

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DEL ESPESOR EN UN PROCESO
DE LAMINADO EN FRIO PARA PLACAS DE ALUMINIO Y ALEACIONES
DE ESTAÑO-PLOMO.**

**CAMILO EDUARDO GUEVARA OSPINA
DIANA CAROLINA RAMÍREZ SALCEDO**

**DIRECTOR:
ING. ALEXANDER ALVARADO MORENO**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERIA MECÁNICA
BOGOTÁ
2017**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA
PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA**

FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO


Nº DE RADICACIÓN: _____

INFORMACIÓN EJECUTORES

Ejecutor 1

Nombre (s):	Camilo Eduardo	
Apellido (s):	Guevara Ospina	
Código:	20152375014	
E-mail:	camilo1013@outlook.com	
Teléfono fijo:	7593298	
Celular:	3133161538	

Ejecutor 2

Nombre (s):	Diana Carolina	
Apellido (s):	Ramírez Salcedo	
Código:	201523725015	
E-mail:	k-rolina_831@hotmail.com	
Teléfono fijo:	6267987	
Celular:	3132378853	

INFORMACIÓN DEL PROYECTO

Título del Proyecto:	Diseño de un sistema de control del espesor en un proceso de laminado en frío para placas de aluminio y aleaciones de estaño-plomo	
Duración (estimada):		
Tipo de Proyecto: (Marqué con una "x")	Innovación y Desarrollo Tecnológico	<input checked="" type="checkbox"/>
	Prestación y Servicios Tecnológicos	<input type="checkbox"/>
	Otro	<input type="checkbox"/>
Modalidad del Trabajo de Grado:	Monografía	
Línea de Investigación de la Facultad*:	Optimización de procesos industriales	
Línea de Investigación del Proyecto Curricular**:	Materiales y procesos de manufactura	
Grupo de Investigación:		
Proyecto de Investigación:		
Áreas del conocimiento que involucra:	Diseño, materiales, procesos de manufactura, automatización y control	

INFORMACIÓN PASANTÍA

Nombre de la empresa:	
Dirección:	
Teléfonos:	
Correo electrónico:	
Página Web:	

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

Director: (Vo. Bo.)	Ingeniero Alexander Alvarado Moreno
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)	
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo.)	

TABLA DE CONTENIDO

0. Introducción	5
1. Planteamiento del problema	5
1.1 Estado del arte	7
1.2 Justificación	12
2. Objetivos	13
2.1 Objetivo general.....	13
2.2 Objetivos específicos	13
3. Marco teórico	13
3.1 Laminado en frio	13
3.2 Sistema loop cerrado	16
3.3 Detectores inductivos	16
3.4 Sistema de adquisición de datos	17
3.4.1 LabVIEW	17
3.4.2 DASyLab.....	18
4. Metodología	18
4.1 Estudio preliminar.....	18
4.2 Modelamiento matemático.....	18
4.3 Estudio detallado.....	19
4.4 Etapa de programación	19
4.5 Validación del sistema de control	19
4.6 Documentación de montaje, programación y calibración.....	20
5. Cronograma	21
6. Presupuesto y fuentes de financiación	22
7. Bibliografía	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del sistema actual de la laminadora manual	6
Figura 2. Tren de potencia maquina laminadora	6
Figura 3. Rodillos maquina laminadora	7
Figura 4. Aplicación de la Fuerza de laminación F a un bastidor tipo cuarto vertical. ...	8
Figura 5. Modelo en LABVIEW del control de espesor y Tensión Modo Hojalata	8
Figura 6. Representación esquemática del arco de contacto o mordida de laminación .	11
Figura 7. Efecto del as fuerzas sobre el cambio de espesor de la lámina.	16
Figura 8. Sistema de control de lazo cerrado	16
Figura 9. Esquema de sistema de adquisición de datos	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diagrama Gantt. Cronograma de actividades	21
Tabla 2. Distribución de presupuesto	22

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DEL ESPESOR EN UN PROCESO DE LAMINADO EN FRIO PARA PLACAS DE ALUMINIO Y ALEACIONES DE ESTAÑO-PLOMO.

Resumen:

En este informe se presenta la propuesta de trabajo de grado: diseño de un sistema de control del espesor en un proceso de laminado en frío para placas de aluminio y aleaciones de estaño-plomo. Dando a conocer el problema actual que ocurre en la empresa Macyl S.A.S. Se revisa además las soluciones similares que se han trabajado anteriormente, mostrando la importancia de afianzar la relación universidad industria, también se observan los objetivos principales para llevar a cabo el proyecto, la metodología a usar, cronograma y presupuesto estimado.

0. Introducción

La laminación en frío es un proceso ampliamente utilizado en la industria para modificar la forma de la sección transversal de un material forzándolo a pasar mediante varios juegos de rodillos [1], no obstante existen factores que afectan la uniformidad del espesor final de las láminas. Por ello se hace necesario fijar parámetros de calidad, delimitando variaciones del tamaño nominal del espesor y encontrar una manera efectiva de controlar y medir el tamaño deseado del espesor de lámina.

Una de las soluciones a esta problemática la ha brindado la automatización industrial a pequeña escala que ha tenido un crecimiento exponencial en las últimas décadas, ya que genera resultados satisfactorios en cuanto a uniformidad de los lotes de producción y mayor control de las variables en los diferentes sistemas, cambio que afecta directamente la calidad del producto y la satisfacción del cliente.

1. Planteamiento del problema

Actualmente Macyl S.A.S. una empresa colombiana con 10 años de experiencia dedicada a la fabricación de herramientas para la industria maderera, lleva a cabo como objetivo social un proceso de laminado en frío de placas de aluminio y aleaciones estaño plomo, el cual se realiza en una laminadora manual en la que se obliga a la lamina a pasar a través de 2 rodillo. El primero se encuentra anclado a un bastidor y el segundo permite su graduación por medio de un tornillo de potencia, como se muestra en la figura 1. En el proceso la lámina pasa de un espesor inicial (t_1) a un espesor final (t_2), en este último no se tiene ningún control es decir, con el método de prueba y error se ajusta el tornillo graduable hasta que se considere sea el espesor de salida adecuado, pero esta metodología tiene un grado de precisión muy bajo por lo que productos del mismo tipo no son homogéneos.

