de este alimentador es de 580 [FPM] o 176,78 [m/min] o 2,95 [m/s] (superior a lo que se analizó anteriormente) y tiene una aceleración máxima de 80 [FPS] o 24,38 [m/s²].

Considerando la aceleración, se puede obtener el tiempo que demorará el alimentador en alcanzar la máxima velocidad:

$$a = \frac{V_f - V_0}{t}$$

Ecuación 9. Movimiento uniformemente acelerado. LARBURU, N., Máquinas Prontuario. Técnicas, Máquinas, Herramientas. 1era Ed. Imp. Ediciones Paraninfo SA. 1989. 116 p.

$$t = \frac{V_f - V_0}{a}$$

$$t = \frac{2,95 \left[\frac{m}{s} \right] - 0 \left[\frac{m}{s} \right]}{24,38 \left[\frac{m}{s^2} \right]}$$

$$t = 0,12 [s]$$

Este tiempo de 0.12 [m/min] se considerará como el mismo para la desaceleración. De lo anterior, se tiene que la distancia recorrida en este tiempo es de:

$$d_1 = V_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

$$d_1 = 0 + \frac{1}{2} \cdot 24,38 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 0,12^2$$

$$d_1 = 0,18 [m]$$

Se tiene que con un largo de producto de 2.4 [m], queda que el alimentador debe trabajar a velocidad constante (aceleración cero) una distancia de:

$$2,4 [m] = 0,18 [m] + d_{vconst} + 0,18 [m]$$

$$d_{vconst} = 2,04 [m]$$

Alimentar esta distancia tomará un tiempo de:

$$t_{vconst} = \frac{2,04 [m]}{2,95 \left[\frac{m}{s} \right]}$$

$$t_{vconst} = 0,69 [s]$$

Como resumen, se tiene que para validar una velocidad de 40 [m/min] en el primer sector de la máquina se observa:

	Tiempo [s]	Distancia recorrida material [m]
Perforado	2,5	0
Aceleración alimentador	0,12	0,18
Velocidad cte. alimentador	0,69	2,04
Desaceleración alimentador	0,12	0,18
Total	3,43	2,4

Tabla 14. Resumen de tiempo y distancia recorrida por el material incluyendo perforado. [Elaboración propia, 2019]

De lo anterior se tiene una velocidad promedio de:

$$v = \frac{2,4 [m]}{3,43 [s]} = 0,70 \left[\frac{m}{s} \right] = 41,99 \left[\frac{m}{min} \right]$$

Con la velocidad promedio anterior se valida que aun deteniéndose para realizar el perforado, el alimentador es capaz de proveer con material en el tiempo necesario al tren de formación para que este trabaje a 40 [m/min], ya que el alimentador puede proveer hasta 41,99 [m/min].

6. Análisis de resultados y conclusiones del trabajo

6.1. Análisis de resultados

6.1.1. Reemplazo del motor principal del tren de formación

Con respecto al reemplazo del motor principal del tren de formación, se tiene que para llegar a la velocidad deseada de 40 [m/min], según los cálculos teóricos, se debe aumentar la potencia del motor principal de la bancada a 24,77 [kW], siendo la potencia consumida por el tren de formación de 7,77 [kW] originalmente. Teniendo en cuenta que los cálculos que se realizaron tienen fundamentos teóricos que indican un error de entre 0% y 20%, se debe considerar una potencia de 29,72 [kW] para contrarrestar el error.

Con esta potencia teórica se debe dimensionar un motor de bancada que se encuentre por sobre este valor, con un rango de seguridad que permita factores que puedan aumentar la potencia consumida por este motor como lo son:

- Roce de elementos mecánicos en la transmisión
- Apriete del material en la línea de rodillos

De lo anterior, considerando un sistema constantemente lubricado, con un bajo coeficiente de rozamiento y un operador calificado que maneje los aprietes necesarios para que el producto no genere una resistencia excesiva al transitar por la línea de rodillos, se puede definir un motor con un 20% aproximado sobre la capacidad calculada. Esto da una potencia de motor de **35,65 [kW]**.

