

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



**Diseño de un sistema de medición indirecta de flujo másico de carbón en
molinos verticales mediante control adaptativo**

Tesis presentada por el Bachiller:

Flores Torres, Antony Stip

ORCID: 0009-0004-2879-5666

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico
con Especialidad en Automatización y Control

Asesor:

Dr. Copa Pineda, Juan Carlos

ORCID: 0000-0002-8884-2039

Arequipa – Perú

2025

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA ELECTRONICA
CON ESPECIALIDAD EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 17 de Marzo del 2025

Dictamen: 011049-C-EPIE-2025

Visto el borrador del expediente 011049, presentado por:

2015244531 - FLORES TORRES ANTONY STIP

Titulado:

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN INDIRECTA DE FLUJO MÁSICO DE CARBÓN EN MOLINOS
VERTICALES MEDIANTE CONTROL ADAPTATIVO**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

**INGENIERO ELECTRONICO CON ESPECIALIDAD EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**29715414 - COAGUILA GOMEZ RONALD PERCING
DICTAMINADOR**



**29410027 - SULLA TORRES RAUL RICARDO
DICTAMINADOR**



**29720651 - ZEGARRA GAGO HENRY CHRISTIAN
DICTAMINADOR**



Diseño de un sistema de medición indirecta de flujo másico de carbón en molinos verticales mediante control adaptativo

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

www.coursehero.com

Fuente de Internet

1 %

2

hdl.handle.net

Fuente de Internet

1 %

3

dspace.ups.edu.ec

Fuente de Internet

1 %

4

Submitted to Universidad Católica de Santa
María

Trabajo del estudiante

1 %

5

vsip.info

Fuente de Internet

1 %

6

www.esi2.us.es

Fuente de Internet

1 %

7

Submitted to Instituto Superior de Artes,
Ciencias y Comunicación IACC

Trabajo del estudiante

<1 %

8

repositorio.unap.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

DEDICATORIA

*A mis padres, Katia y Jimmy, quienes me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia,
gracias por su constante apoyo y amor incondicional.*



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica de Santa María, por mi formación académica, agradezco especialmente a los profesores, que me enseñaron a amar mi profesión y con su conocimiento y dedicación, me guiaron a lo largo de este camino.

Agradezco a mis compañeros de trabajo, quienes me brindaron valiosas enseñanzas que trascienden lo académico. Su colaboración y disposición fueron fundamentales para culminar este proyecto, valoro profundamente su amistad.



RESUMEN

Esta investigación propone un sistema de medición indirecta del flujo másico de carbón utilizando control adaptativo, con el objetivo de mejorar la precisión de dosificación de material ante la ausencia de balanza dosificadora. Los objetivos específicos de la tesis incluyen la selección del sensor de posición, el desarrollo de un modelo matemático multivariable que representa el comportamiento del flujo másico, la creación de un algoritmo de control adaptativo basado en dicho modelo y la implementación de un sistema de medición utilizando un PLC simulado e integrando el algoritmo en Simulink. Además, se realizaron simulaciones en MATLAB/Simulink para validar la eficacia del control adaptativo. Se desarrollaron simulaciones en MATLAB/Simulink para observar el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas y ajustar los parámetros del controlador en tiempo real. Los resultados mostraron que el sistema de control adaptativo mejoró significativamente la precisión y consistencia de las mediciones del flujo másico en molinos verticales. Las simulaciones confirmaron que el sistema adaptativo es capaz de responder rápidamente a cambios en las condiciones operativas, optimizando la operación del molino y adaptándose a los cambios del sistema. En conclusión, la investigación demuestra que la implementación de un sistema de medición indirecta con control adaptativo es una solución viable y efectiva para mejorar la precisión y eficiencia en la industria del carbón, ofreciendo beneficios significativos en términos de reducción de costos operativos y mejora de la calidad del producto final.

Palabras claves: Control adaptativo, Flujo Másico, Medición indirecta.

ABSTRACT

This research proposes an indirect coal mass flow measurement system using adaptive control, with the objective of improving measurement accuracy and consistency compared to traditional methods. The specific objectives of the thesis include the selection of optimal components (sensors, actuators and controller), the development of a multivariable mathematical model representing the mass flow behavior, the creation of an adaptive control algorithm based on this model, and the implementation of a measurement system using a simulated PLC and integrating the algorithm in Simulink. In addition, simulations were performed in MATLAB/Simulink to validate the effectiveness of the adaptive control compared to conventional systems. The experiments performed included the selection and testing of high-precision sensors and actuators, the development of a mathematical model with MATLAB's System Identification Toolbox, and the implementation of an MRAC control algorithm. Simulations were developed in MATLAB/Simulink to observe the system behavior under various operating conditions and adjust the controller parameters in real time. The results showed that the adaptive control system significantly improved the accuracy and consistency of mass flow measurements in vertical mills. Simulations confirmed that the adaptive system is able to respond quickly to changes in operating conditions, optimizing mill operation and adapting to system changes. In conclusion, the research demonstrates that the implementation of an indirect measurement system with adaptive control is a viable and effective solution to improve accuracy and efficiency in the coal industry, offering significant benefits in terms of reduced operating costs and improved final product quality.

Keywords: Adaptive Control, Mass Flow, Indirect Measurement.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1. Identificación del Problema	2
2. Descripción del problema	2
3. Objetivos.....	7
3.1 Objetivo General.....	7
3.2 Objetivos Específicos	7
4. Variables	8
4.1 Variables Independientes.....	8
4.2 Variables Dependientes	8
5. Hipótesis	8
5.1 Hipótesis General.....	8
5.2 Hipótesis Específicas	8
6. Alcances.....	9
CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	10
1. Metodología de Investigación.....	10
1.1 Tipo de Investigación.....	10
1.2 Diseño de Investigación.....	10
1.3 Esquema Conceptual.....	11
2. Técnicas e Instrumentos.....	12
2.1 Técnicas	12
2.2 Instrumentos.....	12
3. Campo de Verificación	13
3.1 Ubicación Temporal	13
3.2 Ubicación espacial	13
3.3 Unidades de Estudio	13
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO.....	14

1. Antecedentes de la investigación.....	14
1.1 Antecedentes Nacionales	14
1.2 Antecedentes Internacionales	15
2. Bases Teóricas	16
2.1 Molienda	16
2.1.1 Grados de Molienda.....	17
2.1.2 Fuerzas Dominantes.....	17
2.1.3 Tipos de Molinos	19
2.1.4 Velocidad de rotación y velocidad crítica del Molino	23
2.1.5 Sistemas generales y componentes de los molinos.....	24
2.1.6 Importancia del grado de llenado	25
2.1.7 Efecto de la humedad.....	25
2.2 Flujo Másico en molino vertical	26
2.2.1 Importancia en molinos	27
2.3 Medición Indirecta.....	27
2.3.1 Propagación de incertidumbres.....	28
2.3.2 Ejemplos comunes de mediciones indirectas	29
2.4 Balanzas dosificadoras.....	30
2.4.1 Balanza de cinta transportadoras Schenck Process	30
2.4.2 Principio de funcionamiento de balanza Schenck	32
2.4.3 Balanza dosificadora rotativa de FLSmidth Pfister	33
2.4.4 Principio de funcionamiento de balanza Pfister	34
2.5 Transportadores de cadena.....	35
2.5.1 Transportadores de arrastre.....	35
2.5.2 Transportadores en masa	37
2.5.3 Cálculo de rendimiento en transportadores	39
2.6 Control Adaptativo	40
2.6.1 Control adaptativo con modelo de referencia (MRAC)	45
2.6.2 Reguladores autoajustables (STR).....	47
2.7 Importancia del Control Adaptativo	48
2.7.1 Actuador no lineal.....	49
2.7.2 Sistema de tanques interconectados.....	51
2.8 Sensores y Actuadores	52
2.8.1 Sensores	52

2.8.2 Actuadores	52
2.9 Controlador lógico programable (PLC)	53
2.9.1 Tipos de PLCs según su formato	53
2.9.2 Lenguajes de Programación	55
2.10 Studio 5000	56
2.11 FactoryTalk View	58
2.12 Normas y estándares para el diseño de HMI	59
2.13 OLE for Process Control (OPC)	59
CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL SISTEMA	62
1. Proceso de molienda de carbón	62
2. Diagrama esquemático del sistema	63
3. Descripción de transportador de cadena	65
4. Descripción de equipos e instrumentación	67
4.1. Motor trifásico	67
4.2. Variador de frecuencia	68
4.3. Encoder incremental	70
4.4. Sistema de detección de altura de carbón con transductor magnetostrictivo	73
4.5. Controlador Lógico Programable ControlLogix 1756-L75	77
4.6. Protocolo de comunicación	78
5. Cálculo del Flujo Másico	79
5.1 Bloque de cálculo de ángulo de posición de lámina de detección ($\cos\phi$)	80
5.2 Bloque de cálculo de altura de cama formada en transportador (H)	82
5.3 Bloque de cálculo del área de sección transversal del material (A)	83
5.4 Bloque de cálculo de flujo másico (M)	85
6. Identificación del modelo del proceso	87
7. Diseño del modelo de referencia	94
8. Diseño del controlador MRAC	98
9. Implementación del sistema en Simulink	104
9.1 Bloque: Modelo Sistema	105
9.2 Bloque: Cálculo de flujo	105
9.3 Bloque: Transductor de posición	107
9.4 Bloque: Controlador MRAC	109
10. Implementación en Studio 5000	110
10.1 Configuración de Cliente OPC	111

10.2 Configuración de Servidor OPC	113
10.3 Programación en Studio 5000 Logix Designer	114
10.3.1 Controlador MRAC en Studio 5000	115
10.3.2 Modelo de referencia en Studio 5000	116
10.4 Diseño de HMI en FactoryTalk View	117
CAPÍTULO V: PRUEBAS Y RESULTADOS	120
1. Simulación de controlador MRAC y PID en Simulink	120
1.1 Sintonización de controlador MRAC	120
1.2 Variación de ganancia adaptativa f	120
1.3 Variación de ganancia adaptativa θ_1	122
1.4 Variación de ganancia adaptativa θ_0	123
1.5 Comparación entre controlador MRAC y PID	126
2. Simulación de controlador MRAC en Studio 5000	128
3. Monitoreo del sistema en HMI	129
4. Resultados de la implementación	131
5. Evaluación entre sistema de medición indirecta y balanzas dosificadoras	133
6. Especificaciones técnicas del sistema de medición indirecta	135
CONCLUSIONES	137
RECOMENDACIONES	139
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140
ANEXOS	146

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Método de la caja negra</i>	3
Figura 2 <i>Ingreso de carbón al molino</i>	3
Figura 3 <i>Transportador de Cadena</i>	4
Figura 4 <i>Pérdidas de producción por bajo rendimiento</i>	5
Figura 5 <i>Sistema propuesto de control de lazo cerrado</i>	6
Figura 6 <i>Esquema Conceptual de la Investigación</i>	11
Figura 7 <i>Esquema de un molino vertical</i>	20
Figura 8 <i>Molinos Horizontales</i>	22
Figura 9 <i>Impacto de la incertidumbre en una magnitud x</i>	29
Figura 10 <i>Balanza Schenck MULTIDOS</i>	31
Figura 11 <i>Modelo básico MULTIDOS</i>	31
Figura 12 <i>Sección transversal de la carga</i>	32
Figura 13 <i>Principio de medición báscula de cinta</i>	33
Figura 14 <i>Principales componentes balanza Pfister TRW</i>	34
Figura 15 <i>Dosificación de material en balanza Pfister</i>	35
Figura 16 <i>Patrones de cadena utilizados en transportadores de arrastre</i>	36
Figura 17 <i>Transportador de arrastre con funcionamiento de una sola hebra</i>	37
Figura 18 <i>Transportador en masa básico</i>	38
Figura 19 <i>Capacidades típicas de transportadores en masa horizontales</i>	40
Figura 20 <i>Esquema básico de un control adaptativo</i>	41
Figura 21 <i>Sistema real con ruido</i>	42
Figura 22 <i>Lazos de control adaptativo</i>	43
Figura 23 <i>Esquema de un control adaptativo en bucle abierto</i>	44
Figura 24 <i>Esquema de un modelo de referencia (MRAC)</i>	46
Figura 25 <i>Esquema de un regulador autoajutable (STR)</i>	47
Figura 26 <i>Sistema en realimentación</i>	49
Figura 27 <i>Respuesta a escalón en distintos parámetros</i>	50
Figura 28 <i>Tanques interconectados</i>	51
Figura 29 <i>Respuesta escalón en distintos tipos de caudales</i>	52
Figura 30 <i>PLC EasyE4 Nano</i>	53
Figura 31 <i>PLC Compacto Rockwell Automation</i>	54
Figura 32 <i>PLC Modular ControlLogix 5580</i>	55

Figura 33 <i>Interfaz de Studio 5000</i>	57
Figura 34 <i>OPC UA en la pirámide de automatización</i>	61
Figura 35 <i>Diagrama flujo de molienda de carbón</i>	63
Figura 36 <i>Diagrama esquemático</i>	64
Figura 37 <i>Partes de transportador de cadena</i>	66
Figura 38 <i>Transportador de cadena y paleta de detección en su interior</i>	66
Figura 39 <i>Esquema de designación de modelo del motor</i>	67
Figura 40 <i>Motor trifásico modelo RF77 DRS132MC4 ES7S</i>	68
Figura 41 <i>Diagrama de designación del variador de frecuencia</i>	69
Figura 42 <i>Variador de frecuencia SEW modelo MDX61B 0110-5A3-4-0T</i>	70
Figura 43 <i>Señales senoidales y de referencia del Encoder incremental SEW ES7</i>	71
Figura 44 <i>Señales senoidales incrementales A y $\bar{A}$ en un Encoder SEW ES7S</i>	71
Figura 45 <i>Conexiones de encoder SEW ES7S a tarjeta DEH11B</i>	72
Figura 46 <i>CTS-420 Loop Position LVDT Sensor 4-20MA</i>	73
Figura 47 <i>Sensores magnetostrictivos BTL6-E500-M0200-PF-S115</i>	74
Figura 48 <i>Esquema de medición de altura a través de transductor de posición</i>	76
Figura 49 <i>Sensor magnetostrictivo para medición de desplazamiento lineal</i>	76
Figura 50 <i>PLC ControlLogix L75</i>	77
Figura 51 <i>Arquitectura de comunicación</i>	78
Figura 52 <i>Diagrama de bloques para el cálculo de flujo másico</i>	80
Figura 53 <i>Sistema biela manivela en transductor de posición</i>	81
Figura 54 <i>Altura de la cama de carbón</i>	83
Figura 55 <i>Área del carbón</i>	84
Figura 56 <i>Medidas del formador de cama</i>	84
Figura 57 <i>Respuesta del transportador de cadena</i>	88
Figura 58 <i>Interfaz PID Tuner</i>	88
Figura 59 <i>Selección del tipo de entrada en PID Tuner</i>	89
Figura 60 <i>Ingreso de datos de salida</i>	90
Figura 61 <i>Estructura de dos polos reales</i>	91
Figura 62 <i>Ajuste de la posición de los polos</i>	91
Figura 63 <i>Identificación del modelo de proceso</i>	92
Figura 64 <i>Respuesta escalón del modelo</i>	93
Figura 65 <i>Ajuste del controlador PID en base los requerimientos del sistema</i>	94
Figura 66 <i>Función de transferencia de un sistema de segundo orden</i>	95

Figura 67 Respuesta escalón del modelo de referencia diseñado	97
Figura 68 Diagrama de bloques del controlador MRAC.....	98
Figura 69 Controlador MRAC	103
Figura 70 Simulación del modelo de sistema y el controlador MRAC	104
Figura 71 Desarrollo del bloque Modelo Sistema	105
Figura 72 Simulación de transductor de posición	107
Figura 73 Comportamiento del transductor de posición	108
Figura 74 Desarrollo del bloque MRAC.....	109
Figura 75 Modelo del sistema y transductor de posición en Simulink	110
Figura 76 Enlace de comunicación OPC.....	111
Figura 77 Configuración de parámetros OPC	112
Figura 78 Desarrollo de bloque Comunicación OPC.....	112
Figura 79 Creación de Tópico OPC	113
Figura 80 Sistema con el controlador MRAC en Studio 5000	114
Figura 81 Subrutinas del programa principal	115
Figura 82 Desarrollo de bloque PIDE.....	115
Figura 83 Programación en bloque de funciones de controlador MRAC	116
Figura 84 Programación del modelo de referencia en Studio 5000	117
Figura 85 Pantalla principal de HMI	118
Figura 86 Faceplate de bloque PIDE	119
Figura 87 Respuesta de sistema ante variación de ganancia f	121
Figura 88 Variable de control ante variación de ganancia f	121
Figura 89 Respuesta de sistema ante variación de ganancia θ_1	122
Figura 90 Variable de control ante variación de ganancia θ_1	123
Figura 91 Variable de control ante variación de ganancia θ_0	124
Figura 92 Respuesta del sistema con MRAC	125
Figura 93 Comparación entre controlador MRAC y PID	126
Figura 94 Respuesta del sistema ante MRAC en Studio 5000	128
Figura 95 Monitoreo del flujo másico que ingresa al molino.....	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de TAG del sistema.....	65
Tabla 2 Placa de datos de motor	68
Tabla 3 Datos técnicos de variador SEW modelo MDX61B 0110-5A3-4-0T.....	69
Tabla 4 Datos técnicos del encoder SEW ES7S.....	72
Tabla 5 Comparación técnica entre transductores de posición LVDT y magnetostrictivo	75
Tabla 6 Características del controlador ControlLogix L75	77
Tabla 7 Cálculo de la velocidad lineal del transportador de cadena.....	86
Tabla 8 Pruebas con variación de ganancia adaptativa f	120
Tabla 9 Pruebas con variación de ganancia adaptativa θ_1	122
Tabla 10 Pruebas con variación de ganancia adaptativa θ_0	123
Tabla 11 Comparación de respuestas transitorias	127
Tabla 12 Sistema de Medición de Flujo Másico: Situación Inicial vs. Nuevo Sistema	132
Tabla 13 Costo de instalación de sistema de detección.....	134
Tabla 14 Análisis comparativo entre balanzas	134
Tabla 15 Resumen de especificaciones técnicas	136

INTRODUCCIÓN

La industria del carbón, en su proceso de transformación y uso, ha enfrentado desafíos constantes para mejorar la eficiencia y precisión en sus operaciones. Uno de esos desafíos radica en la medición adecuada del flujo másico de carbón en los molinos verticales, aspecto crucial para garantizar niveles óptimos de producción y calidad. Tradicionalmente, la medición directa mediante balanzas dosificadoras ha sido el enfoque predominante; sin embargo, estos equipos presentan limitaciones en cuanto a costos de adquisición, instalación y mantenimiento (Román, 2018; Schenck Process, 2009, 2015; FLSmidth Pfister, 2014).

Dada esta situación, se hace necesario explorar métodos alternativos que representen menores costos y mayor adaptabilidad. En ese contexto, la presente investigación propone el uso de técnicas de control adaptativo, que permiten el autoajuste del sistema ante perturbaciones y cambios operativos. Este tipo de control ha demostrado ser una herramienta eficaz para mantener mediciones precisas y consistentes, adaptándose a las condiciones dinámicas del proceso (Inga, 2019; Nuñez, 2022).

El sistema propuesto se fundamenta en el desarrollo de una medición indirecta del flujo másico de carbón, utilizando sensores, un modelo matemático multivariable, y un controlador adaptativo implementado en un entorno simulado con MATLAB/Simulink y Studio 5000. Este enfoque no solo busca mejorar la precisión del proceso, sino también reducir errores humanos, tiempos de respuesta, y costos operativos, respondiendo a la creciente demanda de procesos más eficientes en la industria (Moreno, 2021; Llamosa et al., 2009).

Asimismo, el sistema puede aplicarse a otras industrias que emplean transportadores de cadena, como la minería y la producción de minerales. La posibilidad de adaptar el sistema a diferentes entornos lo convierte en una solución versátil e innovadora. En ese sentido, esta investigación no solo tiene un valor técnico y académico, sino también una relevancia práctica e industrial al proporcionar una alternativa económicamente viable a las balanzas dosificadoras convencionales.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1. Identificación del Problema

En la industria de procesamiento de carbón, el desafío principal es lograr una medición precisa del flujo másico que ingresa a los molinos verticales, lo cual es esencial para mantener la estabilidad operativa y optimizar la eficiencia energética. Por consiguiente, la falta de un sistema de medición de flujo de entrada lleva a una dosificación inadecuada del carbón, impactando negativamente tanto en la calidad del producto como en el consumo energético. Esta situación se manifiesta a través de síntomas como el aumento en la presión diferencial y la temperatura de los gases del molino, así como un incremento en la velocidad de vibración y en la carga de flujo a ventiladores adyacentes al molino, desencadenando operaciones inestables, desgaste de componentes, paradas no programadas y pérdidas de producción.

Sin embargo, la implementación de equipos con métodos de medición directa enfrenta obstáculos, como el elevado costo de adquisición, instalación y costos operativos. Por ello, la solución propuesta es desarrollar un sistema de medición indirecta con la instalación de instrumentación necesaria para la medición indirecta de flujo y empleando un controlador adaptativo, que garantice un flujo constante y preciso de carbón. Este enfoque pretende superar las limitaciones de los métodos manuales y contribuir a la reducción de los costos operativos.

2. Descripción del problema

El proceso de molienda de carbón en molinos verticales es esencial para diversas industrias, y la precisión en la medición del flujo másico del carbón es crítica para garantizar una operación eficiente y segura. Por lo que, no contar con un sistema de medición presentan desafíos en términos de precisión, velocidad de respuesta y adaptabilidad a las fluctuaciones en las condiciones de operación. Esta problemática se ve agravada por las variaciones inherentes en la calidad y composición del carbón. Así, la necesidad de diseñar un sistema de medición indirecta surge como respuesta a estos retos, buscando emplear un control adaptativo que pueda ajustarse en tiempo real a las variaciones del proceso, garantizando mediciones precisas y consistentes, vitales para la optimización de la producción.

A continuación, se menciona el método de la caja el cual detalla de forma más explícita el problema que se tiene.

Figura 1

Método de la caja negra

Situación actual → CAJA NEGRA → Situación deseada

Nota. Elaboración propia

Utilizando el método de la caja negra se plantea las siguientes preguntas:

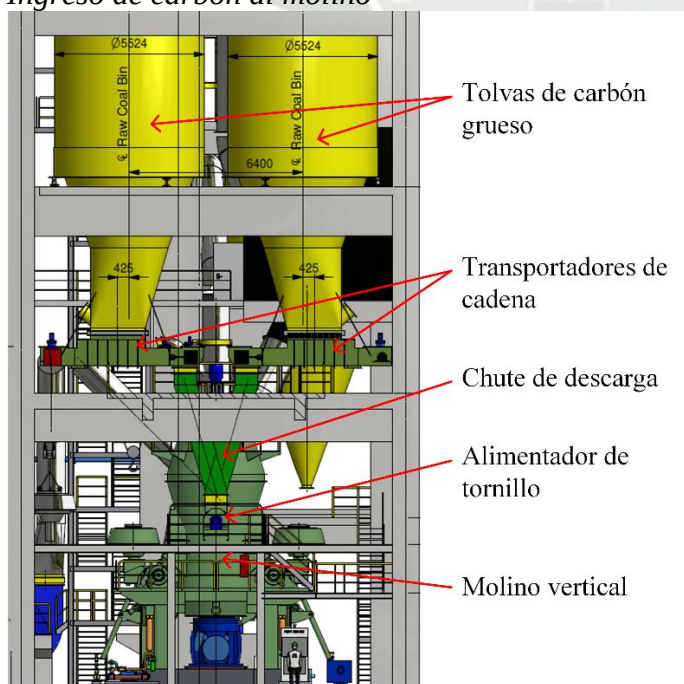
Situación Actual:

a) ¿Qué se tiene?

Se tiene un sistema de alimentación de carbón grueso a un molino vertical, donde el carbón ingresa lateralmente desde la parte superior del cuerpo del molino a través de un alimentador de tornillo, un mecanismo tubular diseñado para el transporte continuo del material a moler. Este proceso de dosificación se realiza mediante un chute que recibe el carbón de dos transportadores de cadena, estos reciben el material que cae a través de agujas que regulan el flujo desde las tolvas que almacenan el carbón grueso, que tienen una capacidad de 150T, estos transportadores de cadena tienen una capacidad de transporte que varía entre 3.1 y 31 t/h.

Figura 2

Ingreso de carbón al molino



Nota. Elaboración Propia

Para regular el paso de carbón de las tolvas a los transportadores de cadena, el operario de campo debe modificar manualmente la posición de las agujas o pines. Esta tarea es especialmente crucial debido a la variabilidad en la humedad y características del carbón, que pueden causar apelmazamiento o segregación de finos. Por lo tanto, es necesaria una constante intervención del operario en campo para asegurar un flujo adecuado y eficiente del carbón.

Figura 3
Transportador de Cadena



Nota. Elaboración Propia

b) ¿Qué está pasando?

Actualmente, el operador de sala de control encargado del proceso, utiliza el valor de las celdas de carga ubicadas en cada tolva de carbón para estimar la cantidad de carbón que está ingresando al molino, y de acuerdo a las variables físicas que se miden en el molino, el operador de sala de control coordina con el operario de campo la apertura o cierre de las agujas o pines. Entonces, al no conocer el valor del flujo de carbón que ingresa al molino, este presenta inestabilidad en su operación, esto se puede ver reflejado en los diferentes parámetros de operación del molino, como lo son:

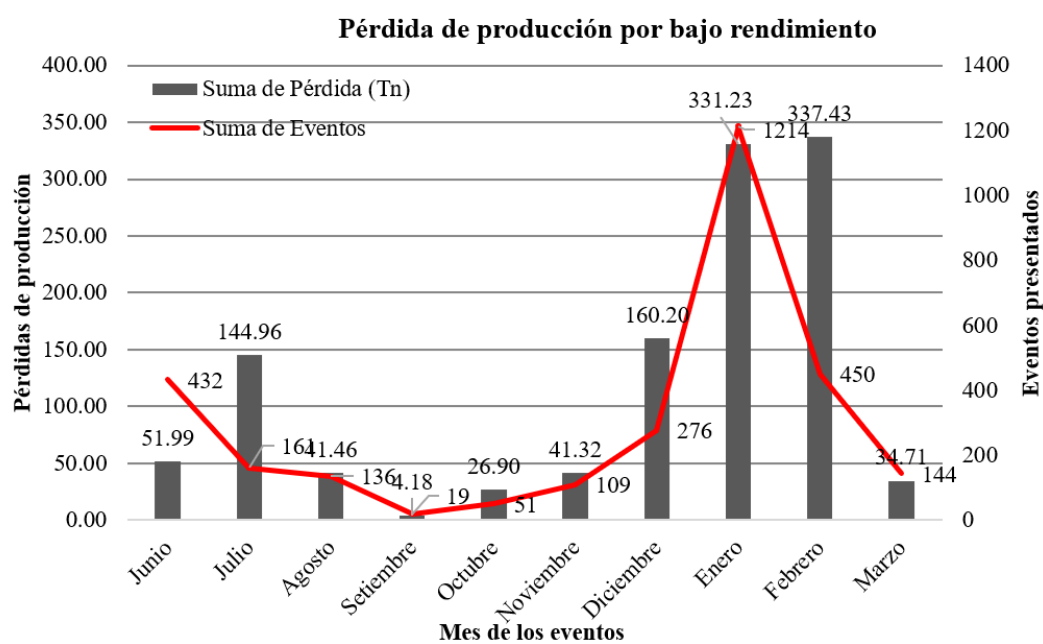
- Aumento del DP (presión diferencial) de los gases de entrada y salida del molino (típicamente alrededor de 60 mbar)
- Aumento de la temperatura de los gases de salida del molino (alrededor de 85°C)
- Se presenta un incremento en la velocidad de vibración (en condiciones estables el molino opera entre 1.5 y 2.5 mm/s)
- Un aumento en el porcentaje de carga de flujo en IDFAN, esto indica que el molino presenta una sobre carga de material.

c) ¿Qué sucedería si la situación actual continúa?

Si la situación actual continúa, podría enfrentar problemas continuos de ineficiencia y falta de precisión en las mediciones, lo que podría traducirse en pérdidas económicas, aumento en el consumo de recursos, y potencialmente afectar la seguridad del proceso industrial. Además, el no conocer el flujo de carbón que ingresa al molino podría llevar a las siguientes consecuencias:

- Inestabilidad en la operación, desgaste de componentes mecánicos del molino.
- Paradas no programadas por sobrecarga de molino.
- No se puede alcanzar el máximo rendimiento del molino en toneladas/hora.
- Pérdidas de producción por bajo rendimiento.