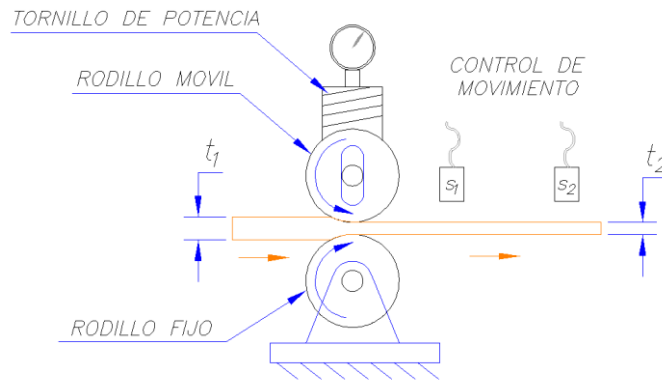


Figura 1. Esquema del sistema actual de la laminadora manual
Fuente: propia

Las características del tren de potencia de la maquina laminadora son un motor eléctrico (1.2 HP, 1800 RPM, trifásico) conectado mediante cadena y patea a un reductor (relación 29:1), con la cual a la entrada de la transmisión final, se cuenta con una velocidad angular fija de aproximadamente 62.1 RPM. (Figura 2).

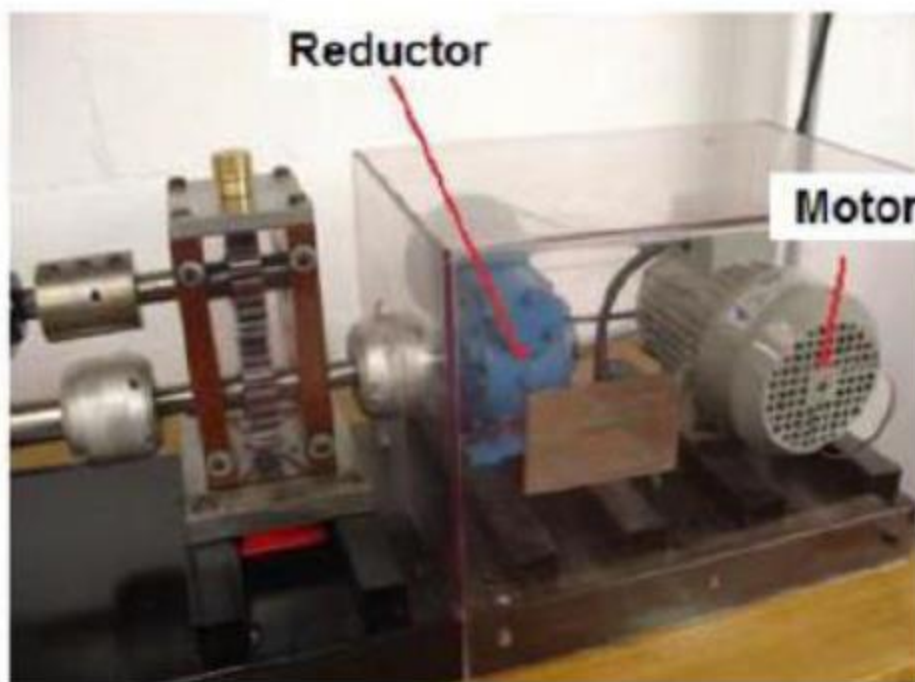


Figura 2. Tren de potencia maquina laminadora

Las características de los rodillos de laminación son: material acero SAE 1045 por donde pasara la lámina de estaño y de tal manera reducirá el espesor. Su radio es de 100 mm. El coeficiente de fricción del estaño es de 0.2 para la lámina en estado fundido y de 0.12 para la lámina luego de la primera pasada entre los rodillos.



Figura 3. Rodillos maquina laminadora

Por lo descrito anteriormente se hace necesario diseñar un sistema de control del espesor de lámina, el cual permita reconocer la variación de espesor, compararlo contra un rango aceptado, programado con anterioridad y se tome una decisión pertinente acerca de la presión empleada en el tornillo de potencia.

Se propone la verificación del espesor por medio de palpadores o sensores, que detecten de manera eficiente el espesor de la lámina, traduciendo la señal a una tarjeta de adquisición de datos la cual envíe la información adecuada al visualizador y ordene la ejecución de los actuadores de ser necesario.

1.1. Estado del Arte:

En los procesos de laminado en frío la deformación del material se da en 2 direcciones: en la elongación del material y en su espesor manteniendo su ancho constante. Por esto se presta especial atención a controlar las dimensiones a deformar. Los autores Joaquín Santos, Néstor Astudillo, Miguel Strefezza, Leonardo Contreras en su artículo *“Simulación del sistema de control de espesor y control de tensión de banda de un laminador”* llevan a cabo un proceso de simulación realizando primero un modelamiento matemático reconociendo las variables necesarias para llevar a cabo un modelo óptimo *“El proceso de laminación es multivariable, pero se detallarán sólo las variables relacionadas con el objetivo de este trabajo, las cuales son: espesor y caudal, tensiones de banda y fuerza de laminación.”* [2]. Primero se hace una revisión de espesor y caudal basándose en la teoría de procesos de laminación, luego se realiza un análisis en la tensión de la banda del tren de laminación y se evalúan las fuerzas de laminación (ver figura 4).