Por otro lado, si se observa el parámetro de corriente del motor directamente desde la pantalla del pupitre de control, se concluye que este consume **27,5 [kW]** para formar el producto a 40 [m/min]. Este valor es real ya que se mide directamente desde el motor y es el más preciso a la hora de realizar alguna modificación en el tren de formación.

6.1.2. Modificación del Layout de la Máquina

Con respecto a la modificación de la distribución de los elementos de la máquina y la incorporación de nuevos elementos como el alimentador, se tiene que el nuevo layout queda de la siguiente forma:

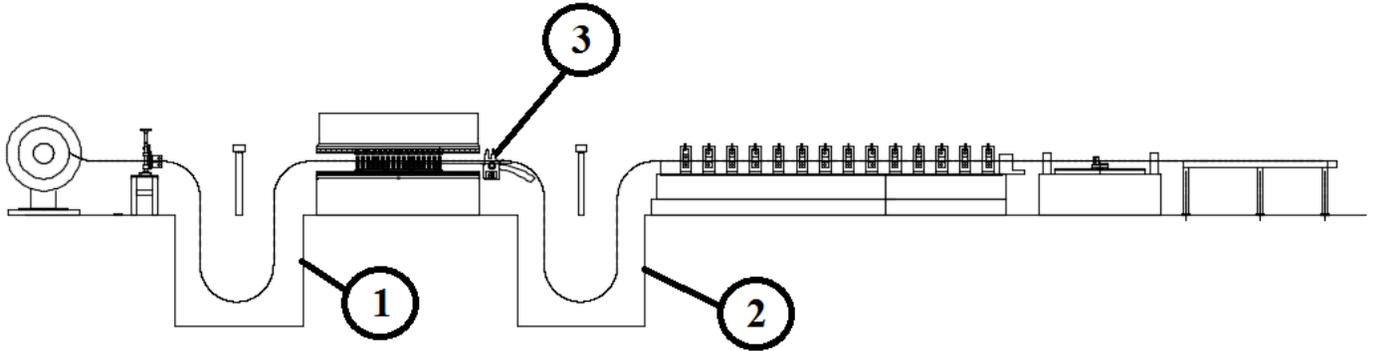


Figura 18. Vista alzado de nuevo layout de máquina. [Elaboración propia, 2019]

Donde:

1. Pozo 1
2. Pozo 2
3. Alimentador

Como se observó anteriormente, el dimensionamiento de los pozos se realizó tomando en cuenta las características del material con que se trabaja y la cantidad de material deseada de acumular en estos.

Por otro lado, la selección del alimentador se realiza en base a ecuaciones básicas de velocidad y aceleración, permitiendo encontrar un equipo en el mercado que cumpla con los requisitos para sostener la velocidad deseada en el tren de formación.

6.1.3. Análisis de aumento de producción

Como se vio en el punto 5.2 la máquina perfiladora tenía originalmente dos producciones mensuales según si el producto tenía o no perforaciones.

Con las modificaciones realizadas, la producción de la máquina será una sola, ya que la sección de perforado trabaja de forma independiente y no retrasa la velocidad de los componentes posteriores.

Es por esto que con una velocidad de 40 [m/min] y considerando las mismas características del producto original, se pueden producir 16,6 [unidades/minuto] lo que es similar a 58,8 [kg/minuto]. Llevando esto a una producción mensual, con un OEE de 50%, se tiene que la capacidad de producción de la máquina con las modificaciones es de 317,7 [Ton/mes]

Comparando con la producción de producto no perforado, la nueva producción mensual es de 312% sobre la original.

Por otro lado, comparando con producto perforado, se tiene una producción mensual de 555% sobre la original. Este valor es considerablemente mayor ya que la máquina no se detendrá para realizar el proceso de perforado.

Se observa que el aumento de producción de la máquina es muy alto para ambos casos, lo que se transfiere tanto en beneficios para el proveedor como para el cliente.