Figura 4
Pérdidas de producción por bajo rendimiento



Nota. Elaboración Propia

Principalmente, las pérdidas de producción por bajo rendimiento están presentando significativas repercusiones económicas, ya que estas pérdidas se traducen en una disminución de la eficiencia operativa, afectando directamente la rentabilidad. Además, al tener el rendimiento reducido implica un uso ineficiente de recursos, provocando el incremento de los costos y disminuyendo los márgenes de beneficio, lo cual impacta negativamente en la sostenibilidad financiera de la operación.

Situación Deseada:

a) ¿Qué aspira tener cuando finalice el trabajo?

Al concluir este proyecto, se espera lograr el diseño de un sistema de medición indirecta de flujo másico de carbón, optimizado con control adaptativo. Este sistema buscará demostrar cómo se puede mejorar la precisión y eficiencia en las mediciones, optimizar el proceso de molienda, y reducir tanto el consumo de recursos como los costos operativos. Además, se anticipa que cumplirá con beneficios específicos, tales como:

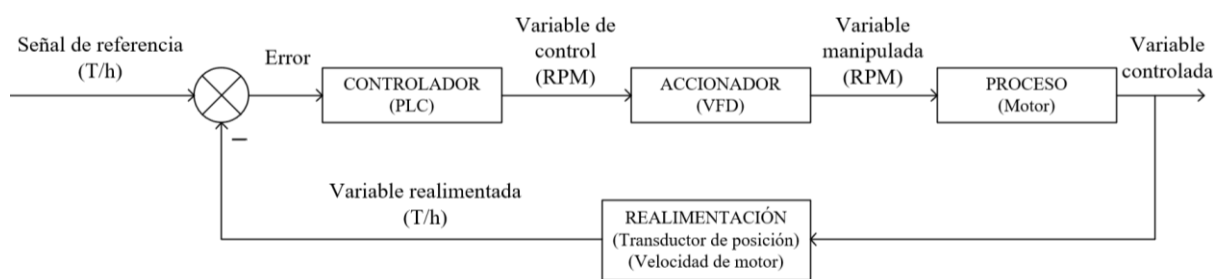
- Conocer el flujo real de carbón que ingresa al molino.
- Al conocer el flujo real que ingresa, se puede aumentar el flujo para alcanzar el rendimiento máximo del molino de carbón.
- Se reduce las pérdidas de producción por variables del proceso.
- Se puede obtener una operación del molino estable.
- Se reduce el consumo energético al disminuir las paradas.

b) En el informe final, ¿qué se espera encontrar?

En el informe final, se analizarán dos alternativas principales utilizadas en la industria para la medición del flujo másico de carbón: básculas dosificadoras de faja transportadora y básculas dosificadoras rotativas. Ambas opciones emplean celdas de carga y ofrecen alta precisión (hasta 0.5% en faja y 1% en rotativas), siendo consideradas las mejores alternativas disponibles. Sin embargo, para el informe final también se considerará las desventajas de estas básculas, como el elevado costo de adquisición e instalación y la necesidad de modificaciones mecánicas en la planta. El informe se centrará en cómo el sistema propuesto, que utiliza un controlador adaptativo, un transductor de posición, un controlador PLC y actuadores, podría ofrecer una solución más rentable y menos invasiva para la medición de flujo en este contexto. A continuación, se muestra el sistema de control de lazo cerrado del sistema propuesto.

Figura 5

Sistema propuesto de control de lazo cerrado



Nota. Elaboración Propia

Se espera que el diseño propuesto en el informe final cuente con un conjunto de sensores y actuadores altamente eficientes y precisos. Entre ellos, se pretende utilizar los transductores de posición, que, con su tecnología de magnetostricción, prometen una detección exacta de la altura de la cama de carbón. Igualmente, esenciales son los encoders, encargados de capturar la velocidad angular del motor con gran exactitud. La regulación de la velocidad del transportador recae en un motor SEW, que, junto al variador de frecuencia, se anticipa que aportará un control minucioso y adaptable. La elección de estos componentes se ha realizado con miras a garantizar una medición fidedigna y un manejo óptimo del flujo de carbón, elementos críticos para la efectividad del sistema en entornos industriales.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de medición indirecta para determinar el flujo másico de carbón en molinos verticales, utilizando un control adaptativo que garantice mediciones precisas y consistentes.

3.2 Objetivos Específicos

- Entender y describir el funcionamiento del transportador de cadena y seleccionar el sensor para el cálculo del flujo.
- Desarrollar un modelo matemático multivariable que refleje el comportamiento del flujo másico de carbón en molinos verticales.
- Desarrollar un algoritmo de control adaptativo basado en el modelo propuesto para ajustes en tiempo real según variaciones operativas y características del carbón.
- Desarrollar el sistema de medición indirecta para el molino vertical utilizando un PLC simulado e integrando el algoritmo de control adaptativo en Simulink.
- Realizar simulaciones en MATLAB/Simulink para validar la eficacia y precisión del control adaptativo en molinos verticales, comparándolo con sistemas convencionales.

4. Variables

4.1 Variables Independientes

Control adaptativo.

Sistema de medición indirecta.

4.2 Variables Dependientes

Precisión y consistencia en la medición del flujo másico de carbón en molinos verticales.

5. Hipótesis

5.1 Hipótesis General

El estudio de técnicas de control adaptativo utilizando medición indirecta para determinar el flujo másico de carbón en molinos verticales ofrecerá una opción más económica frente a la balanza dosificadora, manteniendo mediciones consistentes que mejorarán la eficiencia y seguridad del proceso de molienda.

5.2 Hipótesis Específicas

- La comprensión y descripción del funcionamiento del transportador de cadena, junto con la correcta selección del sensor para el cálculo del flujo, permitirá realizar un sistema de medición que optimice el control del flujo másico.
- El desarrollo de un modelo matemático multivariable será capaz de representar de manera precisa y fiable el comportamiento del flujo másico de carbón para la alimentación de molinos verticales.
- Un algoritmo de control adaptativo desarrollado podrá ajustarse eficazmente en tiempo real a las variaciones en las condiciones de operación y las características del carbón, mejorando la eficiencia del proceso.
- El desarrollo de un sistema de medición indirecta utilizando un PLC simulado e integrando el algoritmo de control adaptativo en Simulink proporcionará una mayor precisión y adaptabilidad.

- Las simulaciones realizadas en MATLAB/Simulink confirmarán la eficacia del control adaptativo, demostrando mejoras significativas en la precisión y eficiencia del molino vertical comparado con sistemas convencionales.

6. Alcances

La investigación tiene como principal alcance el desarrollo de un sistema de medición innovador que integra tecnologías de control adaptativo, centrándose en molinos verticales, y buscando una solución más económica que las balanzas dosificadoras en términos de costo de instalación. Para ello se evaluará en detalle las variaciones en condiciones de operación y las características intrínsecas del carbón para adaptarse a estas dinámicas. Además, se realizarán pruebas comparativas con sistemas convencionales para determinar la eficacia y beneficios del sistema propuesto en contextos reales de operación.

CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1. Metodología de Investigación

- La investigación comenzará con una fase exploratoria, donde se hará una revisión exhaustiva de literatura para entender los sistemas actuales y sus limitaciones, esta revisión nos permitirá definir objetivos específicos y las herramientas necesarias para el diseño.
- A continuación, se realizará un análisis del funcionamiento del transportador de cadena y de las características específicas del flujo másico del carbón, enfocándose en la selección del sensor adecuado para el cálculo del flujo. Esta fase es crítica para identificar los parámetros esenciales que influyen en el desempeño del sistema, dado que los demás componentes ya están instalados. Con base en este análisis, se procederá a esbozar un diseño inicial que integre el sensor seleccionado, asegurando que el sistema funcione de manera óptima y cumpla con los objetivos del proyecto.
- Posteriormente, se desarrollará el sistema de control adaptativo, diseñando algoritmos que permitan una medición precisa y adaptativa en tiempo real y una vez integrados todos los componentes, se realizarán pruebas en un entorno controlado para validar su funcionamiento.
- Finalmente, se documentará todo el proceso, resultados y recomendaciones para futuras implementaciones o mejoras.

1.1 Tipo de Investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que su objetivo principal es abordar y resolver una necesidad específica en la industria, diseñando un sistema para mejorar la medición del flujo másico de carbón. A través de un control adaptativo, se busca optimizar el rendimiento y la precisión de las operaciones en molinos verticales que no cuentan con una balanza dosificadora, asegurando una dosificación más eficiente y precisa del material.

1.2 Diseño de Investigación

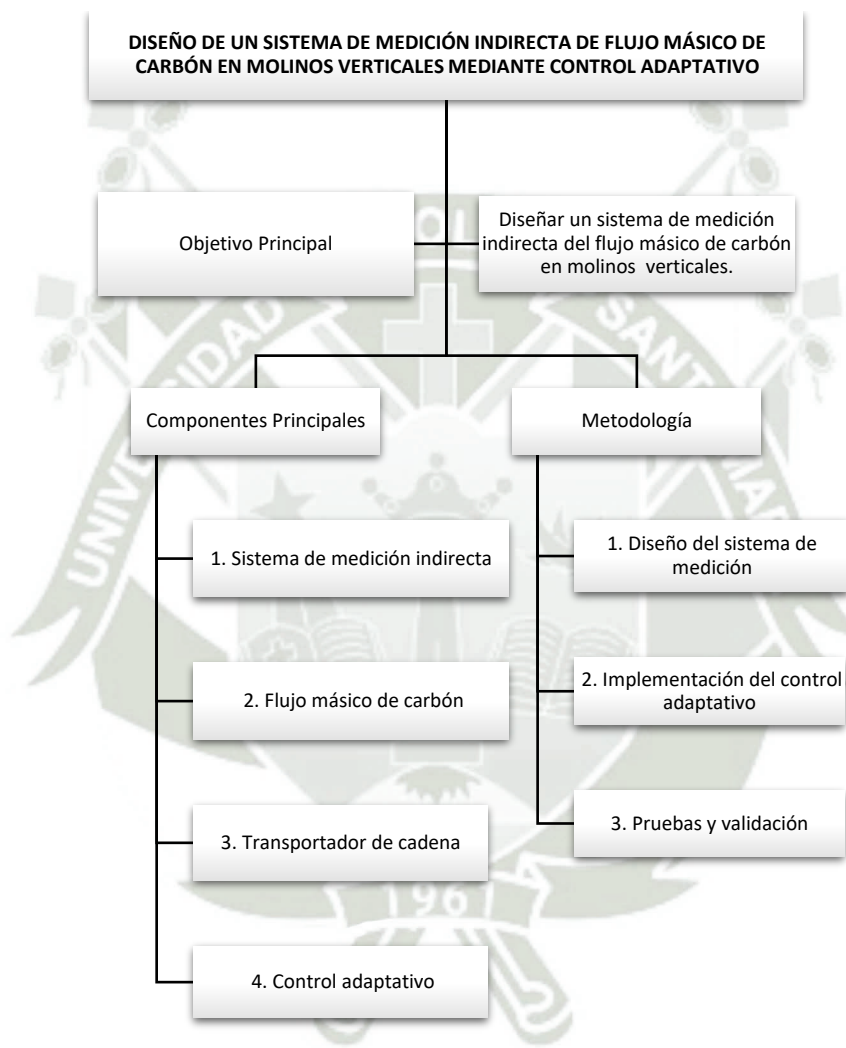
La investigación se encuadra dentro del diseño de Investigación Experimental, puesto que se busca intervenir y adaptar un sistema para evaluar su rendimiento en un contexto

específico. Además, el estudio se centra en manipular variables, como el control adaptativo, para observar sus efectos en la medición indirecta del flujo másico en molinos verticales.

1.3 Esquema Conceptual

Figura 6

Esquema Conceptual de la Investigación



Nota. Elaboración propia

La investigación se centra en diseñar un sistema que permita medir de forma indirecta el flujo másico del carbón en molinos verticales, donde el principal objetivo es desarrollar un sistema preciso que, mediante un control adaptativo, optimice esta medición. Los componentes esenciales de la investigación incluyen el propio sistema de medición, la especificidad del flujo másico de carbón, la particularidad de los molinos verticales y la implementación del control adaptativo.

La metodología se desarrollará en tres fases: diseño del sistema de medición, implementación del control adaptativo y, finalmente, pruebas y validación de diseño sobre los molinos verticales.

2. Técnicas e Instrumentos

2.1 Técnicas

Se emplearán técnicas metodológicas de simulación computacional y modelado matemático. La simulación computacional permitirá recrear un entorno controlado donde se manipularán y controlarán variables críticas para el diseño del sistema de medición indirecta del flujo másico de carbón. Esta técnica es esencial para observar y medir los resultados con precisión, optimizando el rendimiento del sistema antes de su implementación real. Además, el modelado matemático proporcionará una base teórica sólida para desarrollar algoritmos de control adaptativo, garantizando la exactitud y consistencia de las mediciones y mejorando significativamente la eficiencia operativa de los molinos verticales.

2.2 Instrumentos

Para la investigación, se emplearán softwares de simulación especializados que incluyen MATLAB/Simulink y Studio 5000.

- **MATLAB/Simulink:** Este software permitirá recrear las condiciones de operación del molino vertical y el flujo másico de carbón. Utilizando MATLAB/Simulink, se podrán ajustar parámetros críticos, introducir perturbaciones controladas y evaluar la respuesta del sistema bajo diferentes escenarios operativos. Esta herramienta es esencial para simular el comportamiento dinámico del sistema, facilitando la identificación de posibles problemas y la optimización del diseño del sistema de medición indirecta antes de su implementación en el entorno real.
- **Studio 5000:** Este software se utilizará para programar y simular el controlador lógico programable (PLC). Studio 5000 permitirá integrar el control adaptativo en el sistema, proporcionando una plataforma robusta para la gestión y ajuste de los parámetros del controlador. La simulación con Studio 5000 facilitará la validación

del diseño del PLC y su interacción con el sistema de control adaptativo, asegurando que el sistema funcione de manera eficiente y precisa.

El uso combinado de MATLAB/Simulink y Studio 5000 permitirá una evaluación sistemática y detallada del sistema de medición, desde la simulación de las condiciones de operación hasta la programación y ajuste del controlador.

3. Campo de Verificación

3.1 Ubicación Temporal

La investigación se realizará en el año 2023.

3.2 Ubicación espacial

La ubicación espacial de esta investigación se centra en plantas industriales que operan con molinos verticales para el procesamiento de carbón.

3.3 Unidades de Estudio

Dentro de la investigación, las unidades de estudio, que son los principales elementos o sujetos sobre los cuales se realiza el estudio, son:

- Molinos Verticales: Esencialmente, se implementará sobre un transportador de cadenas y evaluará el sistema de medición indirecta. Estudiar sus características y operación es clave para el diseño adecuado del sistema.
- Flujo másico de carbón: Este es el parámetro principal que el sistema intentará medir de manera indirecta. Se analizarán las características del flujo másico, como su densidad, velocidad y volumen.
- Sistema de Control Adaptativo: Representa la metodología o técnica que se utilizará para ajustar y optimizar el proceso de medición en función de las condiciones cambiantes del molino o del flujo de carbón.
- Componentes del sistema de medición: Estos podrían incluir sensores, actuadores, interfaces y otros dispositivos que se integren en el sistema de medición indirecta para lograr una medición precisa.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

1. Antecedentes de la investigación

1.1 Antecedentes Nacionales

Huamani y Fabian (2021), en su tesis “Diseño de un sistema oleo hidráulico para el accionamiento de la compuerta de una tolva de flujo masico de 1 ton de capacidad en una mina de cobre - Región de Junín”, se centraron en diseñar un sistema oleo hidráulico para operar la compuerta de una tolva de flujo másico de 1 tonelada, instalada en una mina de cobre en Junín, donde para definir la metodología correcta, realizaron evaluaciones y establecieron parámetros básicos, como la carga total de la tolva y los tiempos de extensión y retracción de los cilindros hidráulicos, empleando cálculos y métodos de diseño, incluyendo la teoría de fallas, para dimensionar los actuadores hidráulicos y verificar sus esfuerzos máximos, seleccionando acero C35 para el vástago y tubos de inoxidable para las cañerías, asegurando así su resistencia y funcionamiento óptimo. Además, en el proceso, se tuvieron en cuenta criterios de esfuerzos, ecuación de continuidad, cálculo del Reynolds y pérdidas en tuberías, que mostraron resultados que fueron validados por la selección de materiales y dimensiones, cumpliendo con los factores de seguridad establecidos y las especificaciones de operación en campo, contribuyendo a solucionar un problema industrial significativo mediante un diseño oleo hidráulico optimizado.

Ipanaque y Paredes (2021), en su tesis “Propuesta de un sistema automatizado de control de humedad para optimizar la línea de secado de harina de pescado” evaluaron las condiciones del proceso de secado en una planta de producción de harina de pescado, con el objetivo de proponer un sistema automatizado para regular la humedad entre 10 y 15%. La metodología que aplicaron los autores estuvo enfocada en teorías existentes adoptando un enfoque cuantitativo y un diseño no experimental y transeccional, ya que los datos se recopilaron en un corto periodo y solo se estudiaron teóricamente las variables. Los resultados indicaron que la humedad de salida depende principalmente de la capacidad de evaporación del secador y del flujo másico de harina, aunque el porcentaje de humedad de ingreso también influía, este no era manipulable y a través del procesamiento de datos reales y teóricos, se logró una optimización del 7% en la humedad de salida de la línea de secado.

Núñez (2022), en su tesis “Diseño de un sistema de control PID adaptativo de temperatura en cubos de mango para reducir el consumo eléctrico del túnel continuo IQF en la

empresa Procesadora Perú S.A.C.” mencionan los crecientes niveles de agroexportaciones en Perú y la crucial importancia de la conservación de alimentos, y basándose en esta información el autor identifica un problema en la empresa Procesadora Perú S.A.C., relacionado con la variabilidad de la temperatura de los productos al entrar al túnel de congelación IQF, lo que generaba un uso elevado de energía eléctrica y afectaba la calidad del producto final. Para solucionar esto, se propuso el diseño de un sistema de control PID adaptativo el cual sería capaz de analizar constantemente los niveles de temperatura del producto dentro del túnel y regular las revoluciones de los ventiladores en consecuencia. Además, también se menciona que la implementación de este método no solo aseguraría la consistencia en la calidad del producto, al cumplir con los estándares del mercado, sino que también reduciría el consumo eléctrico de los ventiladores hasta en un 10%, haciéndolo una solución viable y eficiente.

1.2 Antecedentes Internacionales

Panamá y Rojas (2021) en su tesis “Diseño e implementación de un sistema de supervisión, control y adquisición de datos en el área de molienda de la planta concentradora de minerales Multicoexpa Cia. Ltda.” se abordó la optimización de la planta concentradora de minerales Multicoexpa CIA. LTDA, centrándose en la molienda, para incrementar la producción de 50-80 ton/día a 100-160 ton/día y reducir costos. La metodología involucró la renovación y adquisición de equipos, especialmente en el área de molienda, y la implementación de sistemas mecatrónicos para supervisar y controlar variables críticas, ya que la pulpa resultante afectaba directamente la recuperación de minerales. Esta automatización busco mejorar la eficiencia del proceso y la calidad del concentrado de minerales, obteniendo como resultado, él logró no solo incrementar y controlar la producción, sino también reducir los riesgos laborales al minimizar el contacto directo de los operarios con la maquinaria, demostrando que la inversión en tecnología mecatrónica es vital para la evolución y seguridad en la industria minera.

Micossi y Reynoso (2019) en su proyecto de fin de carrera “Diseño y automatización de planta de producción de masa de moldeo” se centran en mejorar el proceso productivo manual de la masa de moldeo en una fábrica, ya que dada la creciente demanda y la necesidad de satisfacer un mercado competitivo, para ello establecieron una metodología el cual implicaba la automatización parcial de la planta, modificando y diseñando nuevas instalaciones para incrementar la eficiencia, la capacidad productiva y mejorar las condiciones laborales,

donde se realizaron análisis de costos, impactos ambientales y socioeconómicos, asegurando un equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del ecosistema y bienestar social. Como resultado, se logró una producción más eficiente y segura, viable técnica y económicamente, sin comprometer futuras generaciones. Los autores mencionan que, aunque el proyecto ha sido exitoso, permanece abierto a análisis y mejoras futuras para adaptarse a las necesidades específicas de la empresa y mantener altos estándares de calidad en sus productos.

Inga (2019), en su tesis “Diseño de un controlador PID adaptativo para el control de nivel en tres tanques cilíndricos interconectados” emplea una técnica de diseño de controladores PID adaptativos para abordar la multivariabilidad y no linealidad en el proceso de nivel de tanques interactuantes. La metodología que se utiliza se desarrolla "in silico", lo que permite investigar las propiedades y comportamiento del sistema sin riesgo para la planta real, para ello se diseña un controlador PID adaptativo utilizando el modelo matemático de una planta real, que incorpora las no linealidades del sistema de tres tanques interactuantes, donde los tanques, interconectados y acompañados de bombas, válvulas y tuberías, representan un entorno complejo y multivariable. Los resultados obtenidos en base a esta investigación sobre la implementación de este controlador permiten un aumento en la gestión del nivel de líquido en los tanques, optimizando el rendimiento del sistema y proporcionando un control más preciso y adaptable a variaciones y no linealidades, contribuyendo así a la eficiencia y seguridad del proceso.

2. Bases Teóricas

2.1 Molienda

La molienda es una operación unitaria esencial que implica la reducción de tamaño de materiales mediante la aplicación de fuerzas mecánicas. En la industria minera, se utiliza después de la trituración y tiene como objetivo principal la liberación de minerales valiosos de la ganga. Este proceso es crucial porque permite la separación eficiente de los minerales útiles de los no deseados, facilitando su concentración y mejorando la pureza del producto final. La molienda se realiza mediante equipos denominados molinos, que pueden operar en condiciones secas o húmedas. La selección del tipo de molino y las condiciones de operación (como la velocidad de rotación y el grado de llenado) son factores clave que determinan la eficiencia del proceso. La molienda no solo reduce el tamaño del material, sino que también prepara el material para procesos posteriores como la flotación o la lixiviación (Blanco, 2014). Este

proceso implica la aplicación de diferentes fuerzas mecánicas, como compresión, cizallamiento, impacto y abrasión, que fragmentan el material hasta alcanzar el tamaño deseado. La eficiencia de la molienda influye directamente en la calidad y la pureza del producto final, siendo una etapa crítica en la cadena de producción minera. Además, optimiza el consumo de energía y los costos operativos, mejorando la rentabilidad del proceso minero.

2.1.1 Grados de Molienda

La molienda se clasifica según el tamaño de los productos obtenidos, que puede variar desde unos pocos milímetros hasta unas micras. Este proceso se lleva a cabo con equipos llamados molinos, que pueden operar en seco o en húmedo. En la molienda en seco, es ideal que la humedad del material no exceda el 3-4% para evitar problemas operativos y optimizar el rendimiento del molino. En cambio, en la molienda en húmedo, el contenido de agua es significativamente mayor, variando entre el 40% y el 70% en volumen. Este alto contenido de agua facilita la reducción del tamaño de las partículas y mejora la eficiencia del proceso, aunque también requiere una gestión adecuada del agua utilizada. La elección entre molienda en seco o en húmedo depende de varios factores, incluyendo las propiedades del material a procesar y los requisitos del producto final. La molienda en húmedo es más común debido a su eficiencia en la reducción de tamaño y su capacidad para manejar materiales con alta humedad sin problemas de adherencia o pastosidad. Sin embargo, para ciertos materiales sensibles a la humedad, la molienda en seco es preferible (Blanco, 2014).

2.1.2 Fuerzas Dominantes

Las fuerzas mecánicas en la molienda son fundamentales para entender cómo se lleva a cabo la reducción de tamaño de los materiales y cómo seleccionar el equipo adecuado para cada aplicación. Estas fuerzas incluyen compresión, cizallamiento, percusión y abrasión, cada una con características específicas que influyen en la eficiencia del proceso de molienda.

A. Compresión

La compresión es una fuerza que actúa sobre el material aplastándolo entre dos superficies duras. Puede aplicarse de manera discontinua en trituradoras de mandíbulas, giratorias y de cono, donde el material se comprime y se rompe varias veces, o de manera continua en molinos de cilindros o de rodillos, donde el material pasa a través

de un espacio estrecho y se comprime una sola vez. Este método es eficiente para materiales duros y abrasivos, y es ideal para la trituración primaria (Blanco, 2014).

B. Percusión o Impacto

La percusión o impacto se utiliza en trituradoras de impacto y molinos de bolas de alta velocidad. En este proceso, el material se fragmenta al recibir golpes bruscos y de alta energía. Este tipo de fuerza es ideal para materiales frágiles y no abrasivos, ya que produce una reducción rápida del tamaño de las partículas y genera una gran cantidad de finos (Blanco, 2014).

C. Abrasión

La abrasión es una fuerza predominante en molinos de barras, bolas, autógenos y de guijarros. En estos equipos, las partículas se reducen de tamaño debido al roce constante entre ellas y los cuerpos moledores. La abrasión es especialmente efectiva para la molienda fina, donde se requiere un alto grado de homogeneidad en el tamaño de las partículas. Los molinos autógenos y de guijarros son particularmente útiles para materiales que no deben contaminarse con hierro, como los minerales industriales y ciertos productos químicos (Blanco, 2014).

D. Flexión y Cizallamiento

La flexión y el cizallamiento son fuerzas que actúan combinadamente en trituradoras de cilindros dentados o acanalados. Estos equipos aplican una fuerza de desgarramiento, acompañada de compresión adicional, que es efectiva para materiales tenaces, pero poco abrasivos. La flexión y el cizallamiento permiten una fragmentación controlada, lo que es beneficioso para aplicaciones donde se necesita mantener la integridad estructural del material hasta cierto punto antes de su reducción final (Blanco, 2014).

E. Selección de Equipos

La selección del equipo de molienda depende de varios factores, incluyendo la naturaleza del material a ser molido, el tamaño de las partículas iniciales y finales, y las propiedades específicas del material como su dureza y abrasividad. Entender las fuerzas mecánicas involucradas en la molienda permite optimizar el proceso y seleccionar el equipo más adecuado para lograr una eficiencia máxima y un producto de alta calidad (Blanco, 2014).

2.1.3 Tipos de Molinos

En la industria de la molienda, existen diversos tipos de molinos, cada uno con características específicas que los hacen adecuados para ciertos materiales y aplicaciones. Estos molinos se distinguen principalmente por el tipo de fuerza que aplican y los medios de molienda que utilizan.

A. Molinos Verticales

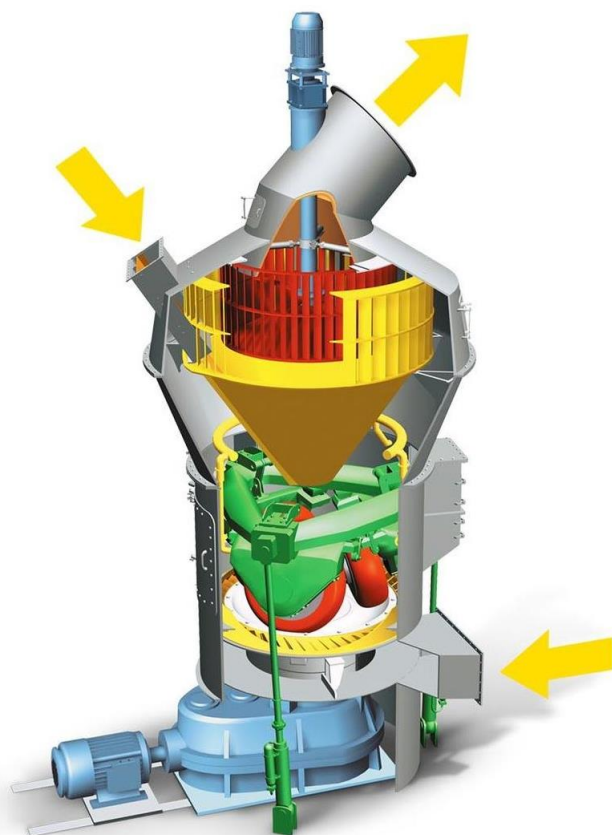
Los molinos verticales son una opción eficiente y compacta para la molienda de materiales. En estos molinos, el eje de rotación está orientado verticalmente, y utilizan rodillos que giran sobre una mesa giratoria para triturar y moler el material. Este diseño permite una molienda eficiente con un menor consumo de energía y un control preciso del tamaño de las partículas. Los molinos verticales son ampliamente utilizados en la industria del cemento y para la molienda de minerales. Su configuración vertical facilita el uso del espacio en planta y reduce los costos de infraestructura. Además, los molinos verticales permiten un mayor control del flujo de material y la velocidad de molienda, lo que resulta en una mayor eficiencia del proceso (Blanco, 2014).