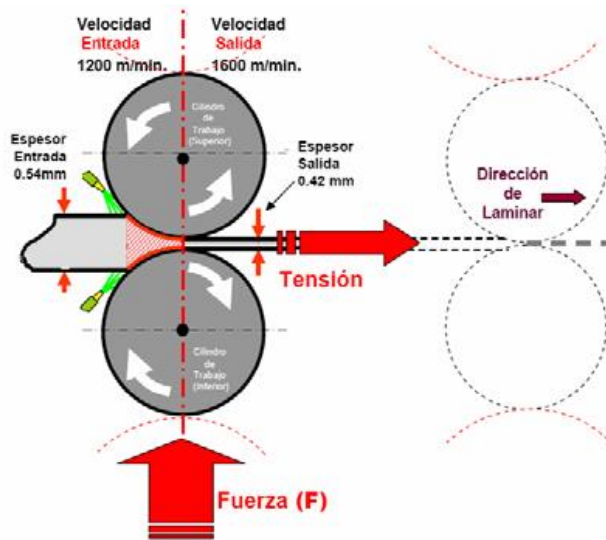


Figura 4. Aplicación de la Fuerza de laminación F a un bastidor tipo cuarto vertical. [2]

El control de estas variables es bastante complejo, es por eso que una solución efectiva a ello es utilizar sistemas de automatización que se encarguen de las configuraciones del proceso, creando lazos de control modulares y ordenados que efectúen las acciones necesarias.

Por último es necesario que el usuario pueda realizar cambios de manera sencilla y clara, por esto con ayuda de una programación tipo gráfico como la usada en [2] ayuda a regular el espesor y observar el comportamiento de los lazos de regulación (ver figura 5).

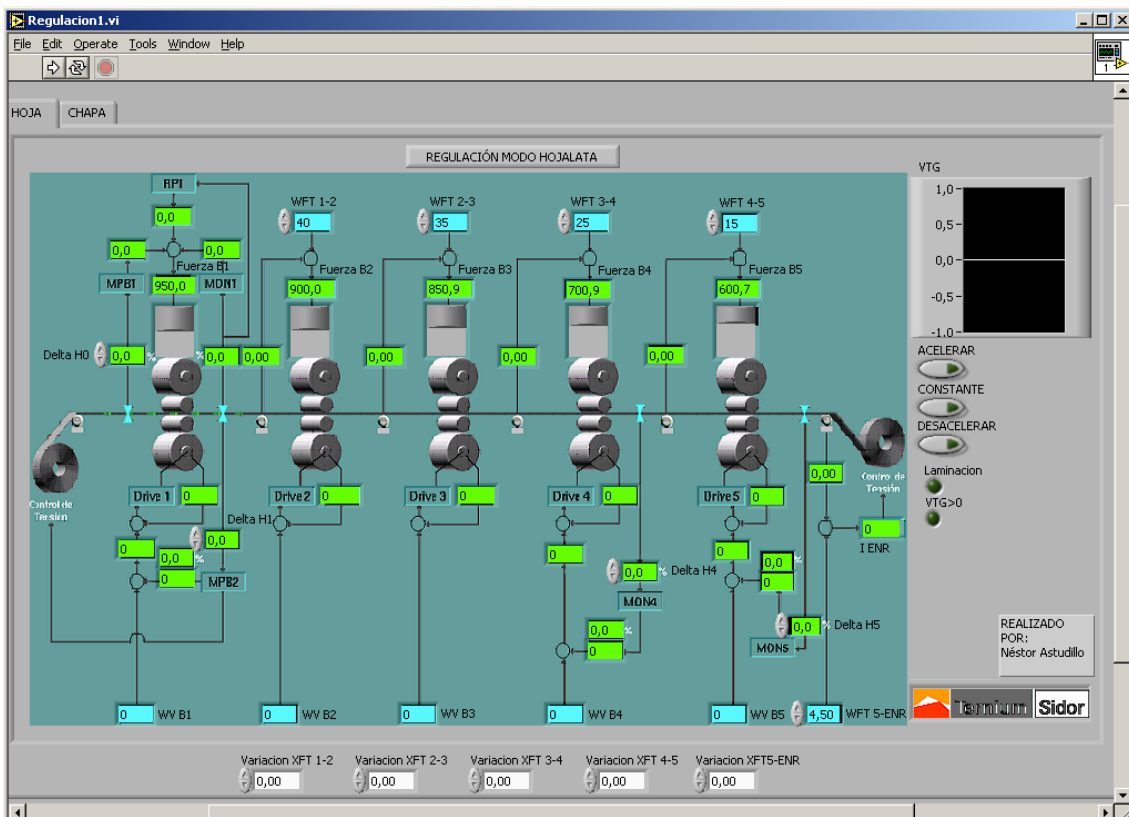


Figura 5. Modelo en LABVIEW del control de espesor y Tensión Modo Hojalata. [2]

Otra fuente de información para abarcar el tema del control del laminado es la que ofrece ABB. ABB es una empresa dedicada al desarrollo de aplicaciones de sistemas de control y soluciones de sistemas de simulación, la compañía ofrece la automatización y el equipo técnico eléctrico específicamente para la industria de procesos. Fue fundada en 1974 y tiene su sede en Mannheim, Alemania. La empresa presenta en su revista un artículo “*Modelos de configuración adaptativa para trenes de laminación en frío*” [3] creado por Frank Feldmann, Mark Gerdau, Andreas Vollmer de Alemania, acerca de los modelos que ha desarrollado ABB para que los clientes consigan lo mejor de sus trenes de laminación; examinando las soluciones de la empresa referentes a modelos de configuración adaptativa.

En el artículo se observa que la mejora del producto se centra en disminuir tolerancias de grosor y planitud y mejorar la calidad de la superficie, al mismo tiempo de dar una mayor productividad siendo competitivos en la economía global.

Desde el punto de vista de la automatización, estas exigencias se traducen, en los requisitos siguientes:

1. Sistema de control de automatización fiable y moderno.
2. Sensores y actuadores fiables.
3. Modelo de configuración adaptativa para la programación de las pasadas y el cálculo de preajuste.
4. Soluciones de control con tecnología avanzada.
5. Sistema y concepto intuitivos de visualización, operación y diagnóstico.