6.2. Conclusiones

En este trabajo se presentó uno de los caminos de cómo se puede aumentar la producción mensual de una máquina de manera efectiva, en respuesta al aumento constante de la demanda de los perfiles en el mercado. Sabiendo que la capacidad productiva a nivel nacional de este tipo de productos es del orden de los cientos de miles de toneladas, se observa una oportunidad clara que al aprovecharse de manera correcta, traerá beneficios tanto al fabricante como al cliente.

El repotenciamiento del tren de formación de la máquina debe ir en paralelo con la modificación del layout del proceso de perforado de la línea. Ambas mejoras se deben realizar para que el proyecto logre su objetivo. Si se realizan mejoras en solo una sección, puede que existan incrementos de producción muy por lo bajo de los presentados en este trabajo.

Se observa que los cálculos teóricos se encuentran muy cercanos a los observados en la realidad de la máquina, lo que implica que las ecuaciones de Bhattacharyya son factibles de utilizar en

caso de que no se tengan herramientas de medición como también para el dimensionamiento de un motor en una etapa de diseño de una línea de rodillos.

Los aumentos de producción mensual de producto sin perforación de 312% y de producto con perforación de 512% obtenidos luego de las modificaciones a la línea, permitirán, entre otras cosas:

- Satisfacer una mayor demanda.
- Disminuir los costos asociados a la producción, debido a que en un mismo turno de trabajo con el mismo costo de operadores, se obtendrá una mayor producción, aumentando la productividad parcial respecto de la mano de obra.
- Disminuir los precios de venta, por economía de escala.
- Disminuir los tiempos de entrega, lo que permitirá captar clientes que no encuentran esta rapidez en otras compañías.

En la sección de perforado, se observa que el fleje siempre se debe detener para realizar el proceso de perforado, esto permite que las perforaciones se puedan distribuir en base a las solicitudes de los clientes, de lo contrario, se podría utilizar un sistema de perforado de tipo rotatorio, el cual realiza una secuencia de perforaciones estándar.

Para hacer más fácil los cálculos incluidos en este trabajo, se pueden utilizar softwares de dibujo tales como AUTOCAD o INVENTOR, en donde se puede dibujar la flor del producto en cuestión. Estos softwares proveen propiedades de dibujos muy útiles, tales como la obtención rápida del segundo momento de área, que se debe incluir en la ecuación de Bhattacharyya vista anteriormente, para obtener los resultados de fuerza en cada paso.

Cabe mencionar que el repotenciamiento del tren de formación y modificación de layout de la máquina deben ir siempre acompañado de trabajos de otras áreas, como por ejemplo trabajos eléctricos y de seguridad que afirmen que la línea realice todos sus procesos de forma segura y eficiente.

7. Bibliografía

HALMOS, Roll Forming Handbook (Manufacturing Engineering and Materials Processing), 1st Ed. Boca Raton, FL. USA, Taylor & Francis Group, LLC, 2006.

THE prediction of roll load in cold roll-forming por Bhattacharyya. Journal of Mechanical Working Technology, 14:363-379. 1987

KALPAKJIAN y SEROPE. Manufactura, Ingeniería y Tecnología. 5a ed. México. Prentice Hall, 2008.

ZAMORANO, Nelson. Introducción a la Mecánica. 1era Ed. Santiago, Chile. Editorial Universitaria SA, Santiago, Chile.

THEIS, Henry. Handbook of Metalforming Processes. 1st ed. Herr-Voss Corporation Callery, Pennsylvania, USA.

LARBURU, N., Máquinas Prontuario. Técnicas, Máquinas, Herramientas. 1era Ed. Imp. Ediciones Paraninfo SA. 1989.

KUZNETSOV, Fundamentos de Electrotecnia. 2da Ed. Moscú, Editorial MIR. 1967.