De acuerdo con Mischorr y Delgado (2009), un molino vertical consta de cuatro componentes esenciales:

- El sistema de accionamiento compuesto por motor y reductor, la superficie donde se realiza la molienda junto con rodillos que utilizan presión hidráulica, el clasificador que distingue entre partículas de distintos tamaños y, finalmente, el principal ventilador.
- El sistema de accionamiento, guiado principalmente por el reductor, tiene como objetivo transferir la energía del motor hacia la superficie de molienda y soportar tanto las fuerzas generadas por la molienda como el peso de la superficie misma.
- La superficie de molienda recibe el material en bruto. En contraste, los rodillos con presión hidráulica se encargan de moler el material presionándolo contra esta superficie.
- El clasificador dinámico tiene la tarea de diferenciar entre partículas de mayor y menor tamaño.

Figura 7

Esquema de un molino vertical



Nota. Tomado de la página web de la empresa Pfeiffer. Fuente (Pfeiffer, s.f.)

Es esencial realizar mantenimientos regulares a todos estos componentes para prevenir averías, poniendo especial atención en las protecciones contra el desgaste, sistemas hidráulicos, lubricación y ajuste de diferentes piezas. Los primeros molinos horizontales se diseñaron para triturar materiales como el crudo, cemento y carbón, teniendo sus raíces en los molinos Tumbling de la década de 1860. Durante la década de 1880, la firma alemana Krupp introdujo los molinos horizontales Sachsenbergian-Bruckner, mientras que la danesa Flsmidth desarrolló su propia versión, estos molinos empleaban bolas para la molienda, y una vez procesado el material, este era filtrado; cualquier residuo grueso se reenviaba para una nueva molienda.

En el sector del cemento, el molino de rodillos también ha sido ampliamente adoptado. Estos molinos se derivan de los antiguos molinos “arrastras” y el molino Edge. Mientras

el primero tiene raíces hispánicas, el segundo es de origen chino, y ambos inicialmente eran movidos por burros. En el siglo XIX, se reemplazaron las piedras por acero, dando lugar a los molinos Chilean, de estos emergieron múltiples modelos en ese siglo, como el Hungtingtong (1883), Maxecon (1989), Raimond Y Fuller. Estos molinos básicamente consistían en una superficie circular estática y uno o más rodillos que se movían sobre ella. Estos diseños sirvieron de base para las modernas empresas proveedoras de equipos que hoy en día producen molinos verticales.

- De acuerdo con Mischorr y Delgado (2009), el primer molino vertical fue introducido en 1895 por Loesche para moler carbón en centrales eléctricas en Berlín.
- En 1925, Loesche realizó un cambio crucial, estableciendo rodillos fijos y una mesa giratoria. Esta modificación resultó ser especialmente útil para la producción de cemento debido a su capacidad para secar materias primas y su eficiencia energética.
- Para 1935, el primer molino Loesche LM 11 empezó a operar en Brasil, moliendo Clinker. Una década después, en 1985, se montaron molinos en Asia destinados a la molienda de Clinker y escoria de fundición.
- El año 1994 marcó la primera vez que se usó la tecnología 2 + 2 en un molino LM 46 2 + 2 para moler Clinker en Taiwán.
- Finalmente, en 2005, se inauguró en la India el primer molino que incorporaba la tecnología 3 + 3 en un LM 56 3 + 3, nuevamente destinado a la molienda de Clinker.

B. Molinos Horizontales

Los molinos horizontales son un componente esencial en diversas aplicaciones industriales de molienda, caracterizados por su eje de rotación horizontal. Este diseño es común en procesos de molienda tanto gruesa como fina, ofreciendo una gran versatilidad y eficiencia en el tratamiento de diferentes materiales. Los molinos de bolas y los molinos SAG (Semi-Autógenos) son ejemplos prominentes de molinos horizontales, utilizados ampliamente en la industria minera y en la producción de cemento (Blanco, 2014).

Figura 8
Molinos Horizontales



Nota. Tomado de la página web de la empresa Made-In-China. Fuente (Made-In-China, s.f.)

Ventajas de los Molinos Horizontales

Una de las principales ventajas de los molinos horizontales es su disposición que permite un fácil acceso para el mantenimiento y la sustitución de piezas desgastadas. Esta accesibilidad reduce significativamente el tiempo de inactividad del equipo, lo que es crucial en aplicaciones industriales a gran escala donde la eficiencia operativa es esencial. La capacidad de realizar mantenimiento y reemplazo de componentes de manera rápida y eficiente se traduce en menores costos operativos y una mayor disponibilidad del equipo (Blanco, 2014).

- Los molinos horizontales son conocidos por su robustez, lo que les permite manejar grandes volúmenes de material de manera continua. Esta característica es particularmente importante en industrias que requieren el procesamiento de grandes cantidades de material, como la minería y la fabricación de cemento. La robustez de estos molinos asegura una larga vida útil del equipo, incluso bajo condiciones de operación exigentes.

- La configuración horizontal de estos molinos facilita la instalación de sistemas de alimentación y descarga, mejorando la eficiencia del proceso. Los sistemas de alimentación pueden integrarse de manera que aseguren un flujo constante de material, mientras que los sistemas de descarga pueden diseñarse para remover el material molido de manera rápida y eficiente. Esta configuración no solo optimiza el rendimiento del molino, sino que también mejora la uniformidad del producto final.
- Los molinos horizontales pueden adaptarse a una variedad de procesos de molienda, desde la reducción gruesa de tamaño hasta la pulverización fina. Esta versatilidad los hace adecuados para diferentes tipos de materiales y aplicaciones, proporcionando una solución de molienda integral para diversas industrias.

2.1.4 Velocidad de rotación y velocidad crítica del Molino

La velocidad de rotación del molino es un parámetro fundamental en la operación de molienda, ya que influye directamente en la eficiencia del proceso y la calidad del producto final. Esta velocidad se define como un porcentaje de la velocidad crítica del molino, que es la velocidad a la cual la primera fila de bolas en contacto con la carcasa del molino se adhiere a ella debido al efecto centrífugo y deja de contribuir a la molienda efectiva.

La velocidad crítica se calcula considerando el diámetro del molino y la fuerza de gravedad. Es la velocidad máxima a la cual las bolas están sujetas a la carcasa por la fuerza centrífuga sin caer, lo que significa que no realizan trabajo útil en la trituración del material. Por lo tanto, operar a la velocidad crítica o más allá resulta en una molienda ineficiente. Para maximizar la eficiencia del proceso, la velocidad de rotación óptima del molino suele situarse entre el 60% y el 80% de la velocidad crítica. Este rango permite que las bolas se eleven a una altura adecuada antes de caer sobre el material, aplicando la energía necesaria para su fragmentación. Operar dentro de este rango asegura que las bolas impacten de manera efectiva y consistente, logrando una reducción de tamaño eficiente. Operar por debajo del 60% de la velocidad crítica puede resultar en una energía de impacto insuficiente, mientras que superar el 80% puede llevar a que las bolas se adhieran a la carcasa, disminuyendo la eficiencia de molienda y aumentando el desgaste del equipo. Por lo tanto, mantener la velocidad de rotación en el rango óptimo es esencial para lograr una operación eficiente y rentable en la molienda.

industrial, garantizando un equilibrio entre la eficiencia energética y la productividad del proceso (Blanco, 2014).

2.1.5 *Sistemas generales y componentes de los molinos*

Los molinos son grandes cilindros que giran sobre su eje y contienen una mezcla de material a moler junto con cuerpos moledores, como bolas o barras. Estos equipos son esenciales en la industria minera y de procesamiento de minerales, donde se utilizan para reducir el tamaño de las partículas y preparar el material para procesos posteriores. Los molinos pueden operar de forma continua o discontinua, aunque el trabajo continuo es el más común en aplicaciones mineras debido a su eficiencia y capacidad para manejar grandes volúmenes de material. En un molino de operación continua, el material se alimenta de manera constante y el producto molido se descarga continuamente, lo que permite una operación eficiente y una producción constante (Blanco, 2014).

Los componentes principales de un molino incluyen:

- **Coraza:** El cilindro exterior resistente que contiene el material a moler y los cuerpos moledores. Está revestido con materiales resistentes al desgaste para proteger el cilindro y prolongar su vida útil.
- **Cabezas laterales:** Los extremos del cilindro, que están diseñados para soportar las fuerzas de la molienda y mantener el sellado del molino.
- **Sistemas de carga y descarga:** Estos sistemas controlan la entrada del material a moler y la salida del producto molido. Pueden incluir alimentadores, conductos y dispositivos de descarga.
- **Rodamientos:** Permiten el giro suave y eficiente del cilindro, minimizando la fricción y el desgaste.
- **Blindajes interiores:** Revestimientos internos que protegen la coraza del molino y mejoran la eficiencia de molienda al optimizar el movimiento de los cuerpos moledores.

2.1.6 Importancia del grado de llenado

El grado de llenado del molino, que se refiere a la proporción del volumen interno del cilindro ocupado por la carga (material a moler y cuerpos moledores), es un factor crucial que influye directamente en el rendimiento y la eficiencia del proceso de molienda. Este parámetro determina cómo interactúan los cuerpos moledores y el material, afectando la energía de impacto y la efectividad de la fragmentación.

Un grado de llenado óptimo generalmente se encuentra en torno al 50-55% del volumen interno del molino. Este rango permite un equilibrio adecuado entre el espacio libre necesario para el movimiento de los cuerpos moledores y el material presente para ser triturado. Si el grado de llenado es demasiado bajo, habrá insuficientes colisiones y contactos entre los cuerpos moledores y el material, lo que resultará en una molienda ineficiente y una menor capacidad de producción. Por otro lado, un grado de llenado excesivamente alto puede causar una disminución en la eficiencia de molienda debido a que los cuerpos moledores no tendrán suficiente espacio para moverse y generar impactos efectivos. Esto puede llevar a una situación en la que el material se compacte y no se mueva de manera eficiente dentro del molino, resultando en una menor eficiencia energética y un mayor desgaste de los componentes del molino (Blanco, 2014).

Mantener el grado de llenado dentro del rango óptimo asegura que los cuerpos moledores puedan moverse libremente y aplicar la energía necesaria para la fragmentación del material. Esto no solo mejora la eficiencia del proceso de molienda, sino que también optimiza el consumo de energía y prolonga la vida útil del equipo. Por lo tanto, gestionar adecuadamente el grado de llenado es esencial para maximizar el rendimiento y la productividad en las operaciones de molienda industrial.

2.1.7 Efecto de la humedad

La humedad del material a moler es un factor crucial que impacta significativamente el rendimiento del proceso de molienda. La presencia de una pequeña cantidad de humedad, alrededor del 1%, puede ser beneficiosa ya que facilita la rotura de los granos, mejorando la eficiencia de la molienda. Esta ligera humedad actúa como un lubricante natural, reduciendo la fricción entre las partículas y los cuerpos moledores, lo que resulta en una molienda más efectiva y un menor desgaste de los componentes del molino. Sin embargo, cuando la humedad

del material supera ciertos niveles, puede convertirse en un problema. Cantidades moderadas de humedad pueden llevar a la formación de una pasta pegajosa que recubre los cuerpos moledores y las paredes del molino, disminuyendo significativamente la eficiencia del proceso. Esta pasta impide que las partículas se muevan libremente y se golpeen entre sí, lo que reduce la tasa de reducción de tamaño y aumenta el consumo de energía (Blanco, 2014).

Curiosamente, cuando la humedad del material alcanza niveles muy altos, específicamente entre el 55% y el 60% de sólidos en peso, el rendimiento de la molienda puede mejorar nuevamente. En estas condiciones, el exceso de agua facilita el movimiento de las partículas, evitando la formación de una pasta pegajosa y permitiendo una mejor dispersión y contacto entre las partículas y los cuerpos moledores. Este fenómeno es común en la molienda en húmedo, donde el agua actúa como un medio para transportar y separar las partículas, mejorando la eficiencia general del proceso.

2.2 Flujo Másico en molino vertical

En relación al consumo energético, los molinos de rodillos superan en eficiencia a los molinos que operan por acción gravitacional. Se caracterizan por requerir menos espacio y tener un costo inicial considerablemente menor. Estos molinos de rodillos están equipados con un sistema de ventilación y cuentan con separadores de aire en su interior, usualmente trabajan en un circuito cerrado y actúan como secadores.

Un molino vertical utiliza rodillos que muelen el material contra una mesa giratoria, el ajuste del flujo másico de carbón que entra al molino es fundamental para asegurar la eficiencia energética, la calidad del producto final y para evitar el desgaste excesivo o daños al molino. Al conocer el flujo másico de carbón que está siendo molido, se puede ajustar la operación del molino para optimizar su rendimiento y garantizar que se cumplen las especificaciones del producto.

$$q_m = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2(P_1 - P_2) \cdot \rho}$$

Teniendo en cuenta el coeficiente de descarga, el flujo masivo efectivo es

$$q_m = C_d \frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2(P_1 - P_2) \cdot \rho}$$

Al igual que con el flujo volumétrico, la siguiente ecuación limita su descripción solo a fluidos incompresibles. La fórmula definitiva para determinar el flujo masivo en fluidos compresibles es:

$$q_m = C_d \varepsilon \frac{A_2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2(P_1 - P_2) \cdot \rho}$$

Cuando los medidores de flujo masivo se combinan en un solo dispositivo con medidores de flujo volumétrico, estos emplean compensaciones de presión y temperatura para calcular el flujo masivo. A partir de las lecturas de presión y temperatura del fluido compresible tomadas por el medidor volumétrico y a través de cálculos pertinentes, se determina el caudal masivo.

2.2.1 Importancia en molinos

La importancia radica en que al determinar la cantidad de masa de material que se procesa por unidad de tiempo, el flujo másico influye directamente en la calidad del producto final. Un flujo adecuadamente regulado asegura una molienda uniforme, reduce el desgaste de los componentes del molino y optimiza el consumo energético, a su vez, permite que se ajusten los parámetros de operación para adaptarse a las variaciones en las características del material y las condiciones del proceso.

Además, al integrar medidores de flujo masivo con medidores de flujo volumétrico en un único instrumento, se utilizan ajustes de presión y temperatura para estimar el flujo masivo. Utilizando las mediciones de presión y temperatura del fluido compresible registradas por el medidor volumétrico y mediante operaciones adecuadas, se obtiene el valor del caudal masivo.

2.3 Medición Indirecta

Según Moreno (2021), se refiere al número resultante de aplicar una ecuación matemática que conecta mediciones directas realizadas en las distintas dimensiones de un objeto específico. Por ejemplo, para calcular el volumen de un cubo, se multiplican las medidas de su longitud, anchura y altura, donde a partir de las mediciones de cada una de estas

dimensiones, se determinan sus incertidumbres individuales, lo que permite posteriormente calcular la incertidumbre total del volumen.

De acuerdo con Llamosa, Gómez y Ramirez (2009), las mediciones indirectas se refieren a resultados obtenidos utilizando fórmulas matemáticas que trabajan con magnitudes físicas medidas de manera directa. Un ejemplo clásico de esto en el ámbito eléctrico es la determinación de resistencia y potencia eléctrica usando mediciones directas de voltaje y corriente, ya que la incertidumbre en estas mediciones proviene de la imprecisión en las variables medidas directamente. A diferencia de las mediciones directas, calcular la incertidumbre en las mediciones indirectas es un procedimiento más intrincado, pudiendo incluso requerir conocimientos de cálculo diferencial debido a las correlaciones inevitables entre las variables utilizadas.

2.3.1 Propagación de incertidumbres

En la ingeniería y las ciencias, muchas veces no medimos ciertas magnitudes directamente, sino que las calculamos a partir de otras que sí podemos medir de forma directa. Por ejemplo, para determinar el área de un rectángulo, medimos las longitudes de sus lados; para calcular la velocidad de un vehículo, medimos las distancias recorridas y los intervalos de tiempo correspondientes. La cuestión clave que surge es cómo las incertidumbres de estas mediciones directas se propagan y afectan la incertidumbre de la magnitud derivada que se obtiene mediante una fórmula.

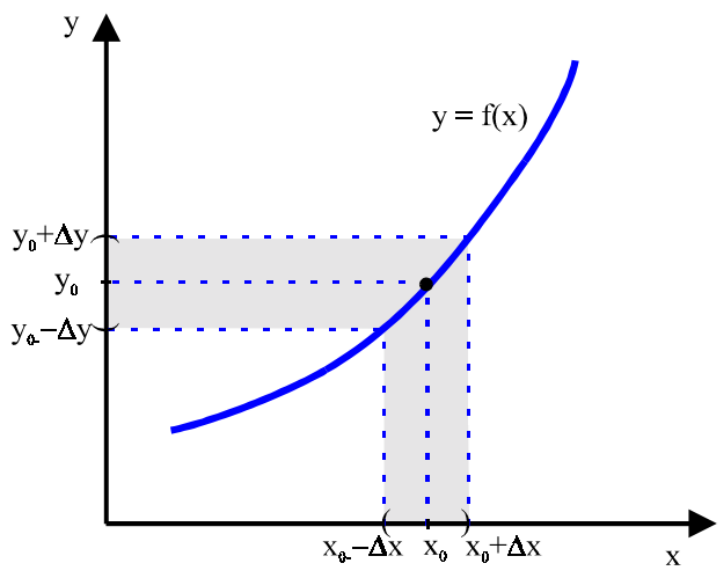
Para abordar esta cuestión, consideramos cómo las incertidumbres en las magnitudes directamente medidas influyen en la precisión de la magnitud calculada. Supongamos que queremos calcular una magnitud y y su incertidumbre Δy a partir de otra magnitud x , de la cual conocemos su valor óptimo x_0 y su incertidumbre Δx . La propagación de la incertidumbre se puede entender mejor observando cómo una pequeña variación en x afecta el valor de y .

La Figura 9 ilustra este concepto de propagación de incertidumbre, mostrando cómo una incertidumbre en la magnitud x se traduce en una incertidumbre en la magnitud derivada y . Este enfoque es fundamental en disciplinas como la ingeniería electrónica, donde se deben calcular parámetros derivados con precisión para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas. Al comprender y gestionar adecuadamente la propagación de incertidumbres,

podemos mejorar la exactitud y confiabilidad de nuestras mediciones y cálculos, asegurando resultados más robustos en nuestros proyectos.

Figura 9

Impacto de la incertidumbre en una magnitud x



Nota. Tomado de (Bevington y Robinson, 1993).

2.3.2 Ejemplos comunes de mediciones indirectas

En las mediciones indirectas, se determinan valores de ciertos objetos basándose en datos previos, ya sea de la misma magnitud para diferentes objetos o de diferentes magnitudes para el mismo objeto, o una combinación de ambos. Estos valores ya conocidos permiten calcular el valor deseado utilizando leyes o fórmulas específicas que vinculan los datos conocidos con el que se busca. Por ejemplo, se puede calcular la longitud de una barra después de calentarla usando su longitud inicial, sus temperaturas inicial y final, junto con la ley de dilatación y el coeficiente del material. Otro caso es determinar la masa de un astro basándose en la masa de un cohete y su trayectoria, aplicando leyes mecánicas. Este método de medición es el más frecuente en ciencia, ya que se basa en valores ya establecidos o previamente medidos, donde si esos valores también se obtuvieron indirectamente, entonces se habrán usado otros datos previos, y así sucesivamente.

2.4 Balanzas dosificadoras

En este apartado se describe el funcionamiento y características distintivas de los dos tipos principales de balanzas dosificadoras, la balanza de cinta transportadora del fabricante Schenck Process y la balanza dosificadora rotativa de Pfister, las cuales se emplean con frecuencia en la industria para la dosificación de materiales.

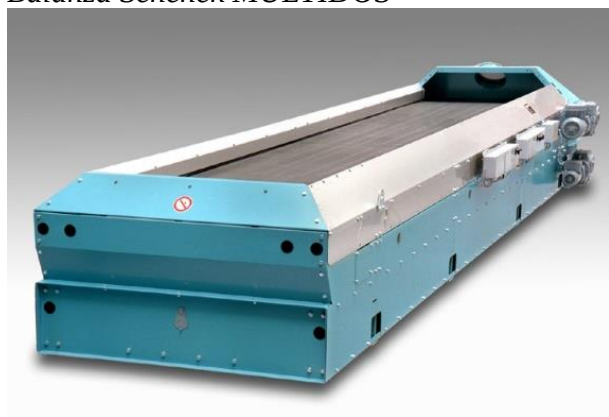
La balanza de cinta transportadora está diseñada para medir el flujo de material a granel en movimiento, proporcionando datos de peso en tiempo real. Este sistema opera mediante la colocación de una cinta transportadora que lleva el material, y a medida que este avanza, se mide su peso a través de celdas de carga. Este tipo de balanza es ideal para aplicaciones donde se requiere un monitoreo continuo y preciso del flujo de carbón, asegurando una alimentación consistente hacia los molinos verticales. Su construcción robusta permite su uso en entornos industriales exigentes, y su capacidad de integración con sistemas automatizados mejora la eficiencia operativa.

Por otro lado, la balanza dosificadora rotativa de Pfister utiliza un tambor rotativo para regular el flujo de material. A medida que el tambor gira, el carbón se dosifica a una tasa controlada, permitiendo ajustes en tiempo real según las necesidades del proceso. Esta balanza es particularmente ventajosa en situaciones donde se requieren dosificaciones precisas de diferentes tipos de materiales a granel. Su diseño modular y compacto facilita la instalación y el mantenimiento, además de ofrecer alta flexibilidad en el manejo de diversas aplicaciones (Román, 2018).

2.4.1 *Balanza de cinta transportadoras Schenck Process*

La balanza dosificadora MULTIDOS forma parte de la serie de alimentadores de cinta del fabricante Schenck Process, esta báscula basa su funcionamiento en la combinación de un sistema de pesaje continuo y el control de velocidad de la cinta transportadora, para mantener un flujo constante de material. El material a granel que se desea dosificar es extraído de un silo situado sobre la tolva de carga, un dispositivo ajusta la altura de cama que se forma en la cinta, garantizando que la carga sobre la cinta sea prácticamente constante. La báscula mide continuamente el peso de material en una sección de la cinta mediante una unidad de pesaje integrada, estos datos son enviados al sistema electrónico que ajusta la velocidad para asegurar un flujo constante (Schenck Process, 2009).

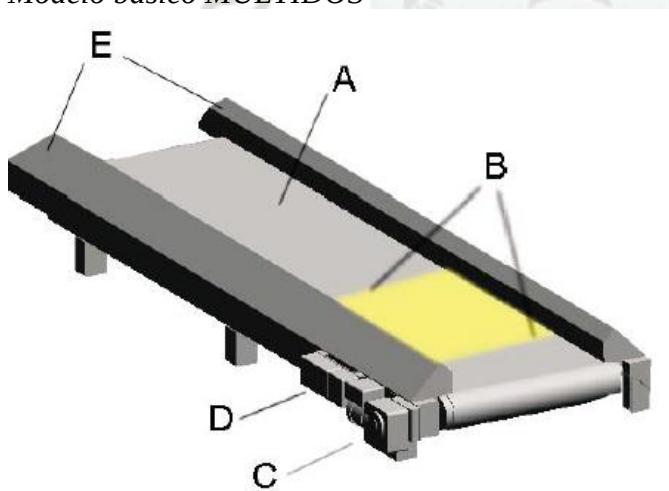
Figura 10
Balanza Schenck MULTIDOS



Nota. Tomado de Schenck Process (2024). <https://www.schenckprocess.cz/multidos-0/>

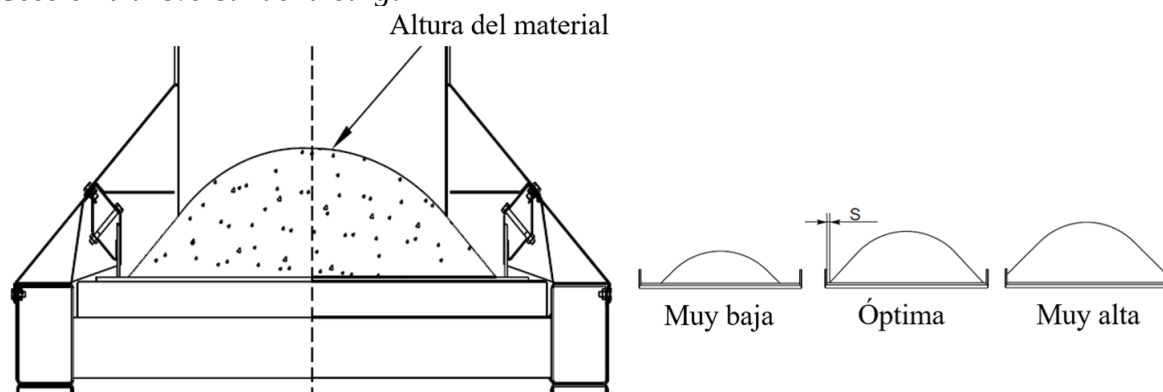
El modelo básico de la báscula dosificadora consta de; cinta transportadora (A), zona de pesaje (B), accionamiento (C), electrónica de evaluación (D) y regletas guías (E).

Figura 11
Modelo básico MULTIDOS



Nota. Tomado de Schenck Process (2009)

La altura del material a granel se controla mediante una compuerta ajustable, el objetivo principal es que la cantidad de material que se deposita en la cinta corresponda a la capacidad de las celdas de carga que se encuentran instaladas en la báscula dosificadora, el ajuste de la compuerta debe de evitar que la cinta tenga una carga muy alta o muy baja, ya que de esto depende que el sistema funcione dentro de sus parámetros óptimos, este ajuste asegura un flujo estable del material.

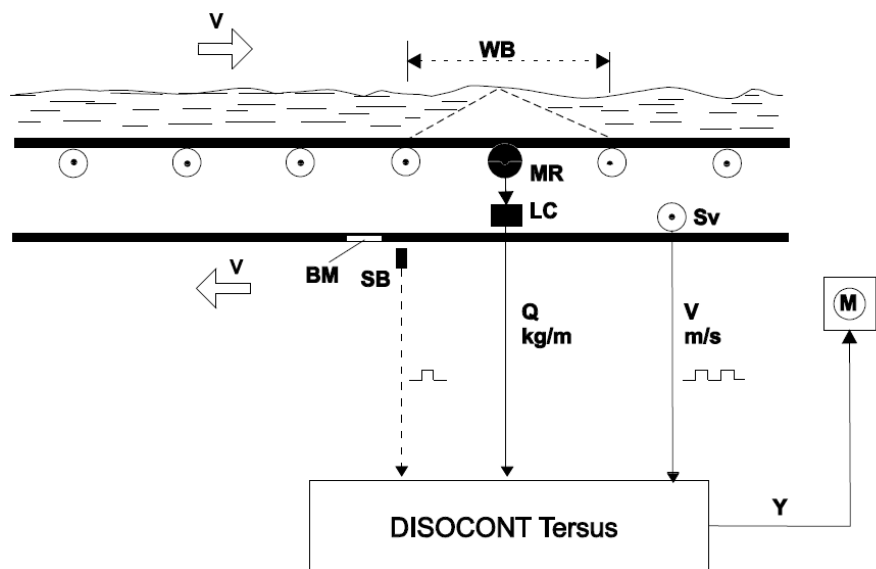
Figura 12
Sección transversal de la carga

Nota. Tomado de Schenck Process (2009)

2.4.2 Principio de funcionamiento de balanza Schenck

El material a granel, se transporta sobre la cinta que está equipada con una plataforma de pesaje (MR). Esta plataforma está delimitada por dos rodillos y permiten que el material pase sobre una sección donde se mide el peso (WB). Las celdas de carga (LC) ubicadas en esta sección registra el peso del material que se encuentra sobre la cinta en tiempo real. Simultáneamente, un sensor de velocidad (Sv), registra la velocidad de desplazamiento de la cinta en metros por segundo (m/s).

El sistema electrónico modular DISOCONT, combina ambas mediciones, el peso del material sobre la cinta (Q), en kg/m y la velocidad de la cinta (v), en m/s, para calcular el caudal másico real (I) del material transportado en kg/h, aplicando la siguiente formula (Schenck Process, 2015).

$$I = Q * v$$



Nota. Tomado de Schenck Process (2015)

El sistema DISOCONT no solo mide el flujo de material sobre la cinta, sino que también ajusta el flujo a través de la regulación de la velocidad de la cinta transportadora o del alimentador, dependiendo del modo de operación seleccionado. Existen dos tipos de control para mantener el flujo constante.