En el diseño se elabora un modelo matemático que calcula la programación de pasadas y el preajuste de la laminadora. Basándose en los datos de la bobina y los rodillos. La programación emplea las tablas de reducción y tensión que se obtienen tanto de la experiencia práctica como de submodelos matemáticos, y predice así el comportamiento del proceso. El modelo se compone esencialmente de cuatro partes:

1. la curva de endurecimiento por deformación del material (el modelo de esfuerzo-deformación),
2. un modelo de la fricción según la separación entre rodillos,
3. el modelo de separación entre rodillos (que proporciona la carga sobre los rodillos, el par de arrastre, el deslizamiento hacia delante y la temperatura de la banda),
4. y el modelo de la laminadora (que proporciona las referencias de los actuadores de planitud de la banda y las posiciones de separación entre rodillos).

Los valores medidos se recogen y filtran en cada paso y se comparan después con los valores previstos correspondientes. Se calculan los parámetros adaptativos para ajustar las predicciones a los valores medidos.

En el artículo también se explica cómo es el cálculo de la relación de pasadas donde se trata de identificar una distribución adecuada de las reducciones en pasadas sucesivas para unos datos de bobina prefijados. Para estos cálculos se deben tener presente factores como las tensiones de enrollamiento en cada pasada, la calidad de la banda, potencia necesaria del motor, la separación de rodillos, deformación del material y características de rozamientos entre los materiales del rodillo y la banda, rugosidad y velocidad del rodillo.

También se realiza un modelo de preajuste que calcula los valores restantes de configuración. Los datos de entrada de la banda necesarios para el cálculo del preajuste son:

1. Espesor, anchura y temperatura de entrada.
2. Espesor de laminación en caliente o espesor de recocido último.
3. Grado del material, tipo de recocido.
4. Perfil de la banda, diámetro exterior de la bobina.
5. Espesor deseado de salida (para laminadoras de reducción) o alargamiento deseado de salida (para laminadora de pasada superficial).

El cálculo de programación y preajuste se activa automáticamente cuando:

2. Se dispone por primera vez de los datos de la bobina (comprobación de plausibilidad).
3. La bobina alcanza el estado “siguiente bobina” o cuando se monta la bobina siguiente en el carrete desenrollador.
4. Se ha terminado la adaptación de la bobina anterior.
5. A petición manual del operario.

El modelo de preajuste emplea varios submodelos como componentes, estos son:

1. modelo de tensiones.
2. modelo de velocidad
3. modelo de separación entre rodillos
4. modelo de temperatura de la banda,
5. modelo de temperatura de rodillos y dilatación térmica,
6. modelo de disposición de la separación entre rodillos,
7. modelo de sensibilidad,
8. modelo de adaptación

Las soluciones del modelo Preset (preajuste) de ABB para trenes de laminación en frío desempeñan un importante papel en la mejora de la calidad del producto y de la productividad. Las principales ventajas para el cliente son:

1. Ayuda al operario y al planificador de producción con unas referencias automáticas del punto de consigna.
2. Estabiliza las condiciones de laminación a la vista de las limitaciones de la laminadora y del proceso.
3. Minimiza los tiempos de enfilado, terminación de banda e inversión.
4. Reduce la longitud de defecto de espesor en el principio y el final de la banda (en un tren de laminación en frío recientemente reparado se ha conseguido un 60% de media sobre el volumen total de producción).
5. Minimiza las roturas de la banda, los tiempos de inmovilización y los desperfectos de laminación.
6. Mejora indirecta de la calidad superficial de la banda.
7. Optimiza los volúmenes de producción (hasta un 4–6%, dependiendo de la laminadora y del nivel de optimización).

Por otro lado vemos que es posible optimizar de manera efectiva, el proceso de laminación utilizando modelos matemáticos, se puede optimizar un proceso de laminación en frío tal como lo muestran *Oscar Villarreal, Carlos Lizcano y Rafael Colas*

autores del artículo “Optimización de células de laminación en frío para molino reversible del tipo cuatro” uno de los factores más relevantes calculo matemático, es saber la forma de los rodillos para crear una reducción óptima y el área de contacto a la cual la lámina debe cubrir en el rodillo, lo que denominan parámetros geométricos de la mordida de laminación en frío (ver figura 6) [11].

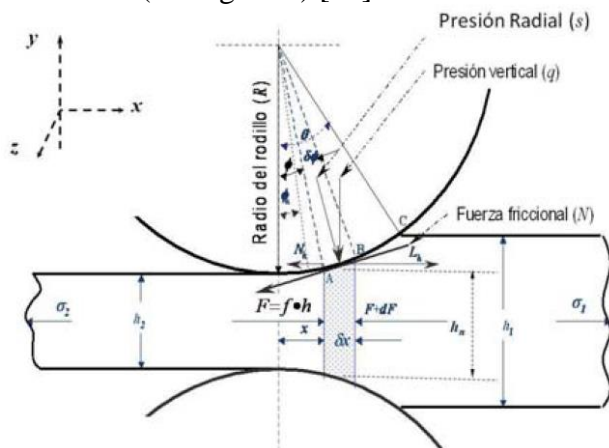


Figura 6. Representación esquemática del arco de contacto o mordida de laminación. [11]

Luego se hace la revisión de las curvas constitutivas del material que es una gráfica esfuerzo deformación modificada respecto a cada etapa de laminación, esta curva es importante para determinar la resistencia a la constricción [11] siguiendo con el procedimiento se procede a calcular las células de laminación que son una secuencia de parámetros de laminación como velocidad, porcentaje de reducción, espesor final e inicial. Al realizar los cálculos necesarios se hace posible optimizar de manera satisfactoria el proceso de laminación, ya que el perfil del espesor mejora al redistribuir mejor los porcentajes de reducción en cada etapa, homogeneizar la fuerza aplicada a lo largo del rodillo y mejorar la calidad superficial de los rodillos.[11].