7. Anexo

7.1. Detalle cálculos punto 5.3.1.

La primera parte consiste en obtener y reemplazar los valores en la ecuación:

$$F = Y \sqrt{\frac{2t^3\theta^3 a}{3 \sin^2 \theta}} + \frac{3hEI}{(D - X)^3}$$

Algunos de estos valores son propiedades del material, otros dependen de la forma del producto y otros se deben obtener empíricamente, como se explica en el mismo punto.

Una vez obtenidas las variables, se procede a reemplazar en la ecuación. A continuación se observa el cálculo para el paso 1:

Variable de la ecuación	Valor	Unidad
Y = Esfuerzo de fluencia del material ²⁴	255	[MPa]
E = Modulo de Young del material ²⁵	200	[GPa]
t = Espesor del material	1.5	[mm]
D = Distancia horizontal entre pasos	457	[mm]
h = Elevación vertical que tiene el producto en el siguiente paso con respecto al punto de apoyo	1.5	[mm]
x = Distancia horizontal desde el centro del rodillo en donde el producto hace contacto con este.	16	[mm]

Paso	Ángulo de incrementación θ [°]	Segundo Momento de Área I_y [mm ⁴]	Largo del ala a [mm]
1	20	2,31E+05	8

²⁴ <https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-11/hot-dip-galvanized-steel.pdf>

²⁵ <https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-11/hot-dip-galvanized-steel.pdf>

Por lo tanto la ecuación queda:

$$F = Y \sqrt{\frac{2t^3 \theta^3 a}{3 \sin^2 \theta} + \frac{3hEI}{(D - X)^3}}$$

$$F = 255 \cdot 10^6 \sqrt{\frac{2 \cdot (1.5 \cdot 10^{-3})^3 \cdot \left(\frac{20\pi}{180}\right)^3 \cdot (8 \cdot 10^{-3})}{3 \sin^2 \left(\frac{20\pi}{180}\right)} + \frac{3 \cdot (1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot (200 \cdot 10^{-9}) \cdot [(2.31 \cdot 10^5) \cdot 10^{-12}]}{((457 \cdot 10^{-3}) - (16 \cdot 10^{-3}))^3}} [N]$$

$$F = 3075 [N]$$

Luego de obtenida la Fuerza, se procede a obtener el torque del paso. Esto se realiza multiplicando la Fuerza obtenida por el brazo, que vendría siendo la distancia desde el centro del eje hasta el punto de contacto con el material, que sería igual a la mita del diámetro de cama. Para el paso 1 el diámetro de cama corresponde a 119 mm, por lo que:

$$T = F \cdot r [Nm]$$

$$T = 3075 \cdot \left(\frac{119}{2} \cdot 10^{-3}\right) [Nm]$$

$$T = 183 [Nm]$$

Luego, teniendo en cuenta el torque, se necesita obtener la velocidad angular del eje en ese punto. Esta velocidad está dada directamente por la velocidad de giro del motor del tren de formación.

Para el caso de este tren de formación se tiene que la velocidad angular del motor principal es de 1465 [RPM], el cual se encuentra acoplado a un reductor, que tiene un índice de reducción de 1:48.57. Esta reducción implica una velocidad de salida del reductor de 30.16 [RPM], posterior al reductor, el sistema de transmisión del tren de formación tiene relación 1:1 hasta

conectarse al eje inferior de los rodillos formadores. De esto se tiene que la velocidad angular de 30.16 [RPM] corresponde a 3.16 [rad/s].

Teniendo el Torque y la velocidad angular de cada paso, se puede obtener la potencia mecánica del paso multiplicando ambas variables:

$$P = T \cdot \omega [W]$$

$$P = 183 \cdot 3.16 [W]$$

$$P = 578 [W]$$

$$P = 0.58 [kW]$$

7.2. Corrección formula cantidad de pasos

Formula presentada en ROLLS FORMING HANDBOOK en sistema imperial:

$$n = \left[3.16h^{0.8} + \frac{0.05}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y^{2.1}}{40U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

Donde h y t se encuentran en pulgadas.