- **Modo gravimétrico:** En este caso, el sistema ajusta la velocidad de la cinta para mantener un caudal constante. Si la carga de material varía, el sistema aumenta o reduce la velocidad para compensar las fluctuaciones en el peso.
- **Modo volumétrico:** La cinta mantiene una velocidad constante y lo que varía es la cantidad de material que ingresa. Esto se hace ajustando un alimentador que regula el flujo entrada, el flujo se calcula en función del volumen y la velocidad, pero sin la intervención de las celdas de carga.

2.4.3 Balanza dosificadora rotativa de FLSmith Pfister

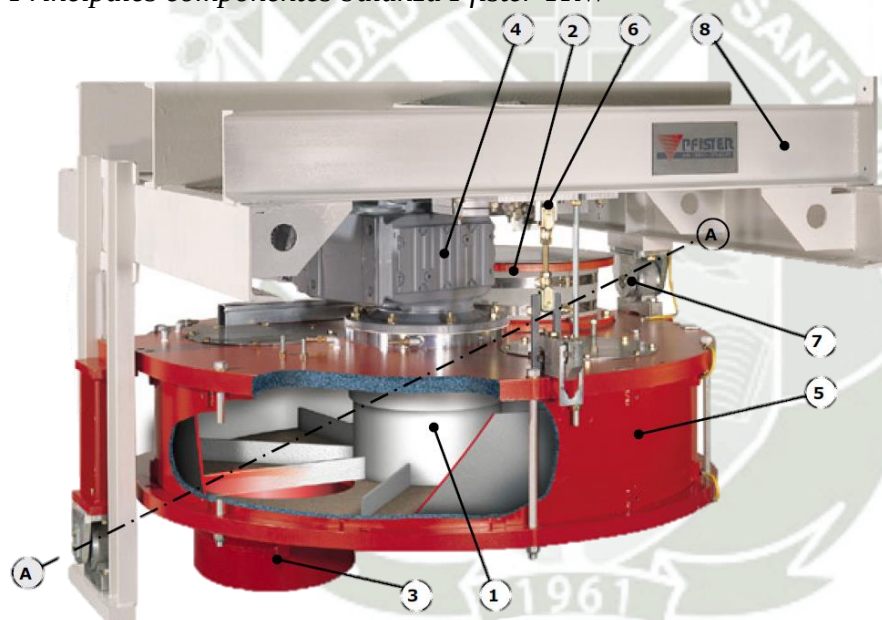
La balanza dosificadora rotativa Pfister, es utilizada en una amplia variedad de aplicaciones en la industria del cemento, en específico el modelo TRW es utilizado en la dosificación de materiales gruesos a granel que son abrasivos y calientes, por su diseño robusto asegura que el desgaste sea mínimo, ya que el material entra en contacto solo con el rotor de

acero. Su sistema de control ajusta la velocidad del rotor para compensar los cambios en la masa del material, asegurando una dosificación uniforme (FLSmith Pfister, 2014).

Como se muestra en la Figura 14, el material a dosificar se extrae desde el silo e ingresa por la entrada (2) de la balanza, el material cae en las cámaras del rotor (1), el rotor está sobre un eje de pesaje (A-A) a través de cojinetes de pasaje (7), esto permite a la celda de carga (6) pesar el material, el motor (4) controla la velocidad del rotor mientras es dosificado por la salida (3). La carga (5) protege y aísla el material en el rotor, todo el sistema está montado sobre un marco de suspensión (8).

Figura 14

Principales componentes balanza Pfister TRW



Nota. Tomado FLSmith Pfister (2014)

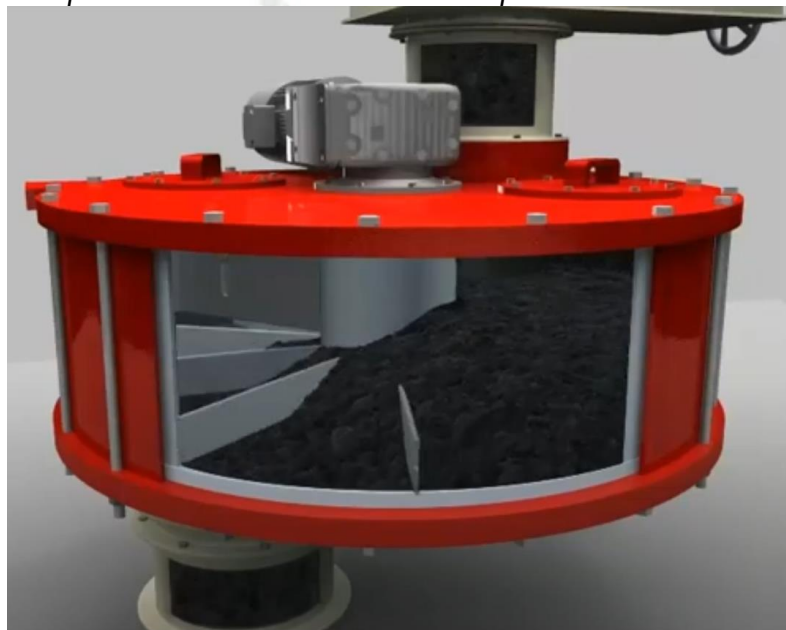
2.4.4 Principio de funcionamiento de balanza Pfister

El control ProsCon es un sistema avanzado de control electrónico desarrollado por Pfister que ajusta la velocidad del rotor en función del peso medido en las cámaras. Si el sistema detecta una menor cantidad de material, aumenta la velocidad del rotor, y si detecta más material, reduce la velocidad. Este ajuste proactivo asegura que la cantidad de material dosificado sea siempre precisa, independientemente de las variaciones en la alimentación o la densidad del material.

Para registrar el peso del material se utiliza una celda de carga y para la velocidad se utiliza un tacómetro o encoder incremental, con estas magnitudes el sistema calcula el flujo de material además que aplica un control proactivo que se anticipa a los cambios en la alimentación de material, esto significa que no espera a que se detecte una desviación en la tasa de flujo, sino que ajusta la velocidad del rotor antes de que el material sea descargado (FLSmidth Pfister, 2014).

Figura 15

Dosificación de material en balanza Pfister



Nota. Tomado FLSmidth Pfister (2014)

2.5 Transportadores de cadena

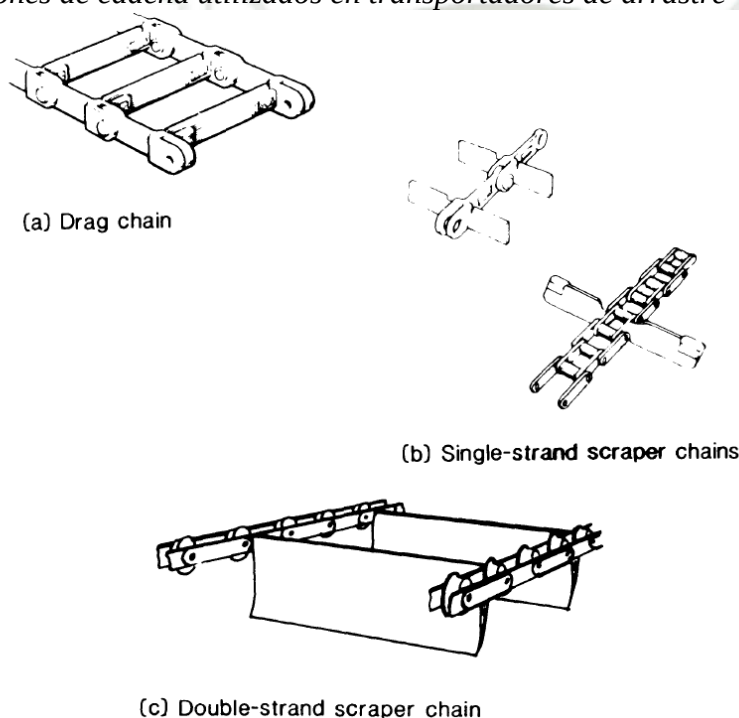
2.5.1 Transportadores de arrastre

Un método efectivo para mover un material a granel a lo largo de un canal horizontal consiste en utilizar una cadena sin fin que se desplace en la dirección deseada. La eficiencia del movimiento del material dependerá de varios factores, entre ellos, el área transversal de la cadena, el diseño de sus eslabones, la velocidad a la que se mueve la cadena y las características del material a granel. En los extremos de esta dinámica, una cadena de pequeño diámetro que se mueve rápidamente apenas arrastrará el material, sin provocar un transporte significativo. Por otro lado, una cadena con grandes paletas que cubren la mayor parte del canal podría trasladar el material a alta velocidad, pero posiblemente a un costo energético elevado. Existen

diferentes tipos de transportadores prácticos que se clasifican de varias maneras, incluyendo transportadores de arrastre, de rascador y de masa. Este último término se refiere a los transportadores de cadena que cuentan con paletas sumergidas y operan dentro de un canal cerrado, permitiendo que el material se desplace como una masa continua que ocupa casi toda el área del canal. En la próxima sección, se examinarán los transportadores en masa, centrándose en el grupo de transportadores denominados transportadores de arrastre o de rasqueta (Woodcock y Mason, 2012).

Figura 16

Patrones de cadena utilizados en transportadores de arrastre



Nota. Tomado del libro Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology, C.R. Woodcock · J.S. Mason (2012).

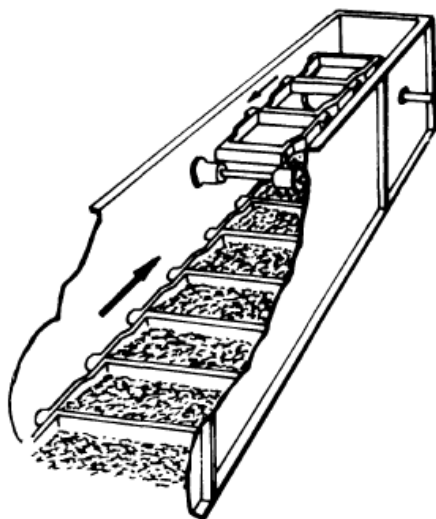
No es del todo práctico intentar diferenciar entre transportadores de arrastre, transportadores de rasqueta y transportadores de paletas, ya que la distinción es bastante subjetiva y generalmente se basa en la presencia o ausencia de paletas en los eslabones de la cadena. La Figura 16 muestra algunos ejemplos de patrones de cadena utilizados en los transportadores de arrastre. Por lo general, la cadena se coloca entre ruedas dentadas en los extremos, lo que permite que el ramal inferior se desplace por el canal y actúe como un medio de transporte (ver Figura 17). No obstante, es posible contar con dos canales independientes o

un canal dividido en secciones superior e inferior, permitiendo que ambos ramales de la cadena transporten material en direcciones opuestas (Woodcock y Mason, 2012).

Los transportadores de arrastre suelen tener aplicaciones limitadas, aunque son comúnmente aceptados para manejar ciertos materiales, como el Clinker de cemento caliente y las cenizas. También son ampliamente utilizados en las industrias minera y química para el transporte de diferentes sólidos a granel. Las velocidades de operación suelen ser relativamente bajas, típicamente entre 0,1 y 0,6 m/s, y las capacidades de carga son generalmente reducidas. Para calcular las capacidades de transporte de los transportadores de arrastre y de rasqueta, es fundamental determinar la velocidad promedio del sólido a granel en el canal y la profundidad efectiva de la corriente de material.

Figura 17

Transportador de arrastre con funcionamiento de una sola hebra



Nota. Tomado del libro Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology, C.R. Woodcock · J.S. Mason (2012).

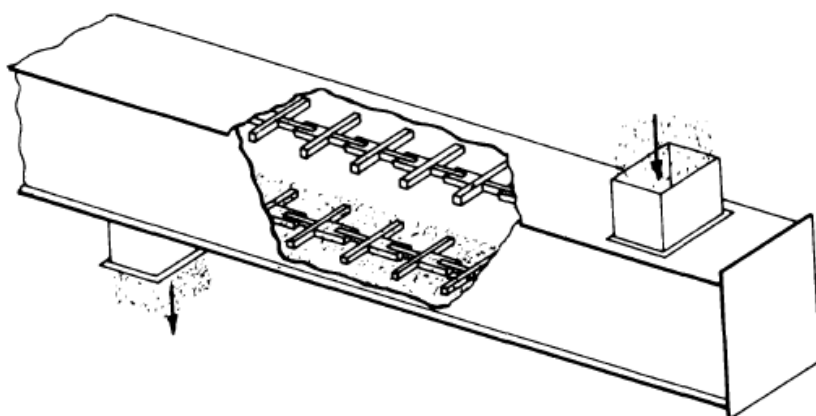
2.5.2 Transportadores en masa

El transportador en masa, conocido también como “transportador de flujo continuo”, fue creado en Inglaterra durante la década de 1920 (ver Figura 18). Su operación se basa en los efectos de fricción entre la cadena o paleta y el material a granel circundante, así como en la “fricción interna” entre las partículas del propio material. El transporte es efectivo cuando la resistencia por fricción entre el material y la carcasa es inferior a la resistencia interna al corte del material a granel. En una instalación bien diseñada, el material a granel se desplaza a lo

largo del canal como una masa continua, manteniendo una velocidad similar a la de la cadena. Esto provoca un mínimo movimiento relativo entre las partículas, lo que contribuye a que toda la columna de material se desplace lentamente junto con la cadena, disminuyendo significativamente la probabilidad de degradación del material transportado (Woodcock y Mason, 2012).

Figura 18

Transportador en masa básico



Nota. Tomado del libro Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology, C.R. Woodcock · J.S. Mason (2012).

El sistema fue originalmente diseñado para el transporte horizontal suave de materiales a granel, utilizando un armazón compuesto por una cadena y paletas que se desplazan de manera continua a lo largo de la base de un canal. Con el tiempo, este diseño se adaptó para permitir el transporte vertical, ajustando las paletas para que se adaptaran al perfil interno del canal, envolviendo así el material que se transporta. Se observó que, siempre que se mantuviera un flujo constante de sólidos a granel en la parte inferior de cualquier sección vertical, el material continuaría siendo transportado de manera constante hacia arriba dentro del conducto cerrado, incluso si las paletas no llenaban completamente la sección transversal. Una característica significativa que comparte el transportador en masa con el elevador de cangilones pivotantes es su capacidad para gestionar cambios de orientación, permitiendo el movimiento de horizontal a inclinado, e incluso a vertical, en una sola unidad sin necesidad de un punto de transferencia.

2.5.3 Cálculo de rendimiento en transportadores

El rendimiento volumétrico de un transportador en masa es principalmente una función del área de la sección transversal A_b del lecho del producto transportado, la velocidad de la cadena v y un “factor de velocidad” r_v que se define como la relación entre la velocidad media del producto y de la cadena. Por lo tanto:

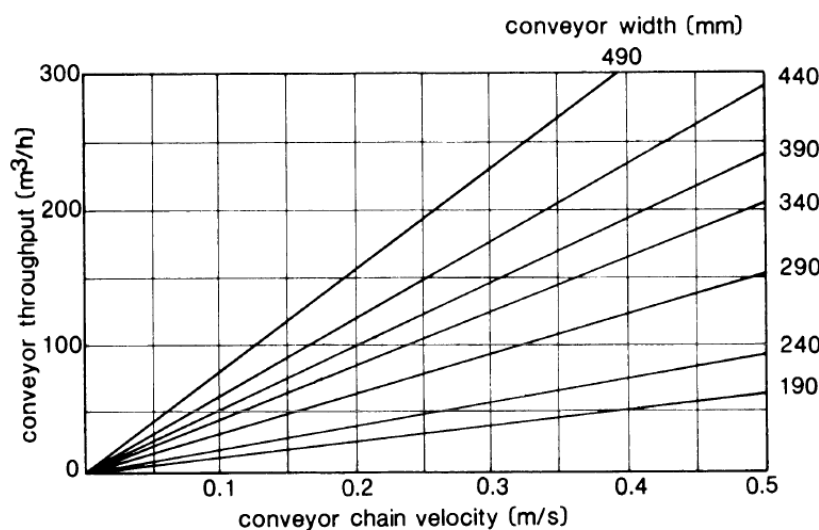
$$\dot{V}_s = A_b v r_v$$

y el rendimiento en masa viene dado por:

$$\dot{m}_s = \rho_b A_b v r_v$$

En el caso de los transportadores horizontales, se puede considerar el valor de r_v como uno, mientras que, en secciones verticales e inclinadas, su valor típicamente varía entre 0,6 y 0,85, dependiendo del tipo de material y cómo se alimenta la sección. La velocidad ideal de la cadena y las paletas está fuertemente influenciada por las características del material que se transporta. Para los materiales granulares y particulados que fluyen libremente, se pueden alcanzar velocidades superiores a 0,5 m/s, pero los materiales abrasivos y aquellos que tienden a airearse, como el cemento, no deben superarse los 0,25 m/s. En el caso de productos fibrosos y escamosos, la velocidad óptima se sitúa cerca de 0,4 m/s. Operar a velocidades excesivas puede resultar en una abrasión excesiva, deterioro del producto y disminución de la eficiencia, ya que las paletas pueden atravesar el material, dejando la capa superior inmóvil o moviéndose a una velocidad inferior (Woodcock y Mason, 2012).

El diagrama de capacidad (ver Figura 19) proporciona información sobre los rendimientos volumétricos que se pueden lograr en un rango típico de anchos para transportadores en masa que funcionan en posición horizontal. En el caso de operaciones verticales, es probable que los valores de capacidad se vean reducidos entre un 10% para materiales granulares gruesos y un 50% para polvos de flujo libre. La evaluación del requerimiento energético es compleja, ya que depende significativamente de las características del material a transportar y de la configuración del sistema de transporte. Sin una experiencia previa con un material específico, es fundamental realizar pruebas piloto para establecer el requerimiento energético con un nivel razonable de precisión (Woodcock y Mason, 2012).

Figura 19
Capacidades típicas de transportadores en masa horizontales


Nota. Tomado del libro Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology, C.R. Woodcock · J.S. Mason (2012).

2.6 Control Adaptativo

El término adaptativo se refiere a la capacidad de modificar el comportamiento según las circunstancias cambiantes. Un regulador adaptativo es aquel que ajusta su comportamiento en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a perturbaciones. Esto plantea la cuestión de cómo se diferencia el control adaptativo del control basado en realimentación (Rubio y Sánchez, 1996).

El control adaptativo es ampliamente definido, pero una de las definiciones más aceptadas describe que es una forma especial de control no lineal. En este tipo de control, el estado del proceso puede dividirse en dos escalas de tiempo con velocidades de evolución distintas. La escala lenta se refiere a los cambios en los parámetros del regulador, mientras que la escala rápida se asocia con la dinámica del bucle de realimentación ordinario. El esquema básico del control adaptativo, como se muestra en la Figura 20. Según Landau (1974), incluye un bucle principal de realimentación negativa similar a los sistemas convencionales con un regulador.

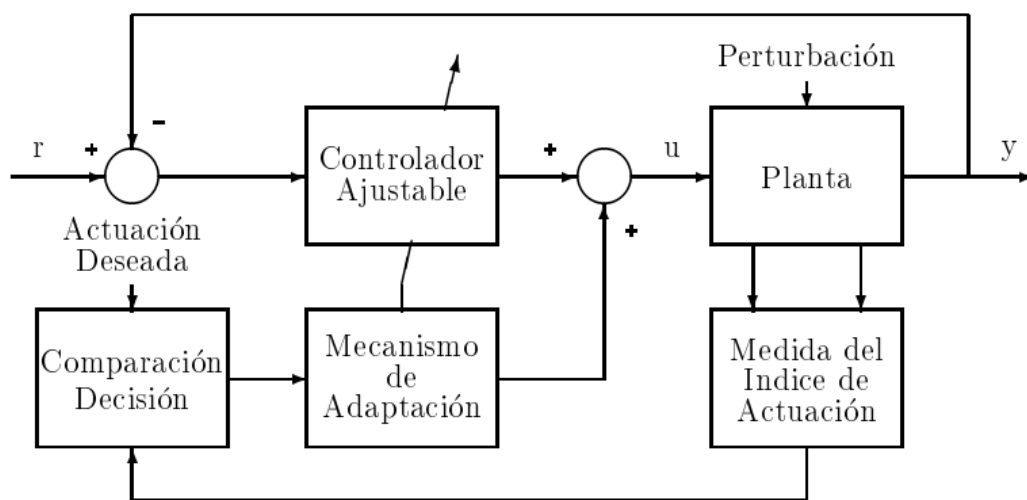
Además, hay un segundo bucle que mide un índice de rendimiento, lo compara con el índice deseado y procesa el error a través de un mecanismo de adaptación que ajusta los

parámetros del regulador y, en algunos casos, actúa directamente sobre la señal de control. También puede haber un tercer bucle que supervisa los dos bucles anteriores para garantizar la estabilidad del sistema y mejorar su rendimiento (Isermann, 1982).

El mecanismo de adaptación proporciona una solución en tiempo real para el diseño de sistemas con parámetros desconocidos. Sin embargo, puede operar a una frecuencia de muestreo mayor que la del regulador y el identificador. La característica principal que distingue a los sistemas adaptativos es la presencia de un bucle de control que compara un índice de rendimiento (Landau, 1982).

Figura 20

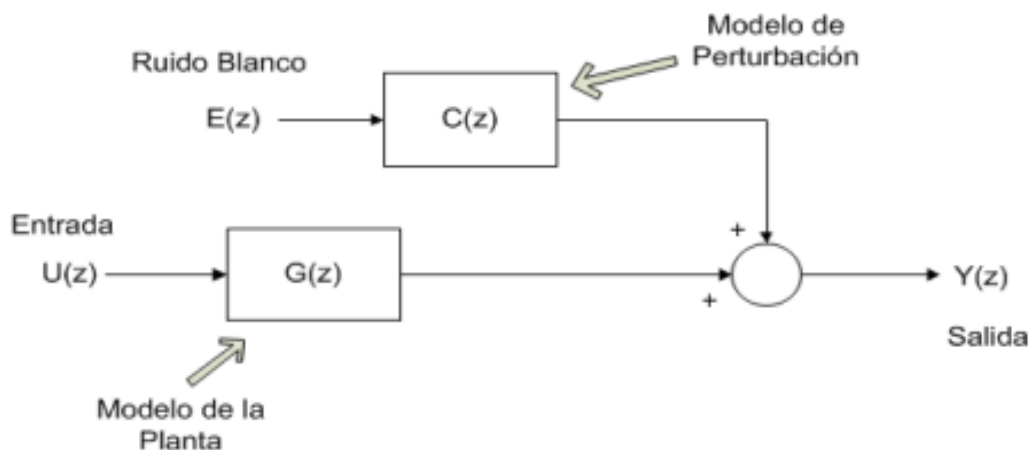
Esquema básico de un control adaptativo



Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

Según Godoy (2011), el control adaptativo es una modalidad avanzada de control en la que los parámetros del controlador se ajustan dinámicamente en respuesta a cambios en la dinámica del proceso. Esta capacidad de adaptación permite que el sistema en lazo cerrado mantenga un desempeño óptimo y las propiedades deseadas establecidas durante la fase de diseño, incluso frente a variaciones o incertidumbres en el entorno operativo. La adaptabilidad del control adaptativo asegura que el sistema pueda responder eficazmente a perturbaciones y cambios en las condiciones del proceso, mejorando la robustez y la eficiencia operativa. Este enfoque es especialmente valioso en aplicaciones donde las condiciones del sistema pueden variar significativamente y se requiere un rendimiento consistente y fiable.

Figura 21
Sistema real con ruido



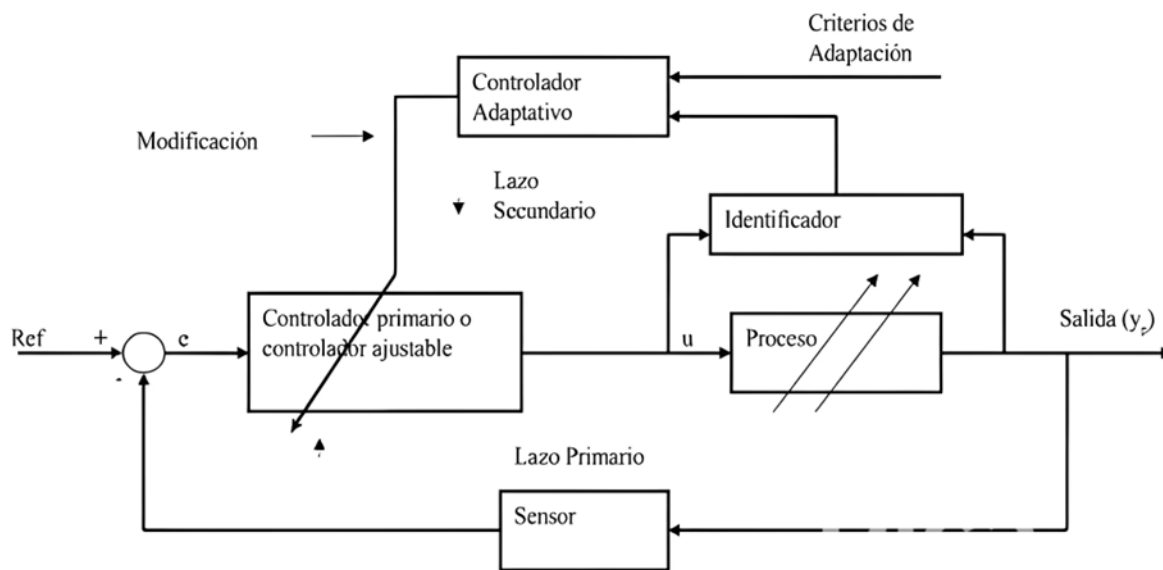
Nota. Godoy (2011). Control Adaptativo en Tiempo Real.

El control adaptativo opera ajustando los parámetros cambiantes del proceso para asegurar una operación constante, convirtiéndose en un sistema particular, si un sistema de control muestra alteraciones significativas en su comportamiento debido a cambios en sus parámetros, es esencial realizar modificaciones al mismo, de esta manera, el control adaptativo es denominado así porque se ajusta a parámetros que cambian en función de su entorno. Los sistemas de control con retroalimentación lineal estándar son el fundamento para el desarrollo de sistemas de control adaptativo.

Los diversos esquemas de control adaptativo se han implementado tanto en laboratorios como en industrias. Además, esta táctica de control se ha empleado en sistemas de control de una entrada - una salida (SISO, por sus siglas en inglés) y en sistemas de control de múltiples entradas y salidas (MIMO, por sus siglas en inglés), tal como se ilustra en Giraldo (2007).

El control adaptativo es óptimo para sistemas que tienen cambios temporales, en este ámbito, se pueden considerar los sistemas de control PID autorregulables como la base inicial para el análisis de controles adaptativos. Sin embargo, profundizando en su investigación, es evidente que se pueden integrar técnicas como la identificación de parámetros a través de mínimos cuadrados, entre otros métodos.

Figura 22
Lazos de control adaptativo



Nota. Godoy (2011). Control Adaptativo en Tiempo Real.

El cambio en el circuito secundario debe ocurrir a un ritmo más pausado que en el circuito primario, considerando que un control adaptativo opera como un sistema no lineal que requiere ajustes en sus parámetros, es esencial determinar las situaciones en las cuales no se necesita ajustar la gama de parámetros, si es adecuado mantener un controlador estático y, fundamentalmente, evaluar la real necesidad de implementar un controlador adaptativo.