ABB también publica en su revista un artículo que aborda los bucles de control, “Bucles de control, ¿un placer o una plaga? Vista de planta en la industria de procesos” de Alexander Horch. [12]. Los bucles de control son parte intrínseca de todo sistema de automatización, son parte fundamental de la industria de procesos.

“La disponibilidad y eficiencia de un sistema de control son esenciales para dar seguridad al proceso de transformación y obtener rendimiento máximo de él, garantizando al mismo tiempo calidad y rentabilidad de la producción. Por tanto, es de vital importancia supervisar el controlador para, si es necesario, mejorar su rendimiento” según Alexander Horch autor del artículo.

Se habla del Control Loop Condition Monitoring (CLCM) que es un proceso tan natural como la supervisión del estado de válvulas y transmisores. El CLCM funciona como un estetoscopio médico, sirve para obtener un diagnóstico a través de la escucha pasiva del proceso. Normalmente no se requiere más información que las etiquetas DCS estándar: punto de referencia (SP), variable de proceso (PV), salida del controlador (CO).

Es importante el uso del CLCM porque la evaluación del comportamiento de los bucles de control es algo tan antiguo como el diseño del controlador. También hay una forma de realizar esta evaluación como lo menciona el artículo y es la que desarrollo Harris, que es una sencilla e interesante medición del rendimiento para evaluar un bucle de control cualquiera en condiciones normales de operación. El método comparaba el rendimiento

real del controlador con el rendimiento teórico óptimo a partir de los datos de funcionamiento normal.

Otros signos de la utilidad de CLCM es la multiplicación de grupos de investigación académica y el interés, cada vez mayor, de las empresas que venden sistemas de automatización, pudiendo ser una opción en los procesos de control para las laminadoras en frío.

En el artículo se menciona al grupo ARC, consultores en informática estratégica y optimización empresarial, recomienda combinar la monitorización de estado del bucle de control con una herramienta de puesta a punto del controlador. De hecho ABB ha adoptado esta idea y ha integrado ambas funciones en la herramienta OptimizeIT Loop Performance Manager (LPM). Esta es una potente herramienta general para supervisar el estado de funcionamiento del controlador. Combina funciones de evaluación de bucles de control y de ajuste de controladores y funciona con cualquier arquitectura de automatización a través de la conectividad de datos OPC, además muestra los estudios detallados de cómo solucionar los problemas.

El autor Alexander Horch menciona como se hace el diagnóstico de laminadoras en frío teniendo en cuenta factores como la tensión y el grosor; se han diseñado con éxito funciones CLCM para diagnosticar y eliminar las perturbaciones periódicas más corrientes en los trenes de laminación.

“CLCM es una técnica intrínsecamente pasiva y automática que ha atraído la atención de muchas industrias. Eliminar los cuellos de botella del funcionamiento del control y las pérdidas de rendimiento por mal funcionamiento del mismo tiene ventajas sustanciales” menciona Horch en su artículo. . [12].

1.2 Justificación:

La preocupación de la empresa Macyl S.A.S por mejorar de manera efectiva el proceso de laminado en frío de aluminio y aleaciones de estaño plomo es notable porque no tiene un sistema efectivo para relacionar el espesor de salida con la presión ejercida en el rodillo móvil, esto se traduce en largos tiempos calibrando la máquina a prueba y error para producir un espesor deseado y el proceso de repetitividad de los productos es inexacto, ya que no se tiene la certeza del espesor óptimo para cada tipo de producto.

Por ende se busca dar solución efectiva a través de procesos de control a pequeña escala, gracias a su versatilidad y economía que estos brindan. Afianzando así la relación entre universidad-industria que hace parte de la visión del programa de ingeniería mecánica de la universidad distrital Francisco José de Caldas.

2. Objetivos:

2.1. Objetivo general

- Diseñar un sistema de control del espesor en un proceso de laminado en frío en placas de aluminio y aleaciones de estaño-plomo.

2.2. Objetivos específicos

- Realizar el análisis matemático para el sistema de laminación en frío, que represente el proceso actual de la máquina.
- Escoger el software adecuado para la visualización del proceso a través de cuadros comparativos.
- Crear un entorno virtual de la maquina en un software utilizando lenguaje de programación tipo gráfico.
- Programar lazos de control que garantice el espesor óptimo de salida de la lámina.
- Evaluar el sistema de control creado en la maquina laminadora de la empresa Macyl S.A.S

3. Marco Teórico:

3.1 Laminado en frío:

El proceso de laminado en frío se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recristalización. A diferencia del proceso de laminación en caliente, produce láminas y tiras con un acabado superficial mejor debido a que generalmente no hay presencia de calamina. Además se tienen mejores tolerancias dimensionales y mejores propiedades mecánicas debidas al endurecimiento por deformación (generación de dislocaciones) [1]

La laminación en frío permite tener un control sobre la deformación plástica, pues es posible medir el endurecimiento por deformación teniendo en cuenta el concepto de trabajo en frío. El endurecimiento por deformación es el fenómeno por el cual el metal dúctil se endurece a medida que se somete a deformaciones plásticas, este proceso en general es realizado por debajo de la temperatura de recristalización y por ello también nos referimos a este tipo de trabajo como trabajo en frío. Calculado de la siguiente forma:

$$\% \text{ TF} = [(A_o - A_f) / A_o] * 100 \text{ [endurecimiento por deformación] Ec.1}$$

En donde:

A_o = Área transversal original del metal.

A_f = Área transversal después de la deformación

El aumento de trabajo en frío aumenta la resistencia a la cedencia, y la resistencia a la tensión. Sin embargo disminuye ductilidad y el metal se vuelve más frágil [4].