Donde Y y U se encuentran en KSI

Formula presentada en ROLLS FORMING HANDBOOK en sistema métrico:

$$n = \left[0.237h^{0.8} + \frac{0.834}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y^{2.1}}{0.003U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

Donde h y t se encuentran en milímetros.

Donde Y y U se encuentran en MPa.

Se observa que el factor demarcado en rojo debe ir en el numerador y no en el denominador, a continuación la demostración:

$$n = \left[3.16h_{imp}^{0.8} + \frac{0.05}{t_{imp}^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{Y_{imp}^{2.1}}{40U_{imp}} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

$$1[in] = 25.4[mm] \rightarrow h_{imp} = \frac{h_{met}}{25.4} ; t_{imp} = \frac{t_{met}}{25.4}$$

$$1[ksi] = 6.89[MPa] \rightarrow Y_{imp} = \frac{Y_{met}}{6.89} ; U_{imp} = \frac{U_{met}}{6.89}$$

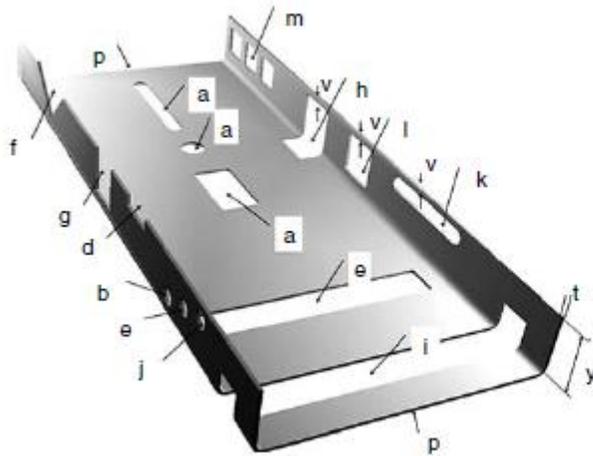
$$n = \left[3.16 \left(\frac{h_{met}}{25.4} \right)^{0.8} + \frac{0.05}{\left(\frac{t_{met}}{25.4} \right)^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{\left(\frac{Y_{met}}{6.89} \right)^{2.1}}{40 \left(\frac{U_{met}}{6.89} \right)} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

Resolviendo lo anterior se tiene:

$$n = \left[0.237h^{0.8} + \frac{0.834}{t^{0.87}} + \frac{\alpha}{90} \right] \left[\frac{0.003 Y^{2.1}}{U} \right]^{0.15} s(1 + 0.5z) + e + f + 5zs$$

7.3. Reemplazo de valores en ejemplo cantidad de pasos

Para encontrar valores de Z:



Ø For letter "Z" in the equation pick one number only, the highest value of all applicable conditions

y = height
t = thickness
v = distance from edge

		Z		
		$\frac{y}{t} < 20$	$\frac{y}{t} > 40$	
<ul style="list-style-type: none"> Small perforation Slotted <ul style="list-style-type: none"> edge continuous limited edge continuity edge not continuous Wire Pre-cut 		n_1	no hole 0	
			n_2	a 0
				b 0
			n_3	c 0
				d 0.03
				e 0.05
			n_4	f 0.07
				g 0.07
				h 0.1
				i 0.12
		n_5	j 0.12	
			k 0.15	
			l 0.25	
		p	m 0.5	
			p 0.18	
			0	
			0.05	
			0.05	
			0.30	
			0.25	
			0.18 (pre-cut)	

(*) The longer the slot and the smaller the dimension "v", the larger the "Z" factor is.

Para encontrar S:

TABLE 5.7 Effect of Shape (S) on Number of Passes (Equation 5.19)

	1	1	1.05	1.05	1-1.05	1.1 - 1.2	1.4	1.5
S Shape Factor								

Para determinar f :

TABLE 5.8 Effect of Tolerance Factor (F) on Number of Passes (Equation 5.19)

f Tolerance Factor	
Loose (construction)	0
Medium	0.5-1.0
Tight (automotive)	1.1-1.7
Extremely tight	1.9-(2)