Según Godoy (2011), un control regular se aplica comúnmente en sistemas predominantemente lineales, lo que implica que los parámetros se mantienen constantes, este método se convierte en un recurso eficaz de aproximación, principalmente cuando se busca ajustar un sistema en un punto de operación específico, además cuando se presentan perturbaciones, es vital determinar si pueden ser desconsideradas, ya que la aproximación puede seguir siendo suficiente para un control aceptable. Sin embargo, si hay una alteración en la función, la aproximación alrededor de un punto de operación específico ya no resulta apropiada. Dentro de las variedades de control adaptativo, se encuentran:

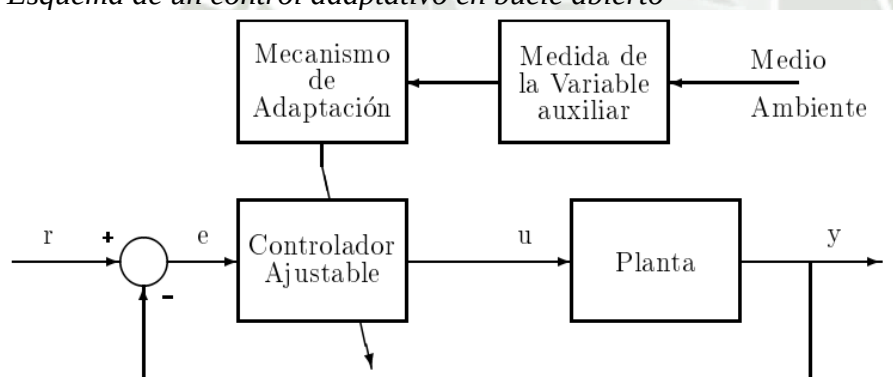
- Control Adaptativo Programado
- Control Adaptativo de Modelo de Referencia
- Control Adaptativo Auto-Ajustable

De acuerdo con Godoy (2011), el control adaptativo se caracteriza por su diversidad de aplicaciones, sobresaliendo entre ellas la calibración automática de controladores, esta consiste en ajustar automáticamente los parámetros del controlador conforme a las necesidades del operador, manteniéndose fijos tras dicha calibración, donde la principal ventaja de emplear un calibrador automático radica en su capacidad para optimizar la calidad del control.

Existen diversos tipos de controladores que ofrecen buenas características de regulación ante variaciones en los parámetros del sistema, pero que, según la definición anterior, no son verdaderamente adaptativos ya que la adaptación se realiza en bucle abierto. Un ejemplo muy común de control adaptativo en bucle abierto es el conocido como cambio por tabla. Este método implica la modificación de los parámetros del controlador utilizando una tabla predefinida que ha sido calculada para diferentes puntos de operación, basándose en una variable auxiliar. Un caso típico de esta aplicación es el control de vuelo de un avión, donde el regulador puede ajustarse según la altitud (Rubio y Sánchez, 1996).

Figura 23

Esquema de un control adaptativo en bucle abierto



Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

La Figura 23 ilustra esquemáticamente controladores adaptativos en bucle abierto, donde existe una relación fuerte entre una variable auxiliar y la dinámica de los parámetros del sistema. Esta adaptación permite cambiar rápidamente el controlador según la variable auxiliar, aunque la creación de la tabla de parámetros es laboriosa y presenta problemas de conmutación.

Los controladores adaptativos se dividen en dos grupos principales: controladores adaptativos con modelo de referencia (MRAC) y reguladores autoajustables (STR). Ambos enfoques intentan solucionar el problema del control adaptativo bajo la premisa de que, para

cualquier conjunto de parámetros y perturbaciones del sistema, existe un controlador lineal adecuado.

1. **Controladores adaptativos con modelo de referencia (MRAC):** Buscan que el comportamiento del sistema cerrado siga un modelo de referencia para una señal de entrada definida.
2. **Reguladores autoajustables (STR):** Tratan de lograr un control óptimo ajustándose a un tipo de controlador específico y obteniendo información del proceso y sus señales.

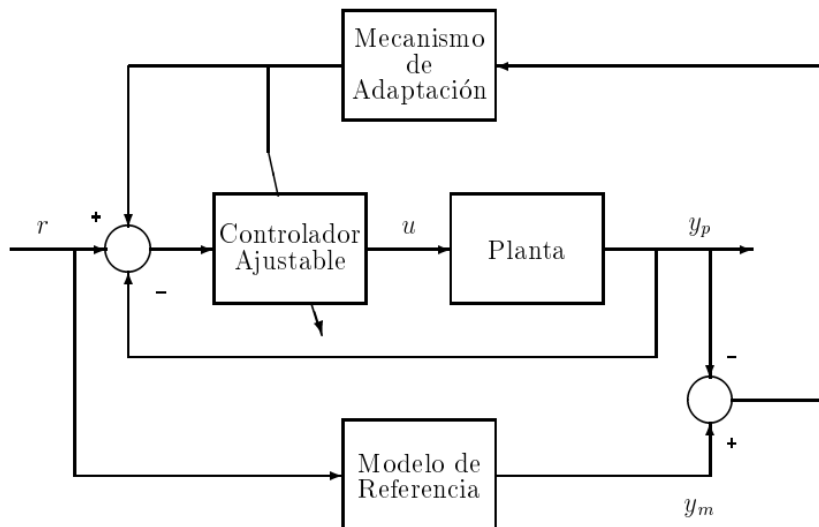
Estas técnicas, desarrolladas por separado durante años, han demostrado ser equivalentes en muchos casos. Los MRAC se destacan por su rápida adaptación a una entrada definida y su simplicidad en el tratamiento de la estabilidad usando la teoría de estabilidad de sistemas no lineales. Sin embargo, no se adaptan bien si la señal de entrada carece de riqueza. Por otro lado, los STR se adaptan a cualquier situación, incluidas perturbaciones no medibles, y tienen una estructura modular que facilita la programación y la implementación de diferentes reguladores (Rubio y Sánchez, 1996).

2.6.1 Control adaptativo con modelo de referencia (MRAC)

Los sistemas adaptativos con modelo de referencia fueron inicialmente desarrollados para sistemas continuos mediante la minimización de un índice de desempeño, el cual consiste en la integral del error al cuadrado (Zhang y Freudenberg, 1993). Esta metodología de diseño fue propuesta por Whitaker del MIT en 1958, en el Instrumentation Laboratory, y se conoce como la regla del MIT.

Existen varias configuraciones posibles para los sistemas con modelo de referencia, siendo la más común el uso de un modelo paralelo (Figura 24). No obstante, también se pueden implementar otras configuraciones, como el modelo en serie, el modelo serie-paralelo, entre otros (Landau, 1973; 1982). Estas diferentes configuraciones permiten una mayor flexibilidad y adaptación a las necesidades específicas del sistema a controlar.

Figura 24
Esquema de un modelo de referencia (MRAC)



Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

Existe una relación dual entre los sistemas de control adaptativo con modelo de referencia y el problema de identificación utilizando un modelo ajustable. En este contexto, el modelo de referencia actúa como la planta que se desea identificar.

Dado un modelo de referencia $G_m(s; p)$ y un sistema ajustable $G_a(s; \hat{p})$ el objetivo es que el sistema ajustable siga al modelo de referencia para minimizar o anular el error, especialmente en presencia de perturbaciones.

Para diseñar la ley de adaptación utilizando esta técnica, se deben seguir los siguientes pasos:

1. **Transformación del Sistema:** Convertir el sistema con modelo de referencia en uno equivalente que tenga la estructura mostrada en la Figura 24.
2. **Ley de Adaptación y Desigualdad de Popov:** Determinar la ley de adaptación que satisfaga la desigualdad de Popov.
3. **Estabilidad Global:** Identificar la parte de la ley de adaptación que influye en la parte lineal para asegurar que el sistema completo sea globalmente estable.
4. **Formulación Final:** Regresar al sistema original y formular explícitamente la ley de adaptación.

Estos pasos aseguran que el sistema ajustable se adapte correctamente al modelo de referencia, manteniendo la estabilidad global y minimizando el error en diversas condiciones operativas. Este enfoque metodológico es crucial para lograr un control adaptativo efectivo y preciso.

2.6.2 Reguladores autoajustables (STR)

El diagrama de bloques de estos controladores, mostrado en la Figura 25, se compone de tres partes distintivas:

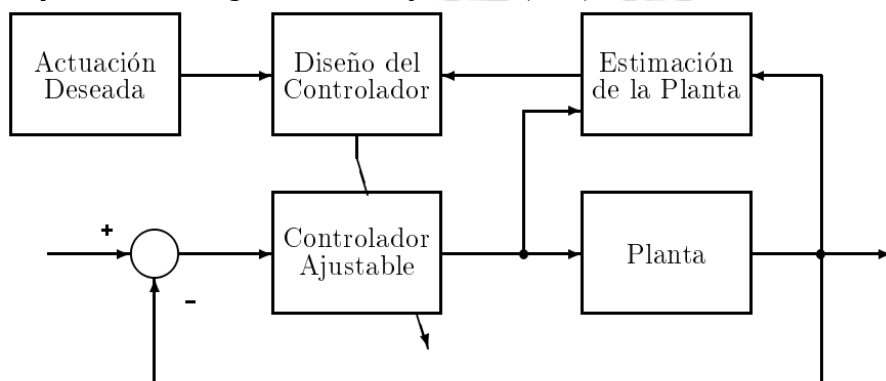
1. Un algoritmo recursivo de estimación de parámetros.
2. Un mecanismo de adaptación encargado del diseño del regulador.
3. Un regulador con parámetros ajustables.

Estos reguladores se basan en una estructura subóptima que sigue el principio de separación de tareas de control e identificación. El diseño asume inicialmente que los parámetros son conocidos, y luego los reemplaza con sus estimaciones (Rubio y Sánchez, 1996).

Desde la perspectiva del control estocástico en sistemas no lineales, este tipo de controlador implementa el principio de equivalencia cierta, que supone que los parámetros identificados coinciden con los parámetros reales del sistema. Esta suposición permite que el controlador funcione de manera efectiva, ajustando continuamente sus parámetros para adaptarse a las condiciones cambiantes del sistema

Figura 25

Esquema de un regulador autoajustable (STR)



Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

La idea de los reguladores autoajustables es aplicable a una amplia variedad de problemas de control, incluso aquellos que no se formulan específicamente como problemas de control estocástico. Gracias a su modularidad y la clara separación entre las tareas de control e identificación, es posible crear numerosas clases de reguladores autoajustables combinando diferentes métodos de diseño e identificadores (Rubio y Sánchez, 1996).

Esta flexibilidad permite que los reguladores autoajustables se adapten a diversas aplicaciones, desde sistemas industriales complejos hasta procesos más simples. Al combinar distintas técnicas de diseño con variados métodos de identificación, se pueden desarrollar soluciones personalizadas que optimizan el rendimiento del sistema en tiempo real. Por ejemplo, en aplicaciones donde las condiciones operativas cambian frecuentemente, un regulador autoajutable puede modificar sus parámetros de control dinámicamente, asegurando una respuesta óptima y eficiente. Además, la capacidad de ajustar los parámetros en función de las condiciones actuales del sistema mejora significativamente la robustez y la adaptabilidad del controlador.

2.7 Importancia del Control Adaptativo

Dado que un controlador adaptativo es un sistema no lineal que requiere el ajuste de varios parámetros, es crucial determinar en qué circunstancias un controlador fijo resulta insuficiente y se necesita un controlador adaptativo. Los controladores convencionales están diseñados para gestionar sistemas, generalmente lineales, cuyos parámetros permanecen constantes. Esta aproximación es adecuada en la mayoría de los casos cuando se busca regular un sistema en un punto de operación fijo (Landau, 1973).

Cuando se presentan perturbaciones menores, los controladores convencionales siguen siendo efectivos, ya que la variabilidad es mínima y el sistema puede mantener un buen rendimiento. Sin embargo, cuando el punto de operación cambia significativamente, la capacidad de un controlador fijo para gestionar el sistema de manera eficiente se ve comprometida. En estos casos, un controlador adaptativo se vuelve esencial.

Los controladores adaptativos son capaces de ajustar dinámicamente sus parámetros en respuesta a cambios en la dinámica del sistema y a perturbaciones externas. Esta capacidad de adaptación permite que el sistema mantenga un rendimiento óptimo incluso cuando las condiciones operativas varían. Por ejemplo, en aplicaciones donde las condiciones de

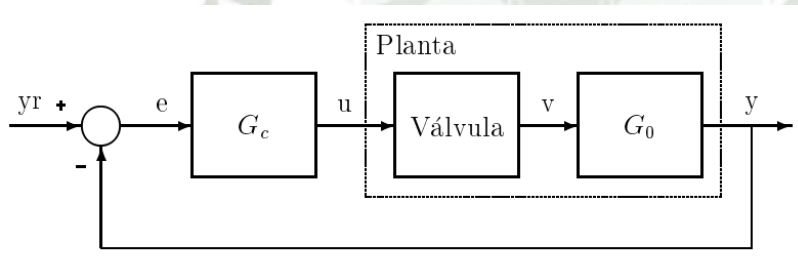
funcionamiento son altamente variables o impredecibles, como en sistemas aeroespaciales o procesos industriales complejos, la adaptabilidad de un controlador adaptativo es fundamental para asegurar la estabilidad y eficiencia del sistema. Mientras que los controladores fijos son adecuados para sistemas con parámetros constantes y perturbaciones mínimas, los controladores adaptativos son necesarios en entornos donde las condiciones operativas pueden cambiar drásticamente. La capacidad de ajustarse a nuevas circunstancias permite a los controladores adaptativos mantener un control robusto y eficiente, asegurando un rendimiento óptimo del sistema en una amplia gama de escenarios operativos (Rubio y Sánchez, 1996).

2.7.1 Actuador no lineal

Numerosos actuadores presentan características no lineales, lo que genera complicaciones en su control.

Figura 26

Sistema en realimentación



Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

Consideremos un sistema lineal, como se muestra en la Figura 26, con un regulador PI cuyo actuador es una válvula con la característica $v = f(u) = u^4$ para $u \geq 0$. Al linealizar el sistema alrededor del punto de operación estacionario, se puede demostrar que la ganancia del bucle es proporcional a la derivada de la función $f(u)$. Esto implica que el sistema puede operar eficientemente en un punto de trabajo específico, pero su desempeño puede ser deficiente en otros puntos de operación. Esto se puede ilustrar con el sistema de la Figura 26, particularizado con:

$$G_0(s) = \frac{1}{(s + 1)^3}$$

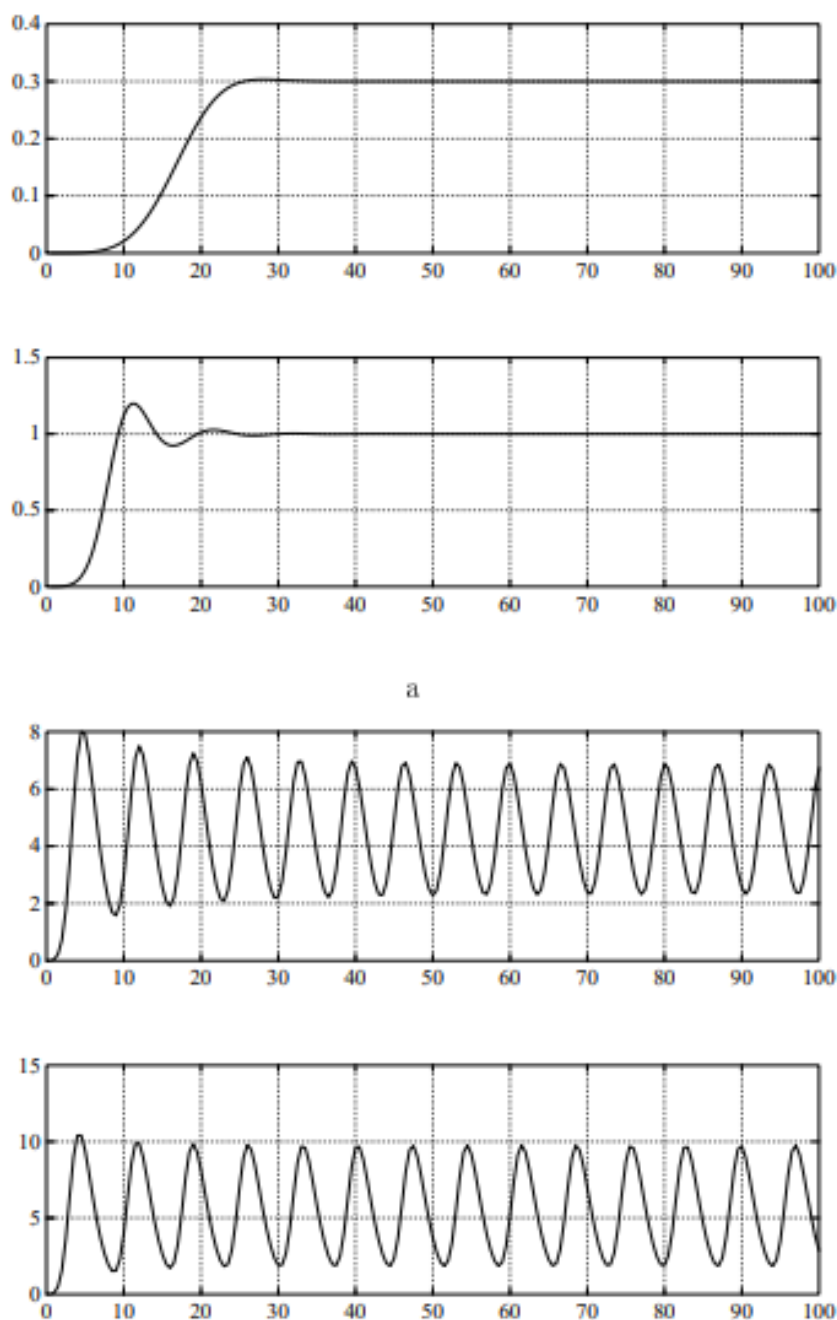
$$G_c(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Donde: $K = 0.15$ y $T_i = 1.0$

La Figura 27 muestra la respuesta del sistema a escalones de diferentes magnitudes, evidenciando cómo el comportamiento del sistema varía según el valor del escalón aplicado. Esta variación destaca la importancia de considerar el punto de funcionamiento, ya que el rendimiento del sistema puede ser significativamente diferente dependiendo de las condiciones operativas específicas.

Figura 27

Respuesta a escalón en distintos parámetros



Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

2.7.2 Sistema de tanques interconectados

Otro ejemplo particularmente interesante involucra tanques y tuberías largas interconectados. Consideremos un sistema como el de la Figura 28, donde se busca controlar la concentración en el segundo tanque.

La ecuación diferencial que describe este proceso es:

$$V_m \frac{dc(t)}{dt} = q(t)[c_{in}(t - \tau) - c(t)]$$

donde:

$$\tau = \frac{V_d}{q}$$

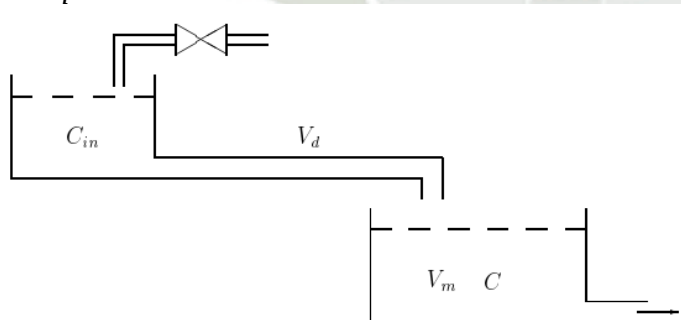
$$T = \frac{V_m}{q}$$

Al aplicar la transformada de Laplace, obtenemos:

$$G_p(s) = \frac{e^{-st}}{1 + T_s}$$

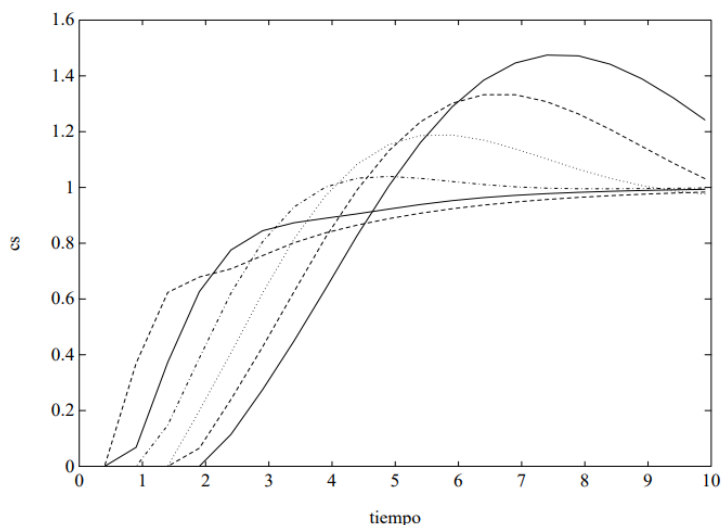
Este sistema es de primer orden, caracterizado por la constante de tiempo T y el retardo asociado τ .

Figura 28
Tanques interconectados



Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

Al simular este sistema en bucle cerrado con un regulador PI, utilizando constantes $K = 0.5$ y $T_i = 1.1$, se observa que el comportamiento del sistema varía significativamente con las fluctuaciones de caudal (Figura 29). Estos ejemplos destacan que muchos procesos son adecuados para la implementación de control adaptativo. La modificación de los parámetros del controlador en respuesta a las condiciones cambiantes del proceso puede mejorar considerablemente el rendimiento y la estabilidad del sistema.

Figura 29
Respuesta escalón en distintos tipos de caudales


Nota. Tomado de (Rubio y Sánchez, 1996).

2.8 Sensores y Actuadores

2.8.1 Sensores

De acuerdo a Ortiz (2014), los sensores son instrumentos capaces de identificar variaciones ambientales o de proceso, que convierten dicha información en señales interpretables. Funcionando como transductores, transforman diversos tipos de energía, como luz, calor o movimiento, en señales eléctricas, usualmente estas señales pueden ser analizadas, procesadas o empleadas para el control de sistemas. Además, los sensores se especializan en medir propiedades específicas, adaptándose a diversas aplicaciones y necesidades, desde la detección de la proximidad de objetos hasta la medición de la presión en fluidos, ofreciendo soluciones en múltiples campos como la industria, la medicina y la tecnología, y constituyendo elementos esenciales en sistemas automatizados.

2.8.2 Actuadores

De acuerdo con Corres (2022), los materiales denominados inteligentes se caracterizan por modificar sus propiedades cuando se le somete a un estímulo externo, lo que los hace ideales para la creación de actuadores. Entre los actuadores desarrollados a partir de estos materiales, aquellos que están basados en aleaciones con memoria de forma ferromagnética FSMA, son objeto de numerosos estudios y presentan gran potencial para el futuro. Estos actuadores son capaces de exhibir amplias deformaciones al exponerse a un campo magnético

o a tensión mecánica, poseen una elevada densidad de energía y operan eficazmente a altas frecuencias.

2.9 Controlador lógico programable (PLC)

Un PLC (Controlador Lógico Programable) es un dispositivo electrónico de estado sólido diseñado para controlar procesos o máquinas y que puede ser programado o reprogramado rápidamente según las necesidades de la aplicación. Fue creado para sustituir los circuitos secuenciales basados en relés utilizados en el control de máquinas. El PLC opera monitoreando sus entradas y, dependiendo de su estado, activando o desactivando sus salidas. El usuario introduce un programa al PLC, generalmente mediante software, permitiendo que el PLC actúe según lo deseado (Sánchez, 2020). Los PLCs son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, tales como el maquinado de piezas, embalaje, manipulación de materiales, ensamblaje automático, y en general, en cualquier aplicación que requiera controles eléctricos. Su versatilidad y capacidad de programación rápida los hacen ideales para una amplia gama de industrias y procesos automatizados.

2.9.1 Tipos de PLCs según su formato

a) PLC Nano

Este tipo de PLC es generalmente compacto, integrando la fuente de alimentación, la CPU y las entradas y salidas en una sola unidad. Maneja un número reducido de entradas y salidas, usualmente menos de 100. Está diseñado para aplicaciones simples y permite el manejo de entradas y salidas digitales y algunos módulos especiales.

Figura 30

PLC EasyE4 Nano



Nota. Tomado de la página web de la empresa Eaton. Fuente (Eaton, s.f.).

b) PLC Compacto

Los PLCs compactos incorporan en un solo módulo la fuente de alimentación, la CPU y los módulos de entrada y salida. Pueden manejar desde unas pocas hasta varios cientos de entradas y salidas, aproximadamente hasta 500. Su tamaño es mayor que el de los PLC Nano y soportan una amplia variedad de módulos especiales, como:

- Entradas y salidas analógicas
- Módulos contadores rápidos
- Módulos de comunicaciones
- Interfaces de operador

Figura 31

PLC Compacto Rockwell Automation



Nota. Tomado de la página web de la empresa Rockwell Automation.

c) **PLC Modular**

Los PLCs modulares están compuestos por varios elementos que conforman el controlador final, incluyendo:

- El rack
- La fuente de alimentación
- La CPU
- Módulos de entrada y salida

Existen desde Micro-PLC, que soportan una gran cantidad de entradas y salidas, hasta PLCs de altas prestaciones capaces de manejar miles de entradas y salidas. Esta configuración permite una gran flexibilidad y escalabilidad, adaptándose a necesidades complejas y cambiantes en diferentes aplicaciones industriales.

Figura 32
PLC Modular ControlLogix 5580



Nota. Tomado de la página web de la de la empresa Rockwell Automation. Fuente Rockwell Automation (s.f).

2.9.2 Lenguajes de Programación

a) Diagrama de escalera (LD - Ladder Diagram)

El Diagrama de Escalera (LD - Ladder Diagram) es un lenguaje gráfico de programación utilizado en la automatización industrial, específicamente para programar controladores lógicos programables (PLC). El Diagrama de Escalera representa de manera visual las relaciones lógicas de un sistema de control, utilizando símbolos que simulan el funcionamiento de relés, contactos y bobinas electromecánicas. Se asemeja a un esquema de cableado eléctrico, donde las líneas horizontales representan la lógica del control y las líneas verticales simulan la alimentación de corriente. Este diagrama se denomina “de escalera” porque los elementos lógicos se organizan de izquierda a derecha, en forma de peldaños que conectan dos barras verticales que simbolizan las líneas de potencia. Es popular debido a su simplicidad visual y su facilidad para entender la lógica de control, lo que lo hace accesible para técnicos e ingenieros sin necesidad de conocimientos avanzados en programación (Ponce, 2019).

b) Diagrama de bloques de funciones (FBD - Function Block Diagram)

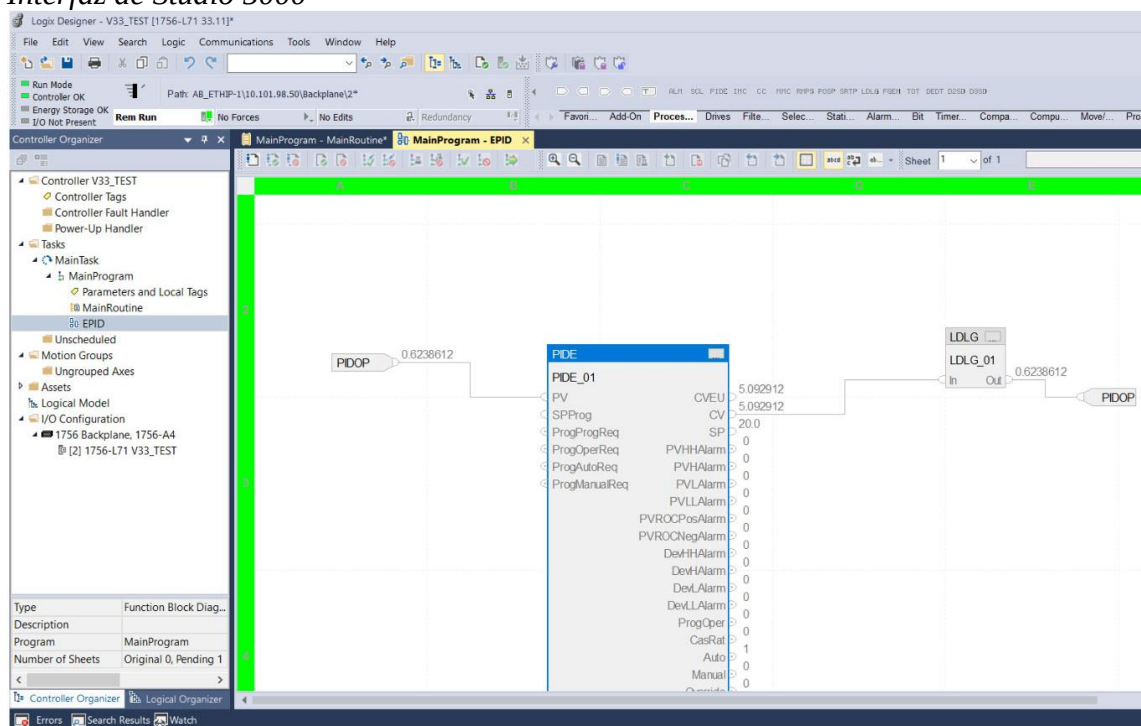
El Diagrama de Bloques de Funciones (FBD - Function Block Diagram) es un lenguaje gráfico de programación utilizado en sistemas de control industrial y automatización, especialmente para programar controladores lógicos programables (PLC). El FBD permite representar visualmente un conjunto de funciones lógicas y operaciones mediante bloques conectados entre sí, que reflejan el flujo de información y las relaciones entre entradas, salidas y procesos. Cada bloque en el diagrama representa una función específica, como operaciones aritméticas, lógicas, de temporización o de control de procesos. Estos bloques se interconectan a través de líneas que indican el flujo de datos o señales entre las diferentes partes del sistema, creando una estructura modular y clara. El FBD es muy adecuado para aplicaciones de control continuo, donde se necesita realizar operaciones repetitivas o complejas de manera estructurada (Ponce, 2019).