Es importante conocer los parámetros del laminado en frío, las variables que parametrizan el proceso de laminado son [5]:

- Draft: definido como la diferencia entre el espesor inicial y el espesor final (Ecuación 2)

$$d = t_0 - t_f \quad Ec. 2$$

- Reducción: fracción del espesor del material inicial (ecuación 3)

$$r = \frac{d}{t_0} \quad Ec. 3$$

- Esparcido: ensanchamiento del material al reducir su espesor, en un proceso de laminado. Existe la conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen que entra. (ecuación 4)

$$t_0 w_0 L_0 = t_f w_f L_f \quad Ec. 4$$

Donde w_0 y w_f son los anchos de trabajo antes y después, mm (in), y L_0 y L_f son las longitudes antes y después, mm (in).

- Velocidad volumétrica: es la velocidad de flujo que se debe conservar antes y después de la reducción, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después de la siguiente manera. (ecuación 5).

$$t_0 w_0 v_0 = t_f w_f v_f \quad Ec. 5$$

- Deslizamiento hacia adelante: La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo. (ecuación 6)

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad Ec. 6$$

Donde s = deslizamiento hacia delante, v_f = velocidad final del trabajo (salida), m/s (ft/s); y v_r = velocidad de rodillo, m/s (ft/s).

- Esfuerzo real: es el esfuerzo experimentado por el trabajo laminado basado en el espesor del material antes y después del laminado. (Ecuación 7)

$$\epsilon = \ln \frac{t_0}{t_f} \quad Ec. 7$$

- Esfuerzo de fluencia promedio: es el esfuerzo aplicado al material de trabajo en el laminado plano. (Ecuación 8)

$$\bar{Y}_f = \frac{K\epsilon^n}{1+n} \quad Ec. 8$$

- Draft máximo: es el límite posible de reducción que puede alcanzar el laminado plano con un coeficiente de fricción. (Ecuación 9)

$$d_{max} = \mu^2 R \quad Ec. 9$$

Donde $d_{m\acute{a}x}$ = draft máximo, mm (in); μ = coeficiente de fricción y R = radio del rodillo, mm (in).

- Fuerza de rodillo: requerida para mantener la separación entre los dos rodillos. (Ecuación 10)

$$F = w \int_0^L p dL \quad Ec. 10$$

Donde F = fuerza de laminado N (lb); w = ancho del material de trabajo que se está laminando, mm (in), p = presión de laminado, MPa (lb/in²); y L = longitud de contacto entre el rodillo y el trabajo, mm (in).

También se puede calcular con base en el esfuerzo de fluencia promedio. (Ecuación 11)

$$F = \bar{Y}_f w L \quad Ec. 11$$

- Longitud de contacto: es la longitud de arco de la superficie del rodillo que entra en contacto con el material. (ecuación 12)

$$L = \sqrt{R(t_0 - t_f)} \quad Ec. 12$$

- Momento de torsión: es la fuerza aplicada por el rodillo con respecto al brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto L (ecuación 13)

$$T = 0.5 FL \quad Ec. 13$$

- Potencia: es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. (ecuación 14)

$$P = 2\pi NFL \quad Ec. 14$$

Donde P = potencia, J/s o W (in-lb/min); N = velocidad de rotación 1/s (rev/min); F = fuerza de laminado, N (lb); L = longitud de contacto, m (in).

A continuación se observa el efecto de las fuerzas sobre el cambio de espesor de la lámina:

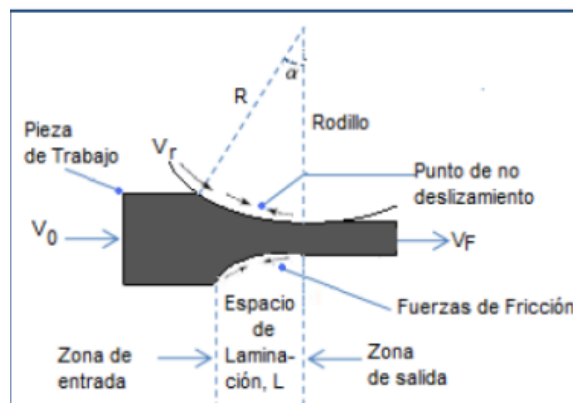


Figura 7. Efecto de las fuerzas sobre el cambio de espesor de la lámina. [6].

3.2 Sistema loop cerrado

Aquellos en los que la señal de salida del sistema (variable controlada) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control).

Operación que en presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia. Esta reducción se logra manipulando alguna variable de entrada del sistema, siendo la magnitud de dicha variable de entrada función de la diferencia entre la variable de referencia y la salida del sistema. [8]

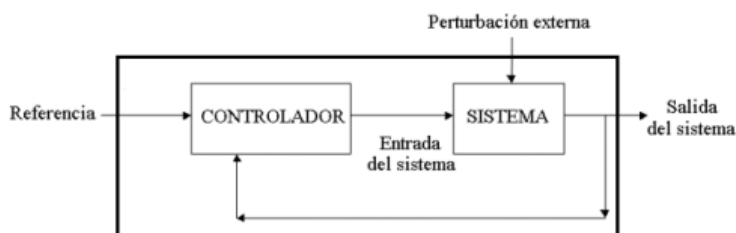


Figura 8. Sistema de control de lazo cerrado [7]

- Clasificación – Manuales: controlador operador humano – Automático: controlador dispositivo • Neumático, hidráulico, eléctrico, electrónico o digital (microprocesador)

3.3 Detectores inductivos:

Un detector de proximidad inductivo consta de un oscilador, cuyos bobinados forman la cara sensible, y de una etapa de salida. El oscilador crea un campo electromagnético alterno delante de la cara sensible. La frecuencia del campo varía entre 100 y 600 kHz según el modelo. Cuando un objeto conductor penetra en este campo, soporta corrientes inducidas circulares que se desarrollan a su alrededor (efecto piel). Estas corrientes constituyen una sobrecarga para el sistema oscilador y provocan una reducción de la amplitud de las oscilaciones a medida que se acerca el objeto, hasta bloquearlas por completo. La detección del objeto es efectiva cuando la reducción de la amplitud de las oscilaciones es suficiente para provocar el cambio de estado de la salida del detector. [8]