2.10 Studio 5000

Studio 5000 es una plataforma de software desarrollada por Rockwell Automation que se utiliza principalmente para la programación, configuración y mantenimiento de controladores lógicos programables (PLC) y sistemas de automatización industrial. Conceptualmente, Studio 5000 integra diversas herramientas de diseño en un entorno unificado, lo que permite a los ingenieros desarrollar y gestionar aplicaciones de control para una amplia variedad de procesos industriales. Esta plataforma proporciona un entorno de desarrollo para crear programas de control avanzados utilizando varios lenguajes de programación, como el Diagrama de Escalera (LD), el Diagrama de Bloques de Funciones (FBD), el Texto Estructurado (ST) y otros lenguajes definidos por la norma IEC 61131-3. Studio 5000 también facilita la configuración de redes industriales, la integración de sistemas HMI (interfaces hombre-máquina) y la gestión de proyectos de automatización en tiempo real (Sánchez, 2020).

Esta plataforma de software proporciona una solución integral y eficiente para la programación y control en diversas aplicaciones industriales.

Figura 33
Interfaz de Studio 5000



Nota. Elaboración Propia

Las características destacadas de Studio 5000 incluyen:

- Studio 5000 unifica diversas herramientas en un solo entorno para la programación, simulación y monitoreo de controladores lógicos programables (PLC), facilitando el desarrollo y mantenimiento de proyectos de automatización industrial.
- Soporta lenguajes de la norma IEC 61131-3, como Diagrama de Escalera (LD), Diagrama de Bloques de Funciones (FBD), Texto Estructurado (ST), Lista de Instrucciones (IL) y Diagrama de Secuencia de Funciones (SFC).
- Permite el desarrollo y la gestión de aplicaciones modulares y escalables, adaptándose a proyectos de diferentes tamaños y complejidades en la industria.
- Ofrece simuladores integrados y herramientas de depuración en tiempo real para probar y optimizar programas antes de la implementación física, reduciendo tiempos de parada y errores operativos.
- Facilita la configuración y la integración de redes industriales, dispositivos de campo y sistemas HMI (interfaces hombre-máquina) para el control y monitoreo de procesos en tiempo real.

2.11 FactoryTalk View

FactoryTalk View es un software desarrollado por Rockwell Automation que permite la interacción entre operadores y sistemas de automatización a través de interfaces hombre-máquina (HMI). Este software facilita la construcción de aplicaciones visuales para monitorear y controlar procesos industriales, lo cual resulta esencial en la gestión eficiente y segura de estos sistemas. Este software presenta diversas características que lo convierten en una solución integral para diversas aplicaciones industriales (Rockwell Automation, 2022).

- Ofrece una interfaz adaptable para crear visualizaciones de datos en tiempo real y configurar pantallas de forma intuitiva.
- El sistema se conecta con otras soluciones de la suite FactoryTalk y dispositivos de terceros, mejorando la interoperabilidad y el flujo de información, generando de esta manera una integración robusta.
- Es adaptable para diferentes tamaños de sistemas, desde aplicaciones individuales hasta redes distribuidas complejas.
- FactoryTalk ViewPoint para acceso remoto, permite la visualización en navegadores web mediante HTML5, lo cual simplifica el monitoreo remoto y elimina la necesidad de licencias adicionales para acceso web en las versiones más recientes.

FactoryTalk View está diseñado para ajustarse a las necesidades específicas de diferentes aplicaciones industriales:

a) **FactoryTalk View Site Edition (SE):**

Está diseñado para aplicaciones distribuidas, con paquetes de servidores que permiten soporte de cinco a veinticinco clientes, además de incluir acceso web ilimitado. Soporta opciones de redundancia de servidor, mejorando la disponibilidad del sistema en operaciones críticas. Permite desarrollar aplicaciones para entornos distribuidos desde un único sistema de diseño.

b) **FactoryTalk View Machine Edition (ME):**

Orientado a aplicaciones en estaciones únicas (PanelView), permite opciones de configuración de pantalla que van desde 15 hasta 500, ajustándose a las necesidades visuales específicas de cada operación. Su modelo de licenciamiento flexible, que incluye opciones de suscripción o perpetuas, facilita la elección de acuerdo con el

presupuesto y las proyecciones de crecimiento de cada planta (Rockwell Automation, 2022).

2.12 Normas y estándares para el diseño de HMI

El diseño de HMI es un componente crucial en sistemas industriales, debe ser guiado por normas técnicas para lograr interfaces claras, seguras y efectivas. Para garantizar una correcta implementación, diversas organizaciones han establecido normas y estándares que proporcionan principios de diseño, ergonomía, gestión de alarmas y usabilidad. A continuación, se resume las principales normas para el diseño de HMI y se describe las consideraciones clave para un correcto diseño.

- a. Organización Jerárquica de Pantallas: Las pantallas deben estructurarse en niveles (general, área, unidad, detalle) para facilitar la navegación y comprensión del proceso al operador (ANSI/ISA-101, IEC 63303).
- b. Codificación Visual: Se recomienda el uso coherente de colores, formas e íconos estandarizados para representar estados del sistema. Fondo neutro para evitar distracción (blanco o gris), evitar saturación cromática y asegurar buen contraste y legibilidad (IEC 60073, MIL-STD-1472H).
- c. Gestión de Alarmas: Las alarmas deben estar priorizadas, clasificadas y con mensajes claros. Debe evitarse la sobrecarga de información mediante filtros y segmentación (ANSI/ISA-18.2, IEC 63303).
- d. Diseño Centrado en el Usuario: El sistema debe adaptarse al usuario considerando contexto, entorno y capacidades. Se debe incluir al operador en el diseño y pruebas de usabilidad (ISO 9241-210, NIST SP 500-197).
- e. Ergonomía y Factores Humanos: Las pantallas deben ser legibles, estar bien ubicadas y adaptadas a las condiciones físicas del operador. Se busca reducir la fatiga y los errores humanos (MIL-STD-1472H, ISO 9241-5).

2.13 OLE for Process Control (OPC)

OPC es la sigla de OLE for Process Control y surgió en 1996 con el objetivo de estandarizar la comunicación en tiempo real entre dispositivos de control fabricados por diferentes proveedores. Sin embargo, la tecnología inicial basada en COM/DCOM de

Microsoft presentaba limitaciones, especialmente en términos de escalabilidad, seguridad y compatibilidad con otras plataformas. Estas limitaciones impulsaron el desarrollo de OPC UA (Unified Architecture), que introdujo un enfoque orientado a servicios (SOA) y dejó de depender de la tecnología DCOM (OPC Foundation).

El estándar OPC se fundamenta en una arquitectura cliente-servidor. El servidor OPC recopila datos en tiempo real de los controladores o dispositivos de campo y los pone a disposición del cliente OPC, que puede ser un SCADA o cualquier otra aplicación que necesite procesar o mostrar los datos. El cliente solicita información específica del servidor mediante tags OPC, y el servidor responde con el valor actual de la variable y la marca de tiempo correspondiente.

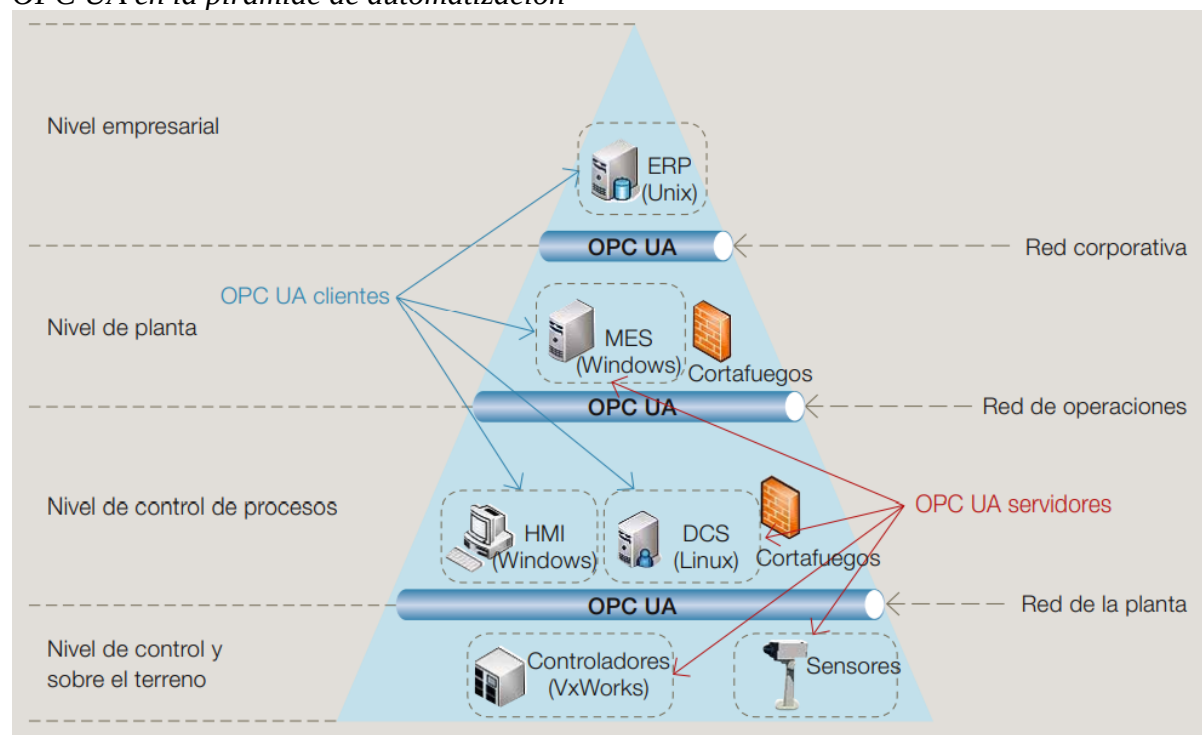
OPC UA se diseñó como una evolución del OPC Clásico, ofreciendo una arquitectura más segura, escalable e independiente de la plataforma. Combina las funcionalidades de las especificaciones clásicas en un modelo unificado.

- OPC DA (Data Access): Permite la transferencia de datos en tiempo real, entre dispositivos y sistemas, transfiere valores y marcas de tiempo y es la versión más utilizada para gestionar datos instantáneos de procesos industriales.
- OPC A&E (Alarms & Events): Gestiona la comunicación relacionada con alarmas y eventos dentro del proceso, permite a los sistemas de supervisión recibir alertas en tiempo real y responder a eventos rápidamente.
- OPC HDA (Historical Data Access): Gestiona el acceso a datos históricos y proporciona métodos de consulta para recuperar valores pasados, lo cual es útil para análisis de tendencias.
- OPC XML-DA: Soporte para la comunicación basada en XML y servicios web, facilitando la interoperabilidad a través de Internet (Mahnke & Leitner, 2009)

OPC UA representa un avance significativo en la industria, ya que no solo mejora la interoperabilidad entre sistemas, sino que también aporta seguridad y flexibilidad. Al ser independiente de las plataformas y orientada a servicios, esta arquitectura permite una integración eficaz y segura entre dispositivos de campo, sistemas de control, y plataformas empresariales. Con estas características, OPC UA se posiciona como el estándar de facto para la automatización industrial (OPC Foundation).

Figura 34

OPC UA en la pirámide de automatización



Nota. Tomado de (Mahnke & Leitner, 2009).

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL SISTEMA

1. Proceso de molienda de carbón

En la industria del cemento, la molienda de carbón comienza con la recepción y almacenamiento del material, que es depositado en un hangar para evitar la polución y humedad, a través de un sistema de apilamiento y de recuperadores de rastrillo, se realiza la homogeneización del material, lo que asegura una composición uniforme en cuanto a las características del carbón como humedad y tamaño.

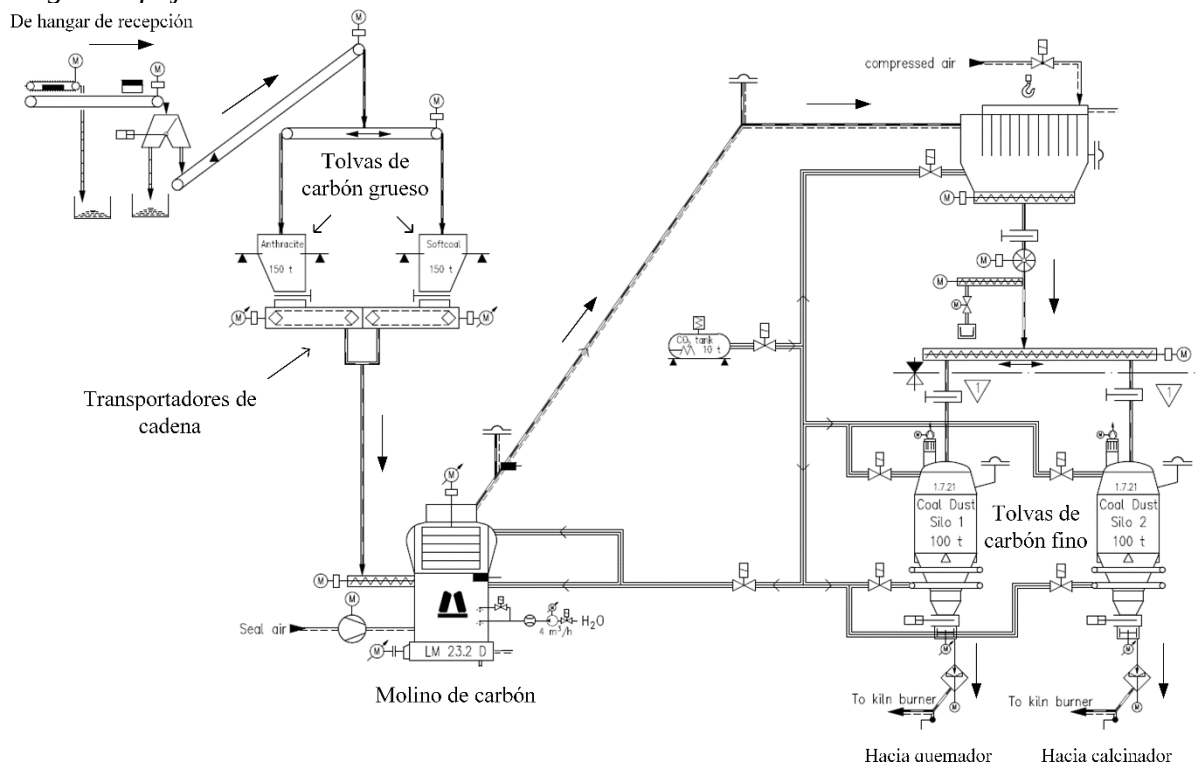
El carbón es transportado desde el hangar, por fajas transportadoras, hasta el edificio donde se ubica el molino vertical, el carbón grueso es almacenado en dos silos que cuentan con una capacidad de 150 T, para posteriormente ser dosificado por los transportadores de cadena, que regulan la cantidad de carbón que ingresa al molino. Al ser dos transportadores de cadena, estos proporcionan mayor capacidad de transporte, redundancia y flexibilidad, mejorando así la eficiencia del sistema.

El material a moler ingresa por la parte superior del molino, la gravedad lo lleva al plato y la fuerza centrífuga desplaza el material hacia los rodillos, donde se tritura mediante presión y fricción por el sistema hidráulico. El material molido es transportado por aire hacia el separador, que retiene las partículas que no alcanzan el tamaño deseado y las redirige al plato para ser nuevamente molidas. El producto final que cumple con el grado de fineza es arrastrado por la corriente de aire a través del separador (LOESCHE, 2013).

El molino funciona en un sistema cerrado, controlando la presión mediante ventiladores que generan corrientes de aire caliente. Estos gases, secan el carbón durante la molienda, manteniendo la humedad del producto. La presión diferencial se mantiene cuidadosamente para evitar fugas de polvo y asegurar la eficiencia del proceso. Una vez molido, el carbón fino es capturado mediante filtros de mangas y depositado en silos de almacenamiento. Dado que el polvo de carbón es inflamable, estos sistemas están equipados con sensores de CO y un sistema de inertización. Desde los silos, el carbón pulverizado es transportado mediante sistemas neumáticos hasta el quemador del horno y el calcinador de la torres de pre calentamiento, donde se utiliza como combustible para el proceso de clinkerización.

Figura 35

Diagrama flujo de molienda de carbón



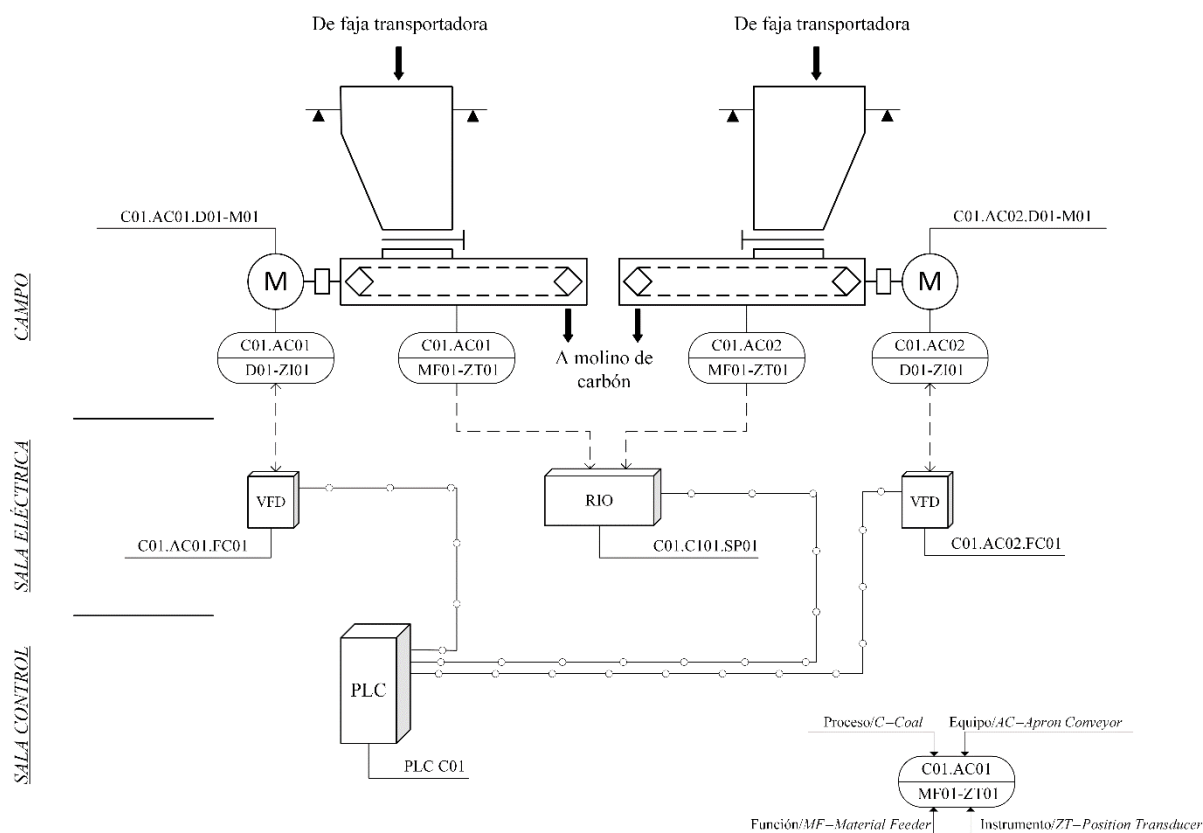
Nota. Elaboración Propia

2. Diagrama esquemático del sistema

El diagrama esquemático presentado en la Figura 36 muestra la configuración del sistema de control para la medición indirecta del flujo másico de carbón en molinos verticales. Este sistema está dividido en tres áreas principales: campo, sala eléctrica y sala de control.

En el campo, se encuentran los componentes físicos principales como los motores, (C01.AC01.D01-M01 y C01.AC02.D01-M01), que accionan los transportadores de cadena, (C01.AC01 y C01.AC02) y los dispositivos de medición que registran las variables críticas del proceso, como los encoder (C01.AC01.D01-ZI01 y C01.AC02.D01-ZI01) y los elementos de medición encargados de determinar la altura de carbón que se forma dentro de los transportadores, que están identificados como C01.AC01.MF01-ZT01 y C01.AC02.MF01-ZT01.

Figura 36
Diagrama esquemático



Nota. Elaboración propia

En la sala eléctrica, se encuentra el armario de Entrada/Salida Remota (RIO) C01.C101.SP01, que recopila las señales de los dispositivos de campo y las transmite al controlador lógico programable (PLC) mediante protocolo de Ethernet IP, a través de una interface de fibra óptica, este módulo es esencial para la comunicación y el control del sistema. En sala eléctrica también se encuentran los armarios con los variadores de frecuencia (VFD) C01.AC01.FC01 Y C01.AC02.FC01, encargados del control de los motores que accionan los transportadores de cadena.

Mientras que, en la sala de control, el PLC C01 es el componente central que recibe y procesa la información de los sensores y actuadores a través del RIO. El PLC está programado con el software Studio 5000, permitiendo el control adaptativo del sistema, optimizando así la operación del molino vertical. La integración de estos elementos asegura un control eficiente y preciso del flujo másico de carbón, mejorando la estabilidad operativa y la eficiencia energética del proceso.

Tabla 1
Descripción de TAG del sistema

TAG	DESCRIPCIÓN
C01.AC01.D01-M01	Motor trifásico transportador de cadena 01
C01.AC02.D01-M01	Motor trifásico transportador de cadena 02
C01.AC01.D01-ZI01	Encoder incrementar transportador de cadena 01
C01.AC02.D01-ZI01	Encoder incrementar transportador de cadena 02
C01.AC01.MF01-ZT01	Transductor de desplazamiento transportador de cadena 01
C02.AC02.MF01-ZT01	Transductor de desplazamiento transportador de cadena 02
C01.AC01.FC01	Armario de convertidor de frecuencia de transportador 01
C01.AC02.FC01	Armario de convertidor de frecuencia de transportador 02
C01.C101.SP01	Armario de entradas y salidas remotas
PLC C01	Controlador lógico programable de proceso de carbón

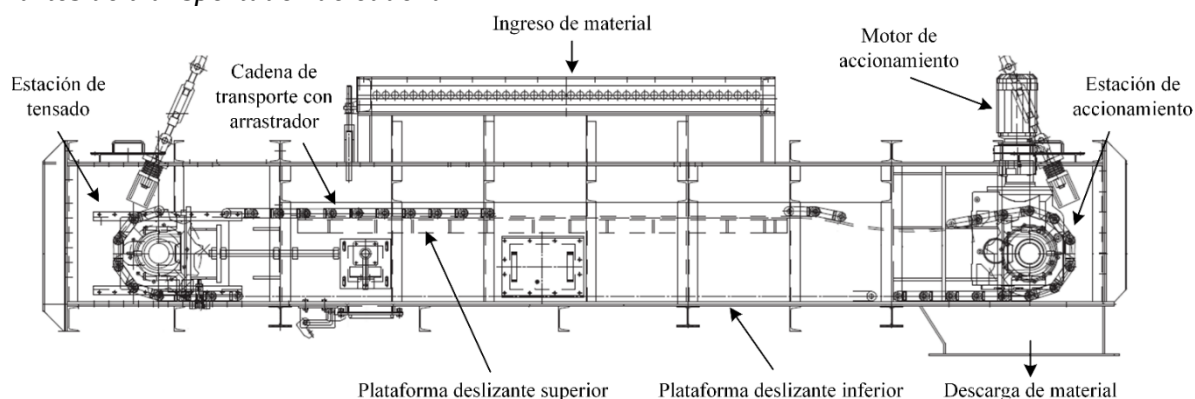
Nota. Elaboración propia

3. Descripción de transportador de cadena

El transportador de cadena opera mediante una cadena cerrada que circula a lo largo de un cajón, donde el material es transportado por la fricción generada entre los eslabones de la cadena y los elementos de arrastre que empujan el material hacia la salida. La cadena es impulsada por una estación de accionamiento equipada con un motor, a través de la rueda dentada de la estación, la cadena se mueve hacia adelante con una velocidad controlada. Para asegurar un funcionamiento eficiente y evitar el desgaste prematuro o roturas, la cadena se mantiene en la tensión adecuada mediante un sistema de tensado ubicado en la estación final. La tensión se ajusta manualmente mediante varillas roscadas. Los arrastradores están unidos a la cadena y son los responsables de empujar el material, estos elementos están diseñados para minimizar el desgaste y maximizar la eficiencia en el transporte de materiales con diferentes granulometrías y humedades.

El material se introduce en el transportador a través de una tolva de alimentación, que deposita el producto en la plataforma deslizante superior, a medida que la cadena avanza, los arrastradores llevan el material hasta la plataforma deslizante inferior en donde el material es transportado al punto de descarga.

Figura 37
Partes de transportador de cadena



Nota. Elaboración Propia

Este tipo de transportadores se utiliza comúnmente en las industrias de minería, cemento, entre otras, para el transporte de materiales a granel que requieren un manejo cuidadoso y controlado, como minerales, carbón y Clinker. En comparación con los transportadores de banda, los transportadores de cadena son preferidos cuando se requiere un manejo preciso de materiales pesados, abrasivos o que generan gran polución, su sistema cerrado permite que el transporte sea seguro y sin pérdidas, lo que es adecuado para el transporte de carbón.

La siguiente figura muestra el transportador de cadena al cual se adaptó una lámina de detección en su interior para determinar la altura de carbón que se dosifica al molino.

Figura 38
Transportador de cadena y paleta de detección en su interior



Nota. Elaboración Propia

4. Descripción de equipos e instrumentación

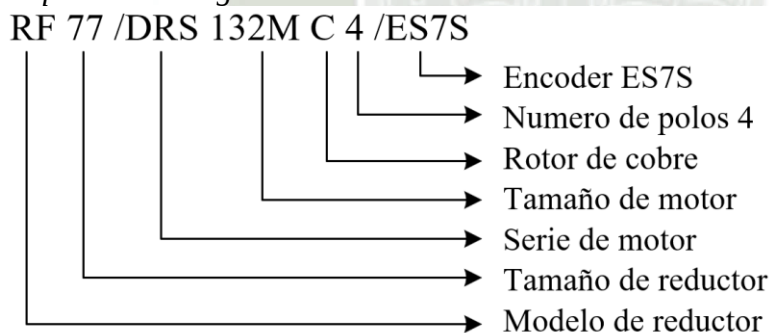
4.1. Motor trifásico

El motor trifásico de la serie DR../DRN/DR2.. de SEW es un tipo de motor eléctrico de inducción diseñado para cumplir con los estándares y normas internacionales en cuanto a eficiencia energética y compatibilidad con diferentes regulaciones. Estos motores son altamente versátiles, ya que están disponibles en clases de eficiencia que van desde IE1 (eficiencia estándar) hasta IE4 (eficiencia súper premium), lo que permite a las empresas seleccionar la opción más adecuada según sus necesidades de rendimiento y ahorro energético.

El motor “RF77 DRS132MC4 ES7S”, en particular, es un motor de eficiencia estándar (IE1), lo que implica que cumple con los requisitos básicos de eficiencia, aunque SEW ofrece opciones de mayor eficiencia en la misma línea de productos para aquellos que buscan reducir los costos operativos a largo plazo. Su diseño compacto no solo ahorra espacio en las instalaciones industriales, sino que también contribuye a una mayor eficiencia en términos de costos y tiempos de instalación (SEW-EURODRIVE, 2015).

Figura 39

Esquema de designación de modelo del motor



Nota. Tomado de SEW-EURODRIVE (2015).