3.4 Sistema de adquisición de datos

Los componentes de estos sistemas son:

- Ordenador personal
- Sensores y actuadores
- Acondicionadores de señal
- Hardware de adquisición de datos
- Software
- Se pueden obtener con las tarjetas plug in que tienen la función de:
- Ser insertadas en los slots internos de un Pc
- Limita los recursos del Pc
- Se diseñan normalmente para el bus PCI [9]

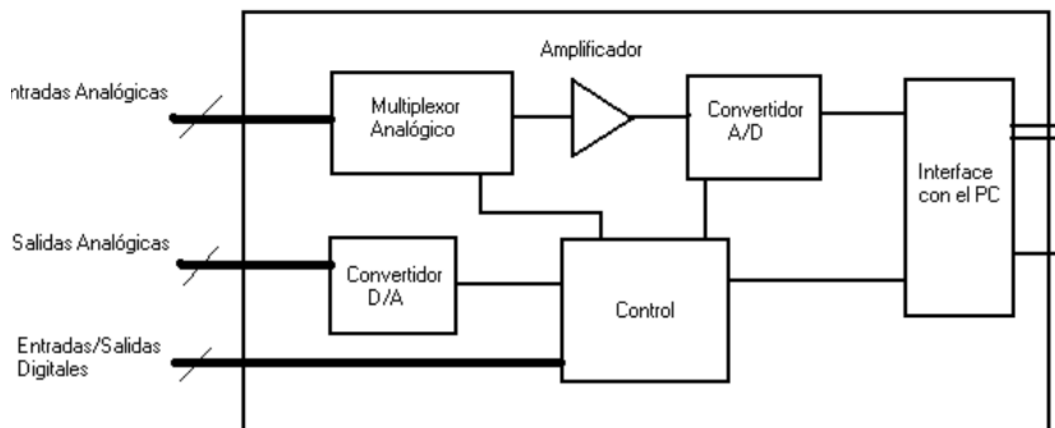


Figura 9. Esquema de sistema de adquisición de datos [9]

Criterios de selección de una tarjeta de adquisición de datos:

- Tipo de sistema operativo del ordenador
- Tipo de conector para tarjetas: PCI, PCMCIA
- Número de canales de entrada análogas, digital
- Resolución requerida
- Frecuencia de muestreo de señales
- Señales de temporización o conteo

3.4.1 LabVIEW

Suministrado por National Instruments

Es una herramienta que utiliza un lenguaje de programación de tipo gráfico para el diseño de sistemas de adquisición y control de instrumentos

Los sistemas diseñados con esta herramienta se denominan: Virtual instruments, ya que su apariencia se asemeja al de un instrumento standard. [9]

3.4.2 DASYSLab (Sistema de adquisición de datos)

Ofrece una adquisición en tiempo real, el análisis, el control y la capacidad de crear interfaces de usuario gráficas personalizadas (GUI). En contraste con otros entornos de programación gráfica, que pueden requerir semanas de entrenamiento de dominio, DASYSLab tiene una curva de aprendizaje muy corta para el usuario. Muchas aplicaciones se pueden configurar en unos pocos minutos, en lugar de días o semanas. Tareas de adquisición y control sofisticados se pueden resolver con DASYSLab rápidamente *sin necesidad de programación adicional*. Sólo tiene que insertar los bloques de módulos apropiados en la hoja de cálculo y conectarlos por medio de cables virtuales con unos pocos clics del ratón. [10]

4. Metodología:

La metodología a utilizar para el desarrollo del proyecto, se llevará a cabo basándose en los objetivos definidos anteriormente, teniendo en cuenta que “El objetivo primario de la metodología es diseñar un procedimiento ordenado, que permita a los equipos y fuentes de diseño completar sus proyectos dentro del costo y tiempos planteados” (Reyes Fuentes, 2007); la metodología será dividida en etapas de estudio, para así agrupar las actividades de similares características:

4.1. Estudio Preliminar

En esta primera fase se realizará una consulta al estado del arte de los sistemas para reconocer y documentar los espesores de lámina disponibles en el mercado actualmente.

Actividades a realizar:

- Trabajo de campo en lugares de Bogotá donde se trabajen procesos de laminado en frío y hacer una revisión de cómo controlan los espesores de lámina.
- Recopilar información referente a la disposición en el mercado de los palpadores y los sensores.
- Realizar cotizaciones de sistemas de control similares, para así crear un presupuesto tentativo sobre el proyecto.

4.2 Modelamiento matemático

En esta fase se pretende realizar un modelo matemático, que represente el sistema actual acertadamente.

Actividades a realizar:

- Recopilar la mayor cantidad de datos de la laminadora actual (velocidad, presión, dimensiones)

- Adquirir fichas técnicas de los materiales utilizados en la laminadora en este caso aluminio y aleaciones de estaño-plomo.
- Revisar y aplicar teoría referente al proceso de laminado en frío
- Evaluar el modelo matemático, validando que represente correctamente el proceso real

4.3 Estudio Detallado

En este punto de la metodología el objetivo es modelar en un entorno virtual el proceso de laminado, que se lleva a cabo actualmente

Las actividades a realizar en esta etapa son: diseño preliminar y diseño detallado.

- Diseño preliminar: En esta fase se realizara una revisión minuciosa, de las herramientas y dispositivos a utilizar, aplicando cuadros comparativos para tomar una decisión acertada.
- Diseño detallado: crear un entorno grafico detallado en un software que use un lenguaje de programación tipo grafico en el que se represente el sistema.

4.4 Etapa de programación

En esta parte de la metodología se realizará la asociación de las etapas anteriores, se programaran los lazos de control que organicen la información captada y decidan la acción a realizar sobre los actuadores.