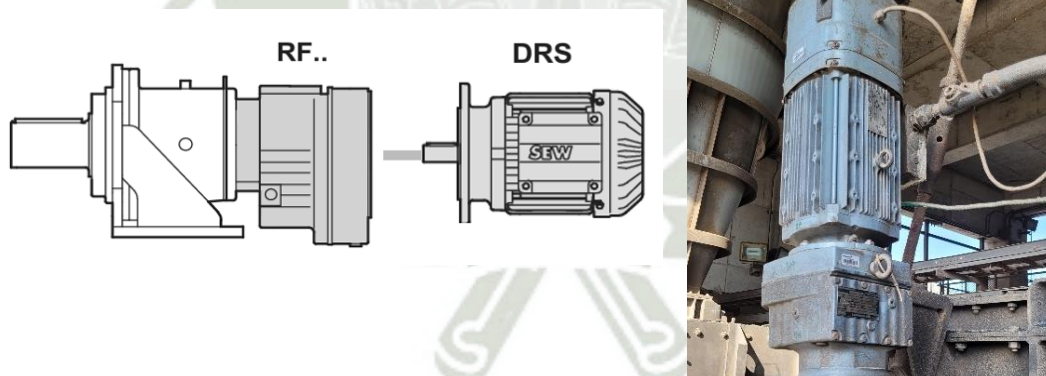
La Tabla 2 presenta los datos técnicos del motor trifásico modelo RF77 DRS132MC4 ES7S de SEW, detallando las especificaciones clave para su operación. Esta información incluye las configuraciones de conexión eléctrica (DD, YY, D), los valores de tensión y corriente correspondientes, así como la velocidad de rotación, el número de polos, la potencia nominal y otros parámetros importantes como el factor de potencia ($\cos \phi$) y el grado de protección (IP 55). Estos datos son esenciales para comprender el rendimiento y las características operativas del motor bajo distintas condiciones de trabajo.

Tabla 2
Placa de datos de motor

Conexión:	DD	YY	D
Tensión:	220 V	380 V	440 V
Corriente	26.5 A	15.34 A	13.25 A
Velocidad:	1750 rpm	Polos:	4
Potencia:	7.5 KW	Frecuencia:	60 Hz
Cos ϕ :	0.83	IP:	55

Nota. Elaboración Propia

La Figura 40 muestra el motor trifásico modelo RF77 DRS132MC4 ES7S, fabricado por SEW-EURODRIVE. Esta ilustración incluye tanto un diagrama técnico del ensamblaje del motor con su reductor, como una imagen del motor instalado en un entorno industrial. El motor está acoplado a un reductor de engranajes cilíndricos de la serie RF, lo que permite reducir la velocidad de rotación y aumentar el torque de salida.

Figura 40
Motor trifásico modelo RF77 DRS132MC4 ES7S

Nota. Tomado de SEW-EURODRIVE (2015).

4.2. Variador de frecuencia

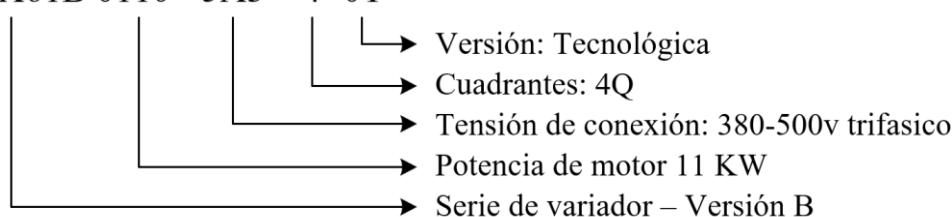
El variador de frecuencia SEW modelo MDX61B 0110-5A3-4-0T de la serie Movidrive B, con una potencia nominal de 11 KW, en la aplicación es alimentado por una tensión trifásica de 440v AC y 60 Hz de frecuencia, el variador es de tamaño 2 según el fabricante y cuenta con un panel de control integrado con una pantalla LCD y teclas de navegación para su configuración y monitoreo. El variador cuenta con un zócalo de encoder, en donde se instalar

la tarjeta DEH11B la cual es compatible con una amplia variedad de encoders y se conecta directamente con el encoder a través de un conector DB15, lo que permite que el variador pueda ajustar su salida en función de la retroalimentación de velocidad. También cuenta con un módulo DFE11B que permite la comunicación por protocolo Ethernet IP mediante un conector RJ45, esto facilita la integración en la red industrial (SEW-EURODRIVE, 2024).

Figura 41

Diagrama de designación del variador de frecuencia

MDX61B 0110 - 5A3 - 4 -0T



Nota. Tomado de SEW-EURODRIVE (2024).

La Tabla 3 presenta los datos técnicos del variador SEW modelo MDX61B 0110-5A3-4-0T. Este variador es compatible con una tensión de entrada trifásica de 380-500 V AC, operando en una frecuencia de 50-60 Hz. Además, permite una frecuencia de salida ajustable de 0-400 Hz, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones industriales. Su potencia nominal es de 11 kW y su corriente de salida es de 24 A, lo que garantiza un control eficiente del motor en una amplia gama de operaciones.

Tabla 3

Datos técnicos de variador SEW modelo MDX61B 0110-5A3-4-0T

Tensión:	380-500v AC 3f
Frecuencia:	50-60 Hz
Frecuencia de salida:	0-400 Hz
Potencia:	11 KW
Corriente de salida:	24 A

Nota. Tomado de SEW-EURODRIVE (2024).

A continuación, se muestra los variadores de frecuencia, encargados del accionamiento de los transportadores de cadena, considerados en esta investigación.

Figura 42

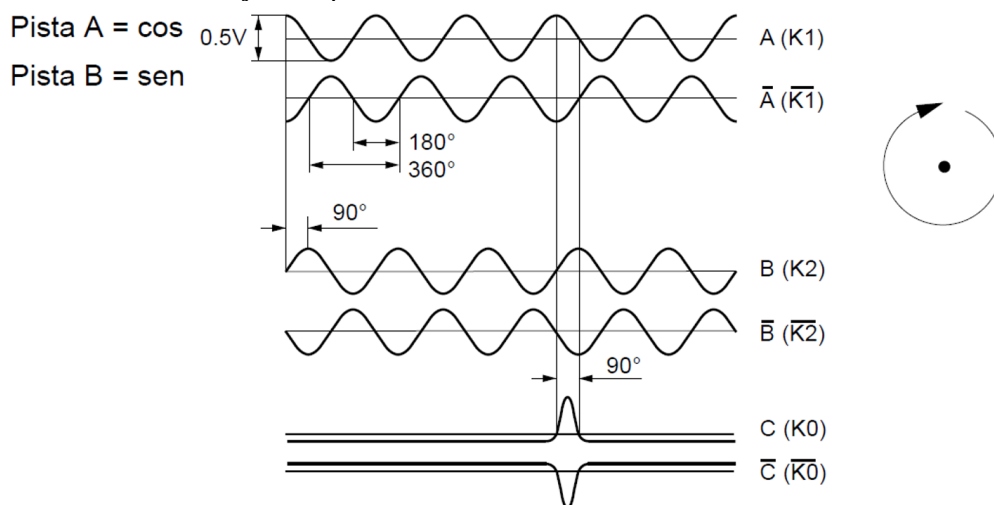
Variador de frecuencia SEW modelo MDX61B 0110-5A3-4-0T



Nota. Elaboración Propia

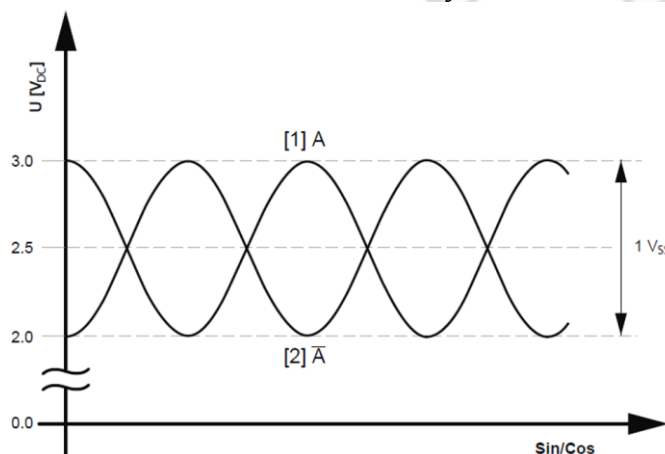
4.3. Encoder incremental

El encoder SEW ES7S es un dispositivo de medición utilizado para monitorear con precisión la posición, velocidad y dirección de giro de un eje en aplicaciones industriales. Este encoder es de tipo incremental, lo que significa que genera señales de salida basadas en los incrementos de movimiento del eje. Utiliza la interfaz eléctrica sen/cos, que proporciona dos señales senoidales analógicas desfasadas 90 grados entre sí, conocidas como señales A y B. Estas señales son fundamentales para determinar la dirección de rotación del eje, ya que el desfase entre ellas permite identificar si el movimiento es en sentido horario o antihorario (SEW-EURODRIVE, 2010). Además de las señales A y B, el encoder ES7S genera un impulso cero (C), también conocido como pulso de referencia o pulso de una vuelta, que se emite una vez por cada revolución completa del eje. Este pulso es crucial para establecer una referencia en la medición y permite una mayor precisión en la determinación de la posición absoluta de un sistema de control.

Figura 43
Señales senoidales y de referencia del Encoder incremental SEW ES7


Nota. Tomado de SEW-EURODRIVE (2010).

Las señales analógicas sen/cos generalmente están superpuestas a una tensión continua de 2.5v DC, ya que estas señales se transmiten de manera simétrica y se evalúan de forma diferencial, son menos susceptibles a interferencias y a campos electromagnéticos. La Figura 44 muestra las señales senoidales A y su inversa $\bar{A}$, generadas por el encoder incremental SEW ES7S. Estas señales representan el flujo de información de salida que permite determinar la posición angular y la dirección del giro de un eje. La diferencia de amplitud entre las señales senoidales es de 1 Vpp (voltios pico a pico), y su desfase es clave para calcular con precisión el movimiento. Este tipo de señal es común en sistemas de control de motores, donde la precisión y la resolución del posicionamiento son esenciales.

Figura 44
Señales senoidales incrementales A y $\bar{A}$ en un Encoder SEW ES7S


Nota. Tomado de SEW-EURODRIVE (2010).

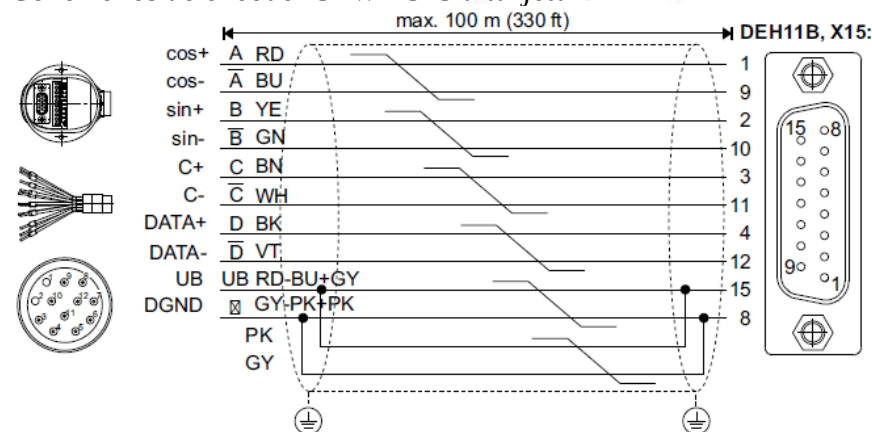
La Tabla 4 presenta los datos técnicos del encoder incremental, que opera con una tensión de alimentación de 7-30 V DC y tiene un consumo máximo en corriente de 140 mA. Ofrece una frecuencia de impulsos máxima de 150 KHz, con 1024 periodos por revolución para las señales A y B, y un impulso de referencia C por cada vuelta completa. La señal de salida tiene una amplitud de 1 Vpp, alcanzando una resolución angular de 0.0194°. Este encoder es capaz de operar a una velocidad máxima de 6000 rpm.

Tabla 4
Datos técnicos del encoder SEW ES7S

Tensión de alimentación:	7-30v DC
Consumo corriente máx:	140mA
Frecuencia impulsos máx:	150KHz
Periodos por revolución (A y B - C):	1024 - 1
Amplitud señal de salida:	1 Vss
Precisión:	0.0194°
Velocidad Máxima:	6000 rpm

Nota. Elaboración Propia

El encoder puede conectarse a la tarjeta DEH11B del variador, como se detalla a continuación. Este diagrama especifica las conexiones necesarias para la transmisión de señales, incluyendo las señales senoidales de coseno y seno (cos+ y sin+), las conexiones de alimentación, las señales de datos (+/-), y la señal de referencia (C). Se debe de considerar que el cable debe ser apantallado y no tener una longitud mayor a 100 metros.

Figura 45
Conexiones de encoder SEW ES7S a tarjeta DEH11B


Nota. Tomado de SEW-EURODRIVE (2010).

4.4. Sistema de detección de altura de carbón con transductor magnetostrictivo

Para el cálculo indirecto del flujo másico de carbón, primero es necesario medir la posición o desplazamiento lineal que permite determinar la altura de la cama de carbón que se forma dentro del transportador de cadena, para esto se propone dos soluciones, las cuales se describen a continuación:

a) LVDT (Linear Variable Differential Transforme)

El LVDT consta de una bobina primaria centrada en el sensor y dos bobinas secundarias situadas simétricamente en ambos lados de la primaria; en su interior se encuentra un núcleo ferromagnético que se desplaza linealmente dentro del cuerpo LVDT y proporciona una camino para el flujo magnético entre la bobina primaria y las secundarias, al energizar la bobina primaria con un tensión alterna, que normalmente se encuentra entre los 3 y 7 voltios a 2,5 kHz de frecuencia, se crea un campo electromagnético que induce un voltaje a los bobinados secundarios que están conectados de manera diferencial respecto al bobinado primario, cuando el núcleo se desplaza altera el acoplamiento magnético y de acuerdo con la posición se induce un voltaje, a través de circuitos electrónicos se determina la posición del núcleo móvil.

Figura 46

CTS-420 Loop Position LVDT Sensor 4-20MA



Nota. Tomado de TE Connectivity (s.f).

b) Tecnología magnetostrictiva

Estos sensores basan su funcionamiento en el principio de magnetostricción, que es la propiedad de ciertos materiales de cambiar de forma o tamaño cuando son expuestos a un campo magnético. El sensor contiene una barra de material magnetostrictivo (níquel o hierro), un imán se coloca sobre la barra y se desliza en ella en función de la posición que se desea medir. El sensor envía un pulso de corriente a través de la barra, el cual genera un campo magnético temporal, cuando el pulso llega a la posición del imán causa una deformación mecánica en la barra, la cual genera una onda de torsión que se propaga a lo largo de la barra a velocidad ultrasónica. En un extremo del sensor se absorbe la onda en una zona de amortiguación y en el otro extremo se encuentra una bobina captadora que genera una señal eléctrica. La posición del imán se determina en función del tiempo de propagación de la onda, como la velocidad de la onda es constante, este tiempo es proporcional a la distancia que recorre.

Figura 47

Sensores magnetostrictivos BTL6-E500-M0200-PF-S115



Nota. Tomado de Balluff (s.f)

A continuación, se presenta un cuadro comparativo de las principales características técnicas de las dos soluciones propuestas para la medición de la altura de la cama de carbón dentro del transportador.

Tabla 5
Comparación técnica entre transductores de posición LVDT y magnetostrictivo

Tecnología:	LVDT	Magnetostrictiva
Marca:	TE Connectivity	Balluff
Modelo:	CTS-420	BTL6
Tensión de alimentación:	10 - 36v DC	10 - 30v DC
Señal de salida:	4 - 20 mA	4 - 20 mA
Longitud de medición:	254 mm	200 mm
Error de linealidad:	$\pm 1.5 \%$	$\pm 200 \mu\text{m}$
Material de carcasa:	Acero inoxidable	Aluminio anodizado
Grado de protección:	IP68	IP67
Costo aproximado:	1500 USD	700 USD

Nota. Elaboración Propia

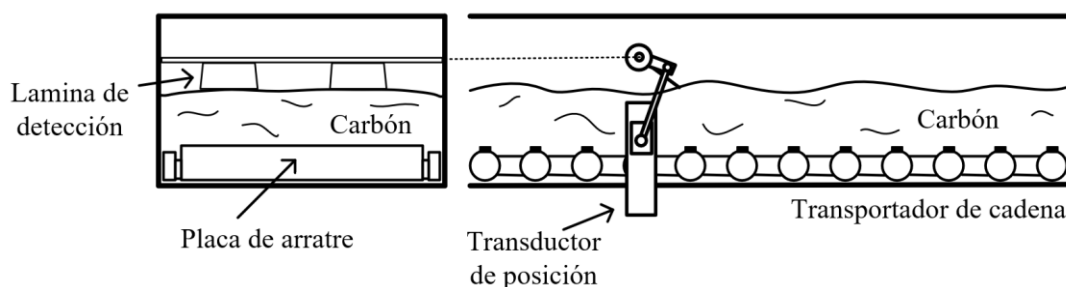
De la tabla anterior, se puede inferir que ambos transductores de posición tienen prácticamente las mismas características técnicas, por lo que debemos de tomar en cuenta aspectos más cualitativos:

- El sensor LVDT tiene alta precisión y es excelente para medir desplazamientos cortos, pero al escoger un sensor de 254 mm su error de linealidad y su costo de adquisición aumentan.
- El LVDT requiere de una electrónica adicional de excitación AC para operar y un acondicionar de señal para convertir su salida a una señal estandarizada.
- El transductor magnetostrictivo puede medir desplazamientos mayores y gracias a su diseño sin contacto, se elimina el desgaste mecánico.
- El transductor magnetostrictivo está diseñado para operar en entornos industriales soportando polvo, vibraciones y altas temperaturas. Además, tiene un menor costo respecto al LVDT.

Entonces, por las características expuestas, se escoge el transductor de tecnología Magnetostrictiva Balluff BTL6-E500-M0200-PF-S115, como elemento de medición de desplazamiento lineal para obtener la altura de la cama de carbón que se forma dentro del transportador de cadena.

Figura 48

Esquema de medición de altura a través de transductor de posición



Nota. Elaboración Propia

La Figura 49 muestra al transductor de posición instalado en el cuerpo del transportador de cadena, el cual se encuentra acoplado mecánicamente a la lámina de detección que se encuentra dentro del transportador, de esta manera se determina la altura de cama de carbón que se forma.

Este sensor está conectado eléctricamente a un módulo de entradas analógicas (4 - 20 mA) en el gabinete de entradas y salidas remotas (RIO), donde los datos de medición generados por el sensor son enviados a través de la red al PLC del proceso.

Figura 49

Sensor magnetostrictivo para medición de desplazamiento lineal



Nota. Elaboración Propia

4.5. Controlador Lógico Programable ControlLogix 1756-L75

El controlador 1756-L75 es parte de la familia de controladores programables ControlLogix 5570, diseñado por Rockwell Automation. Estos controladores están optimizados para aplicaciones de control de procesos industriales complejos y redes de comunicación industrial que permiten la flexibilidad, integración y un alto rendimiento dentro de arquitecturas escalables. Este controlador se instala en un chasis 1756 y es programado mediante el entorno Studio 5000 a partir de la versión 21. El controlador L75 se distingue por su capacidad de procesamiento, conectividad y almacenamiento; ya que cuenta con una memoria de 32 MB y una tarjeta SD.

Tabla 6
Características del controlador ControlLogix L75

Memoria:	32 MB de memoria para datos y lógica. Soporte de tarjeta SD para respaldo.
Puerto de comunicación:	Puerto USB 2.0 tipo B para configuración y programación.
Opciones de comunicación:	EtherNet/IP, ControlNet®, DeviceNet, Remote I/O, SynchLink™
Control de tareas:	Hasta 32 tareas. 1000 programas por tarea, desde la versión 24 de Studio 5000.
Lenguajes de programación:	Diagrama Ladder (LD), Texto estructurado (ST), Bloque de funciones (FBD), Diagrama secuencial de funciones (SFC)
Control Redundante:	Soporte completo, excepto para aplicaciones de movimiento.

Nota. Elaboración Propia

Figura 50
PLC ControlLogix L75



Nota. Tomado de la página web de la empresa Rockwell Automation.

4.6. Protocolo de comunicación

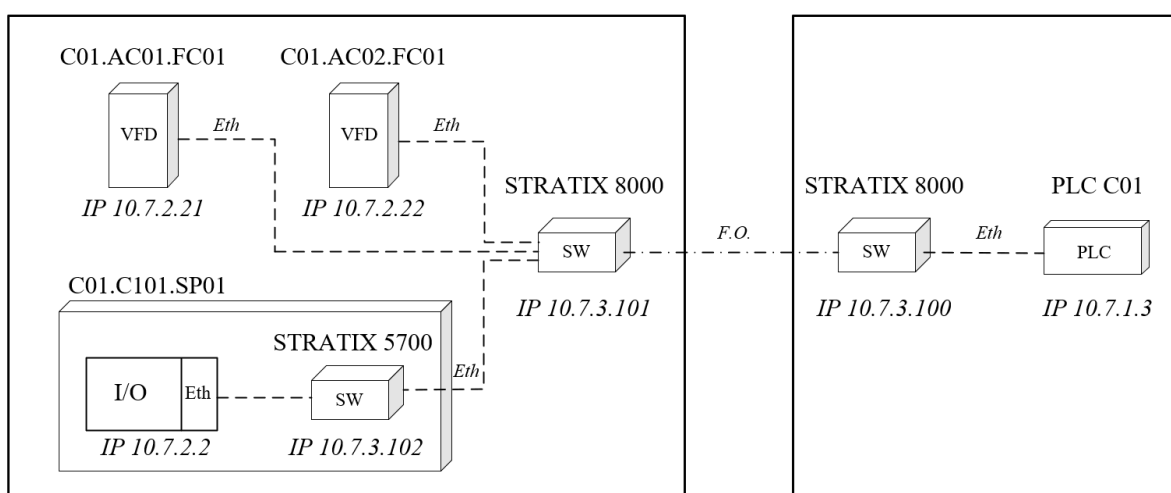
El protocolo Ethernet IP es utilizado para la comunicación entre el controlador del proceso (PLC C01) y dispositivos de campo. La comunicación entre la Sala de Control y la Sala Eléctrica (ubicada en campo) se establece mediante fibra óptica a través de los switches administrables STRATIX 8000 de la marca Rockwell Automation, estos poseen puertos de fibra óptica y de cobre.

En sala eléctrica, los variadores de frecuencia encargados del accionamiento de los transportadores de cadena se conectan por cable cobre al switch STRATIX 8000, de igual forma se conecta el armario de entradas y salidas remotas (C01.C101.SP01) por medio de un switch administrable STRATIX 5700.

El módulo de entradas y salidas (RIO) de ControlLogix permite que los sensores y actuadores ubicados en campo se conecten al sistema de control a través del protocolo Ethernet IP, las entradas y salidas discretas manejan señales digitales de 110v AC y las entradas y salidas analógicas utilizan el estándar de 4 a 20 mA, lo que permite transmitir valores de medición continua. Esta arquitectura asegura una comunicación robusta y eficiente entre los dispositivos de campo y el sistema de control.

Figura 51

Arquitectura de comunicación
Sala Eléctrica



Nota. Elaboración Propia

5. Cálculo del Flujo Másico

La rapidez del flujo másico (M) se define como la cantidad de masa de un fluido que atraviesa una sección determinada por unidad de tiempo, mientras que el flujo volumétrico (Q) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q = A * v$$

Donde A representa el área de la sección y v indica la velocidad promedio del flujo. Las unidades de Q se pueden deducir como sigue, utilizando unidades del SI:

$$Q = A * v; [m^2 * m/s] = [m^3/s]$$

Según Robert L. Mott y Joseph A. Untener en su libro Mecánica de Fluidos (7ª edición, 2015) “Una manera de obtener mediciones de la rapidez del flujo de masa es utilizar un medidor de flujo del tipo que se acaba de analizar, el cual indica la rapidez del flujo de volumen, y entonces medir en forma simultánea la densidad del fluido. Por lo tanto, la rapidez del flujo de masa sería:”

$$M = \rho * Q$$

En el SI, las unidades para M son:

$$M = \rho * Q; [kg/m^3 * m^3/s] = [kg/s]$$

Entonces, de acuerdo con el concepto anterior, podemos definir al flujo másico como:

$$M = \rho * A * v$$

Donde:

v : Velocidad lineal

A : Área de sección transversal

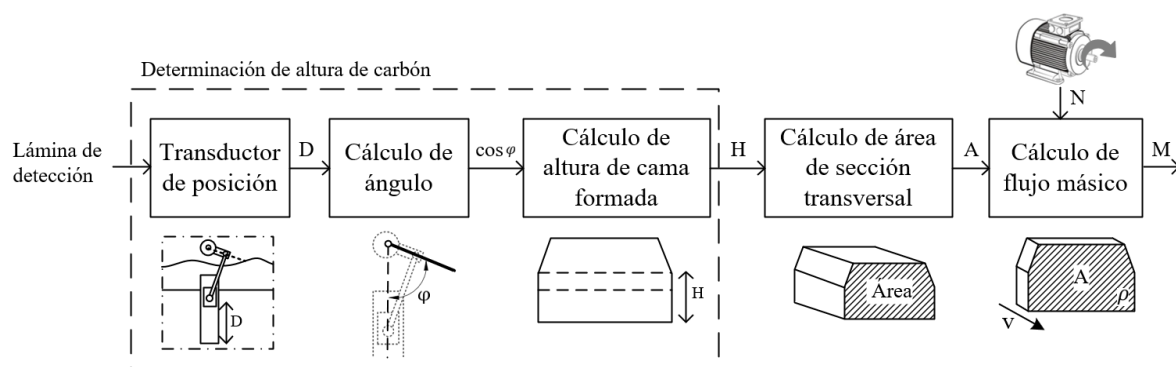
ρ : Densidad del material

La Figura 51 muestra el procesado realizado para el calculado en las etapas necesarias que permiten determinar el flujo másico de carbón en un sistema de transporte. El proceso comienza con la detección de la lámina de carbón a través de un transductor de posición, el cual mide el desplazamiento de la lámina de detección (D). A partir de esta medición, se realiza el cálculo del ángulo del lecho de carbón con respecto a la horizontal, permitiendo calcular la

altura de la cama formada (H). Con estos datos, se procede al cálculo del área de la sección transversal (A), que representa la cantidad de carbón transportado en una sección del sistema. Finalmente, esta área se utiliza junto con la velocidad de transporte (v) para calcular el flujo másico (M), empleando la densidad del material para obtener la cantidad total de masa transportada por unidad de tiempo.

Figura 52

Diagrama de bloques para el cálculo de flujo másico



Nota. Elaboración Propia

5.1 Bloque de cálculo de ángulo de posición de lámina de detección ($\cos\phi$)

Para obtener la altura de la cama de carbón dentro del transportador de cadena, primero es necesario determinar el ángulo de la posición de la lámina de detección. Esta lámina está conectada externamente al transductor de posición, formando un conjunto similar a un sistema biela-manivela (ver Figura 52). A medida que la cantidad de carbón en el transportador varía, la lámina de detección se desplaza, cambiando su ángulo. Este movimiento es captado por el transductor de posición, que convierte la posición angular en una señal eléctrica proporcional a la altura del carbón.

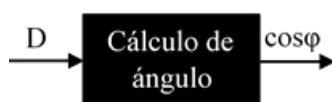
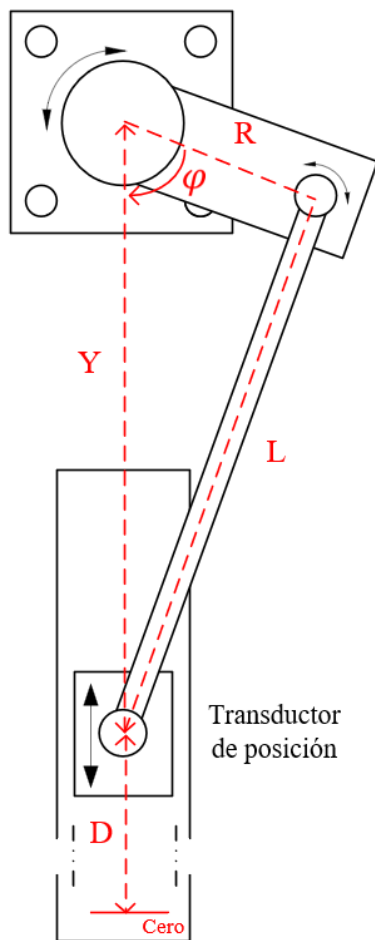


Figura 53

Sistema biela manivela en transductor de posición

Cojinete de pared



Nota. Elaboración Propia

Donde:

- R representa la longitud de la unión entre el cojinete de pared y el brazo (de longitud L) del sensor de posición, el cual se mueve a lo largo de la guía de ondas dentro del cuerpo del transductor de posición.
- D es la distancia medida por el sensor durante su recorrido.
- El ángulo φ es el ángulo de inclinación del brazo respecto a la vertical.
- La distancia Y , es una función de estos parámetros y se calcula usando la relación geométrica entre ellos, como se muestra a continuación:

$$Y = R + L - D$$

Aplicando la ley de cosenos:

$$L^2 = R^2 + Y^2 - 2 \times R \times Y \times \cos\varphi$$

$$2 \cdot R \cdot Y \cdot \cos\varphi = R^2 + Y^2 - L^2$$

$$\cos\varphi = \frac{R^2 + Y^2 - L^2}{2 \cdot R \cdot Y}$$

Remplazando Y:

$$\cos\varphi = \frac{R^2 + (R + L - D)^2 - L^2}{2 \cdot R \cdot (R + L - D)}$$

Simplificando:

$$\cos\varphi = \frac{2 \cdot R^2 - 2 \cdot D \cdot (R + L) + D^2 + 2 \cdot R \cdot L}{2 \cdot R \cdot (R + L - D)}$$

5.2 Bloque de cálculo de altura de cama formada en transportador (H)

La altura de la cama de carbón (H) que se forma en el transportador de cadena depende del ángulo (φ), la altura de la banda muerta (BM) y la distancia de medición de la lámina de detección (ZM). La lámina de detección mide solo hasta el límite de la banda muerta, definida por la altura de la placa de arrastre del transportador. Esta banda muerta impide mediciones por debajo de su altura, asegurando que solo se considere el material en la zona de medición activa. Por encima de la banda muerta, la zona de medición adopta una forma trapezoidal debido al formador de cama ubicado al ingreso del transportador.