Esta parte es una de las más importantes en la metodología ya que se debe prestar especial atención a que el sistema responda de manera correcta a las señales captadas.

Actividades a realizar:

- Seleccionar sensores adecuados para el sistema (cuadros comparativos)
- Programar tarjeta de adquisición de datos
- Conexión de los sistemas y pruebas preliminares
- Programación de los rangos aceptados para cada tamaño de espesor
- Puesta a punto de todo el sistema

4.5 Validación del sistema de control

Se realiza una verificación y comparación de los datos arrojados con los visualizados en la programación.

Actividades a realizar:

- Ensamblar el sistema de control creado en la maquina laminadora de la empresa Macyl S.A.S
- Revisión de tolerancias en los espesores finales de la lámina
- Prueba de repetitividad
- Inspección visual de la durabilidad del sistema en condiciones óptimas antes de calibración
- Verificación del correcto funcionamiento del actuador al detectar un rango no aceptado de espesor

4.6 Documentación de montaje, programación y calibración

La otra fase a completar es la documentación y entrega del montaje del sistema a la empresa interesada Macyl S.A.S, con los códigos de programación para agregar las restricciones necesarias en cada requerimiento de espesor. Para esto se llevara a cabo un registro escrito de los diferentes lineamientos a seguir para la puesta a punto del sistema.

Actividades a realizar:

- Registro escrito de los procedimientos ordenados llevados a cabo en la programación.
- documentar posibles errores que pueda presentar el diseño
- Advertir sobre las limitaciones y recomendaciones sobre el sistema de control.

5. Cronograma:

Las actividades mencionadas anteriormente se ordenan a continuación de forma cronológica mediante un diagrama de Gantt. (Tabla 1).

Actividad / Mes	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
Estudio preliminar						
Trabajo de campo	■					
Información de disponibilidad del mercado	■					
Cotizaciones de sistemas similares		■				
Modelamiento matemático						
Recopilar datos laminadora actual		■				
Adquirir fichas técnicas materiales		■				
Revisar teoría		■	■			
Evaluar modelo matemático			■	■		
Estudio detallado						
Diseño preliminar			■	■		
Diseño detallado			■	■		
Etapas de programación						
Seleccionar sensores				■		
Programar tarjeta				■	■	
Conexión de sistemas y pruebas				■	■	
Programación de los rangos de espesor					■	
Puesta a punto del sistema					■	
Validación del sistema de control						
Ensamblar sistema en laminadora					■	
Revisión tolerancias					■	
Prueba de repetitividad						■
Inspección visual condiciones óptimas						■
Verificación de correcto funcionamiento						■
Documentación						
Registro escrito de procedimientos de programación				■	■	
Librería de errores				■	■	
Limitaciones y recomendaciones					■	

Tabla 1. Diagrama Gantt. Cronograma de actividades

Fuente: propia

6. Presupuesto y fuentes de financiación:

Para el desarrollo de este proyecto se cuenta con una base presupuestal de \$2'675.000 pesos los cuales se distribuyen tal como muestra la tabla 2, con lo cual se financiarán los materiales necesarios para la construcción del sistema de recolección de datos y de mandos.

Los dineros destinados para la ejecución de este proyecto provienen de recursos propios.

Descripción	Valor
Tarjeta de adquisición de datos	\$ 250.000
Sensores capacitivos	\$ 120.000
Palpador	\$ 120.000
Encoder	\$ 80.000
Cables	\$ 15.000
Electricidad	\$ 40.000
Mano de obra	\$ 2'000.000
Papelaría	\$ 50.000
TOTAL	\$ 2'675.000

Tabla2. Distribución de presupuesto

Fuente: propia

7. Bibliografía:

- [1] GROOVER, Mikell P., “Fundamentos de manufactura moderna”, McGraw Hill, 3ra edición, México, 2007.
- [2] SANTOS, Joaquín; ASTUDILLO, Néstor; STREFEZZA, Miguel; CONTRERAS, Leonardo. Simulación del sistema de control de espesor y control de tensión de banda de un laminador, Universidad Simón Bolívar, Dpto. de Procesos y Sistemas, Apartado 89000, Valle de Sartenejas, Edo. Miranda 9995. Venezuela, 2011.
- [3] FELDMANN, Frank; GERDAU, Mark; VOLLMER, Andreas. Modelos de configuración adaptativa para trenes de laminación en frío. Revista ABB Automation GmbH, Mannheim, Alemania, 2009.
- [4] CALLISTER, William. “Materials science and Engineering an introduction” John Wiley & Sons. Inc. México, 2007.
- [5]. Laminación protocolo curso de materiales. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito
- [6]. KALPAKJIAN-Schmid, Manufactura, Ingeniería y tecnología, 4ta ed., Entice Hall, México 2002
- [7] Introducción a los sistemas de control. Disponible en: http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf
- [8] Sensores y actuadores. . Disponible en: <http://isa.uniovi.es/docencia/autom3m/Temas/Tema7.pdf>
- [9] Sistemas de adquisición de datos (DAS: Data Adquisicion Systems, DAQ: Data AdQusition). Disponible en: [http://www.sc.ehu.es/acwamurc/Transparencias/\(4\)TAD.pdf](http://www.sc.ehu.es/acwamurc/Transparencias/(4)TAD.pdf)
- [10] MC: Measuring computing, DAISY Lab 2016 - Data Acquisition System Laboratory. Disponible en: <http://www.mccdaq.com/dasylab-index.aspx>, 2016
- [11] VILLAREAL, Oscar; LIZCANO, Carlos; COLAS, Rafael. Optimización de células de laminación en frío para molino reversible del tipo cuatro, FIME-UANL. Ingenierías, 2011.
- [12] HORCH Alexander, Bucles de control, ¿un placer o una plaga? Vista de planta en la industria de procesos. ABB, Ladenburg, Alemania, 2005