Este diseño asegura que el carbón se distribuya uniformemente, permitiendo una medición precisa. La fórmula $ZM \cdot (1 - \cos\varphi)$ se utiliza para calcular la altura efectiva de la zona de medición, teniendo en cuenta el ángulo de inclinación de la lámina de detección (ver Figura 53). La combinación de estos factores garantiza una evaluación precisa y constante del flujo másico de carbón, optimizando así el rendimiento del sistema.

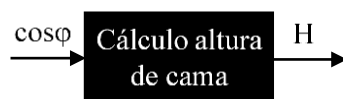
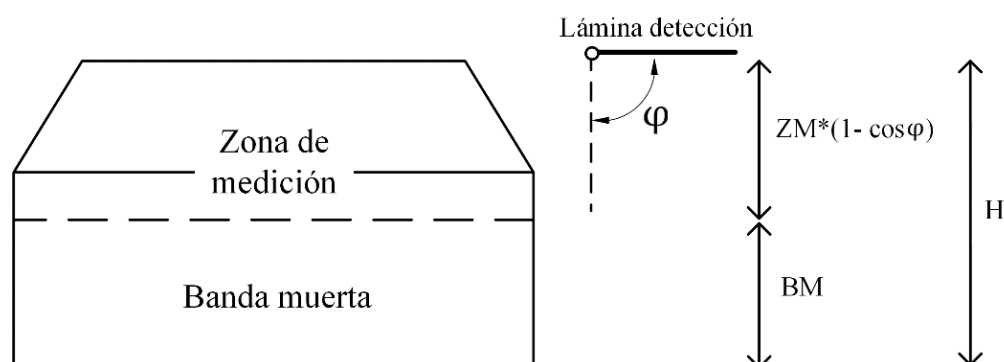


Figura 54

Altura de la cama de carbón



Nota. Elaboración Propia

Entonces la altura de la cama de carbón formada dentro del transportador de cadena, está definida por:

$$H = BM + ZM \cdot (1 - \cos\varphi)$$

5.3 Bloque de cálculo del área de sección transversal del material (A)

Según la altura obtenida (H), determinamos el área de sección transversal del carbón que se forma en el transportador. La Figura 54 ilustra el perfil de la cama de carbón, que se compone de una base inferior y una base superior, creando una zona trapezoidal encima de la banda muerta. La altura total (H) se divide en secciones: a (banda muerta), b (zona de medición inferior), c (zona de medición superior) y d (zona de medición rectangular). El área se calcula considerando estas secciones y las bases superior e inferior.

La sección de la zona trapezoidal se calcula a partir del área del triángulo formado por la longitud de la base superior (x) y la altura (y). El ángulo θ determina la inclinación del carbón en el transportador.

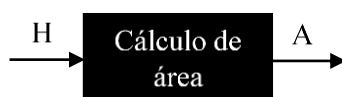
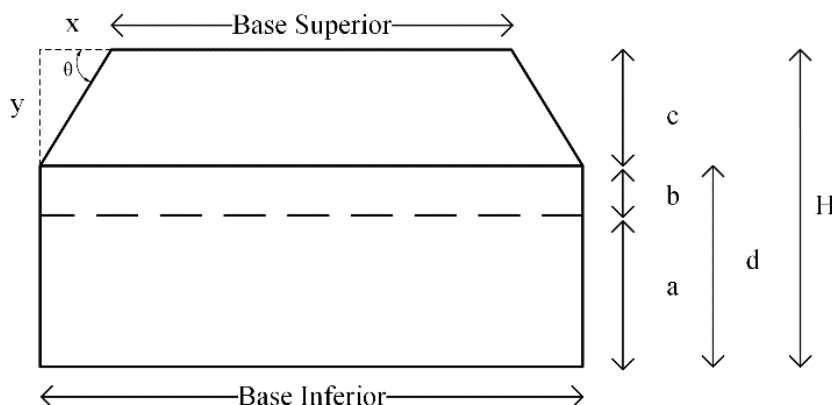


Figura 55

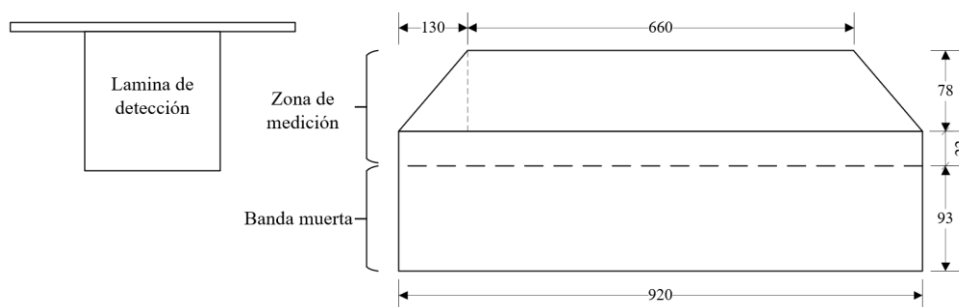
Área del carbón


Nota. Elaboración Propia

A continuación, se presentan las medidas, en milímetros, del formador de cama ubicado en el ingreso de material del transportador de cadena. La figura 48 ilustra estas dimensiones: el ancho total del formador de cama es de 920 mm, con una longitud superior de 660 mm y un segmento adicional de 130 mm. La altura total del área de medición es de 93 mm, de los cuales 22 mm corresponden a la banda muerta y 78 mm a la zona de medición. La lámina de medición se encuentra alineada con la zona de medición, permitiendo la detección precisa de la altura del carbón.

Figura 56

Medidas del formador de cama


Nota. Elaboración Propia

El área de la cama de carbón en el transportador de cadena se determina según la altura H, basada en las siguientes condiciones:

1. Si $H \leq a$ (altura de la banda muerta), el área es igual a la base inferior multiplicada por a.
2. Si $a < H \leq d$ (altura total), el área es igual a la base inferior multiplicada por H.
3. Si $H > d$, el área es igual al área total menos el doble del área de los triángulos formados por la diferencia en altura.

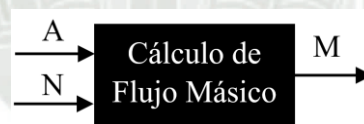
$$Area = \begin{cases} Base\ inferior * a; & si\ H \leq a \\ Base\ inferior * H; & si\ a < H \leq d \\ Area_{total} - 2 * Area_{triangulo} & si\ H > d \end{cases}$$

Las fórmulas para calcular estas áreas son:

$$Area_{total} = base\ inferior \cdot H$$

$$Area_{triangulo} = \frac{(H - d)^2}{2 \cdot \tan \theta}$$

5.4 Bloque de cálculo de flujo másico (M)



La velocidad del motor (N) es medida en RPM, para convertir este valor a la velocidad lineal (v) del transportador de cadena se multiplica por un factor de velocidad (k) en cual lo convierte de RPM a m/s. Ya que el motor está conectado a una caja reductora, la velocidad del transportador de cadena no es equivalente a la velocidad en el eje del motor, por lo que se realiza un cálculo de la velocidad lineal tomando medidas de tiempo de una vuelta completa del transportador. La longitud de la cadena del transportador es de 10.851m.

La Tabla 6 muestra las pruebas realizadas para determinar la velocidad lineal del transportador, se observa que a medida que aumenta la velocidad angular del motor, el tiempo de vuelta completa disminuye y la velocidad lineal del transportador aumenta. El Factor k permanece prácticamente constante, lo que indica una relación lineal entre la velocidad angular y la velocidad lineal del transportador.

Tabla 7
Cálculo de la velocidad lineal del transportador de cadena

Prueba	Velocidad angular en eje motor [RPM]	Tiempo de una vuelta completa [s]	Velocidad lineal [m/s]	Factor k ([m/s]/RPM)
1	254	1253	0.0087	0.00003409
2	409	775	0.0140	0.00003423
3	856	370	0.0293	0.00003426

Nota. Elaboración Propia

- **Prueba:** Número de la prueba realizada.
- **Velocidad angular en eje motor (RPM):** La velocidad a la que gira el eje del motor.
- **Tiempo de una vuelta completa (s):** El tiempo que toma para que el transportador complete una vuelta completa.
- **Velocidad lineal (m/s):** La velocidad a la que se mueve el transportador.
- **Factor K ([m/s]/RPM):** Un factor de conversión que relaciona la velocidad angular del motor con la velocidad lineal del transportador.

Entonces, para convertir de RPM a m/s, el factor se obtiene a partir del valor promedio de las tres pruebas realizadas, resultando en un factor k de 0.0000342 ([m/s]/RPM).

Entonces, con el cálculo del área de sección transversal (A) y la velocidad lineal del transportador (N*k), se puede definir la siguiente función multi variable que describe el flujo másico (M) en el transportador de cadena.

$$M_{(A,N)} = 3.6 * \rho * A_{(h)} * (N * k)$$

Donde

$A_{(h)}$: Área en función del desplazamiento “h” del transductor de posición en m²

N: Velocidad del motor en RPM, medida por el encoder

k: Constante de conversión de RPM a m/s

ρ : Densidad del material en kg/m³

El factor 3.6 convierte el flujo de kilogramos por segundo a toneladas por hora.

6. Identificación del modelo del proceso

Para obtener el modelo matemático del sistema, se utilizó el System Identification Toolbox de MATLAB. El objetivo de esta identificación es comprender y modelar la respuesta dinámica del transportador de cadena, lo cual es fundamental para desarrollar controles precisos y optimizar su rendimiento. Esta modelación permite simular y analizar el comportamiento del transportador bajo diversas condiciones operativas, facilitando ajustes y mejoras en el control del sistema sin necesidad de realizar pruebas físicas costosas y potencialmente disruptivas.

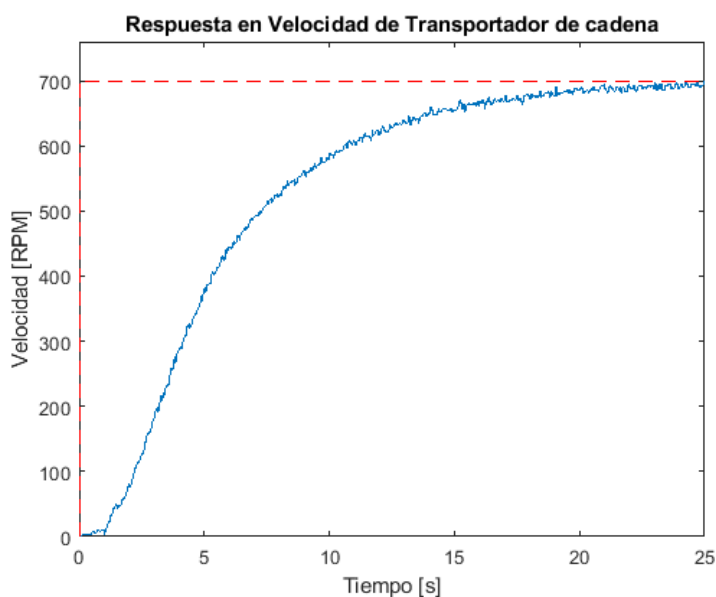
Primero, se realizó una prueba en vacío estableciendo manualmente un setpoint de velocidad de 700 RPM. Los datos de la salida se recolectaron mediante un encoder con un período de muestreo de 10 ms, y se guardaron en matrices de MATLAB para su análisis posterior. El código presentado a continuación carga estos datos desde un archivo llamado 'DataStartMotorRev.mat', extrae el tiempo (TIME), la velocidad angular (RPM_data) y el Setpoint (SP), y luego los grafica.

```
load('DataStartMotor.mat')
TIME = DataMotor(:,1);
RPM_data = DataMotor(:,2);
SP = DataMotor(:,3);
plot(TIME, RPM_data)
hold on
plot(TIME, SP, "LineStyle", "--", "Color", "r")
xlim([0 25])
ylim([0 760])
xlabel('Tiempo [s]')
ylabel('Velocidad [RPM]')
title('Respuesta de Velocidad de Transportador de cadena')
```

La Figura 56 muestra la respuesta de velocidad del transportador de cadena. Este gráfico ilustra cómo la velocidad, medida en RPM, varía a lo largo del tiempo desde el inicio hasta alcanzar el setpoint de 700 RPM. Al analizar esta curva, podemos identificar la dinámica del sistema, como el tiempo de respuesta y el comportamiento transitorio, que son esenciales para construir un modelo matemático preciso.

Figura 57

Respuesta del transportador de cadena

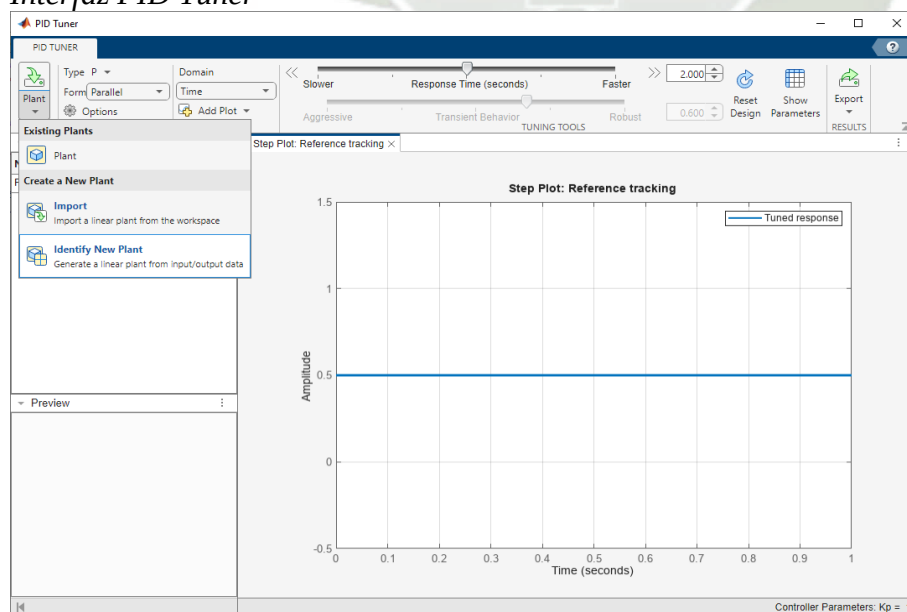


Nota. Elaboración Propia

Utilizando la aplicación PID Tuner de MATLAB, se llevó a cabo la identificación del modelo del sistema. La Figura 57 muestra la interfaz del PID Tuner, donde se puede observar el proceso de creación y ajuste del modelo.

Figura 58

Interfaz PID Tuner



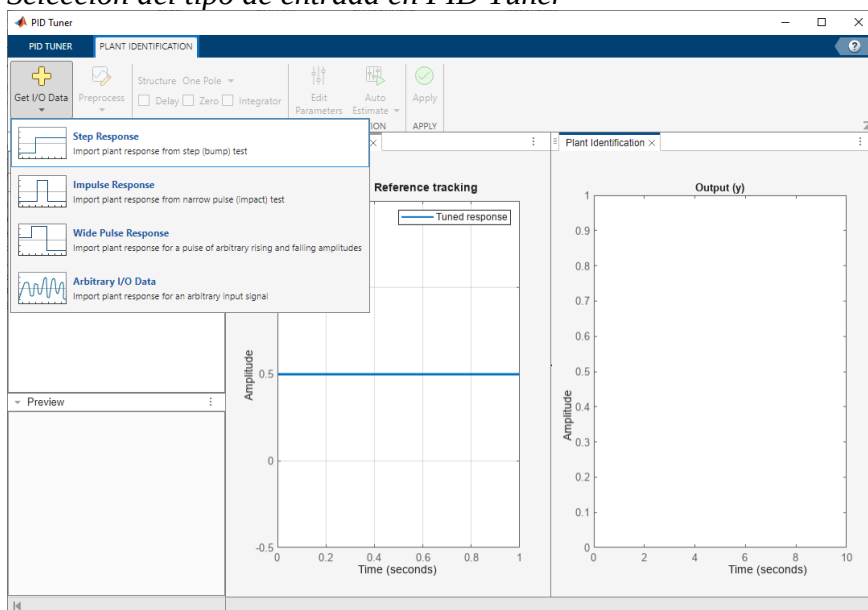
Nota. Elaboración Propia

Se selecciona el tipo de entrada que se aplicará al modelo en la aplicación PID Tuner de MATLAB. La Figura 58 muestra las opciones disponibles para la identificación de la planta:

respuesta al escalón (Step Response), respuesta al impulso (Impulse Response), respuesta a pulsos anchos (Wide Pulse Response) y datos de entrada/salida arbitrarios (Arbitrary I/O Data). Estas opciones permiten adaptar la identificación del modelo a las características específicas del sistema bajo estudio, asegurando una sintonización precisa del controlador PID.

Figura 59

Selección del tipo de entrada en PID Tuner



Nota. Elaboración Propia

Para llevar a cabo la identificación del modelo del sistema, se utiliza la opción de respuesta al escalón en el PID Tuner de MATLAB. Se ingresan los datos de salida correspondientes a la velocidad del transportador de cadena, denominados RPM_data. La entrada de tipo escalón se configuró con una amplitud de 700 RPM, lo que representa el setpoint de velocidad deseado. Además, se especifica un tiempo de muestreo de 10 ms, asegurando una captura precisa de los datos a lo largo del tiempo.

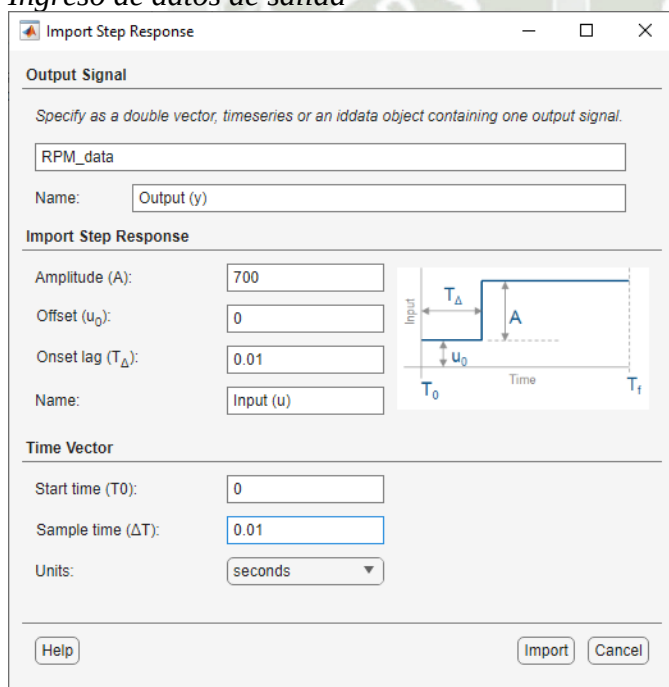
En la interfaz de “Import Step Response”, como se muestra en la Figura 59, se detallan varios parámetros clave:

- **Amplitud (A):** Establecida en 700, representa el cambio en la entrada aplicado al sistema.
- **Offset (u0):** Configurado en 0, indica que no hay desplazamiento inicial en la entrada.

- **Onset lag (T_Δ):** Fijado en 0.01 segundos, representa el retraso inicial antes de que la entrada se aplique.
- **Start time (T_0):** Fijado en 0 segundos, marcando el inicio del tiempo de la simulación.
- **Sample time (ΔT):** Establecido en 0.01 segundos, asegurando un muestreo preciso de los datos de salida.

Este enfoque permite modelar la respuesta dinámica del transportador de cadena bajo condiciones de entrada específicas.

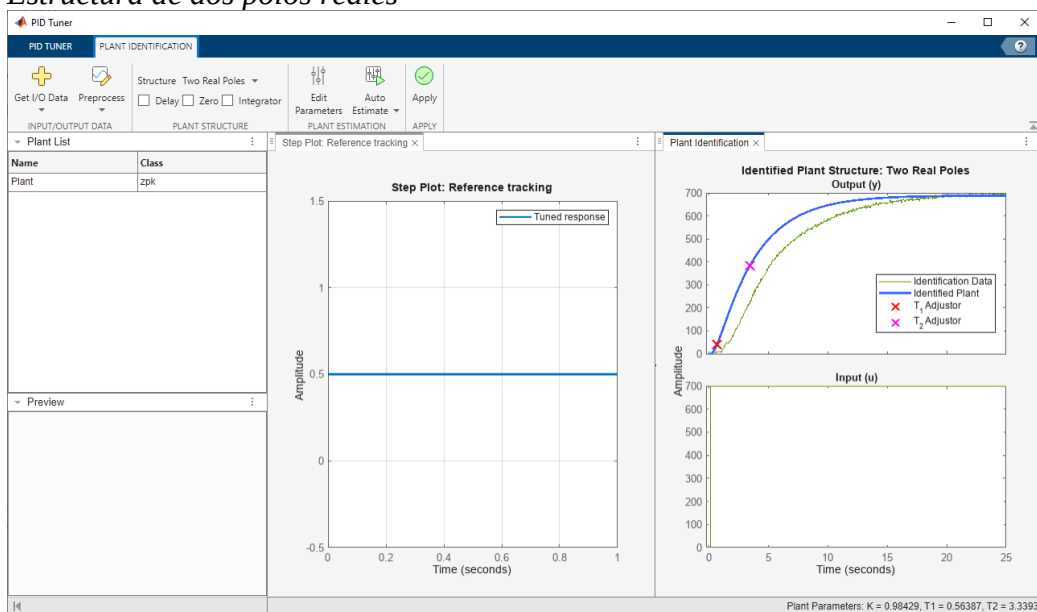
Figura 60
Ingreso de datos de salida



Nota. Elaboración Propia

Para modelar el sistema, asignamos una estructura de dos polos reales al modelo en la aplicación PID Tuner de MATLAB. La Figura 60 muestra esta configuración, donde se observa cómo el modelo identificado (línea verde) se ajusta a los datos de identificación (línea azul). Los ajustes de los polos, representados por los marcadores rojos T_1 y T_2 , optimizan la respuesta del modelo, proporcionando una representación de la dinámica del sistema.

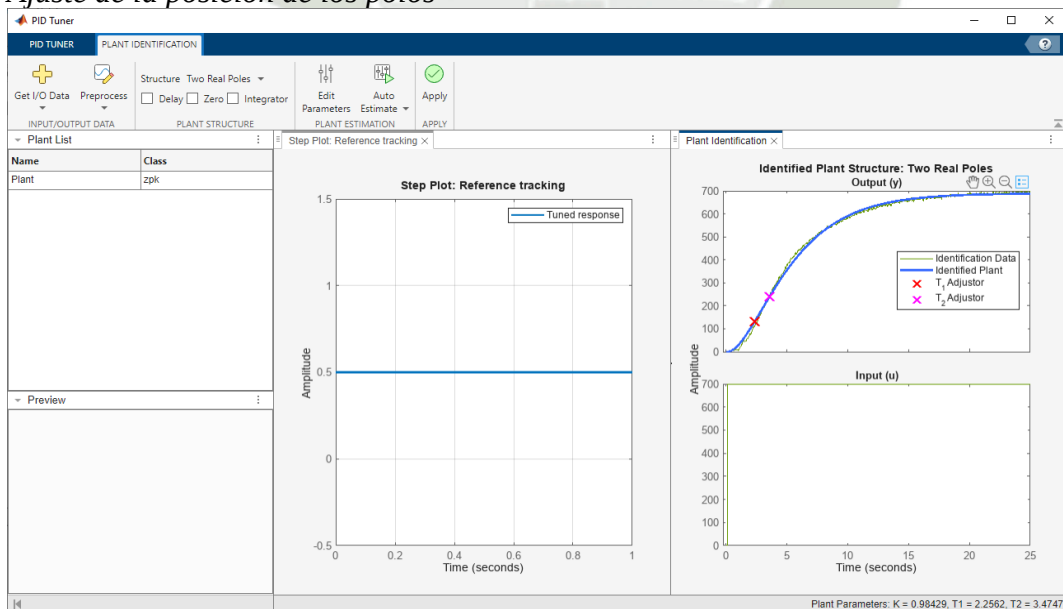
Figura 61
Estructura de dos polos reales



Nota. Elaboración Propia

Se puede ajustar manualmente la posición de los polos para mejorar la precisión de la estimación del modelo.

Figura 62
Ajuste de la posición de los polos

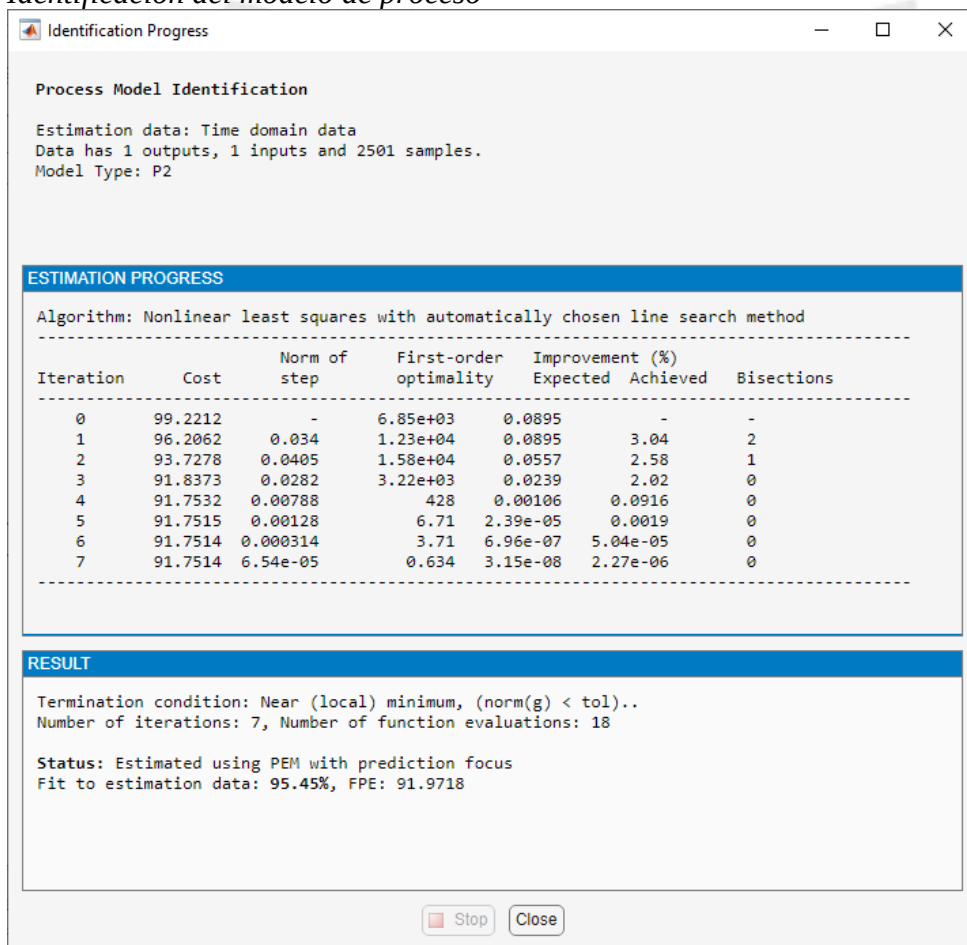


Nota. Elaboración Propia

Realizamos la estimación del modelo utilizando la opción “Auto Estimate” en la aplicación PID Tuner de MATLAB. La Figura 62 muestra los resultados del proceso de identificación del modelo de proceso. Los parámetros del proceso incluyeron el número de iteraciones, el costo en cada paso, la norma del paso, la optimalidad de primer orden, el porcentaje de mejora esperado y logrado, y las bisecciones.

Figura 63

Identificación del modelo de proceso

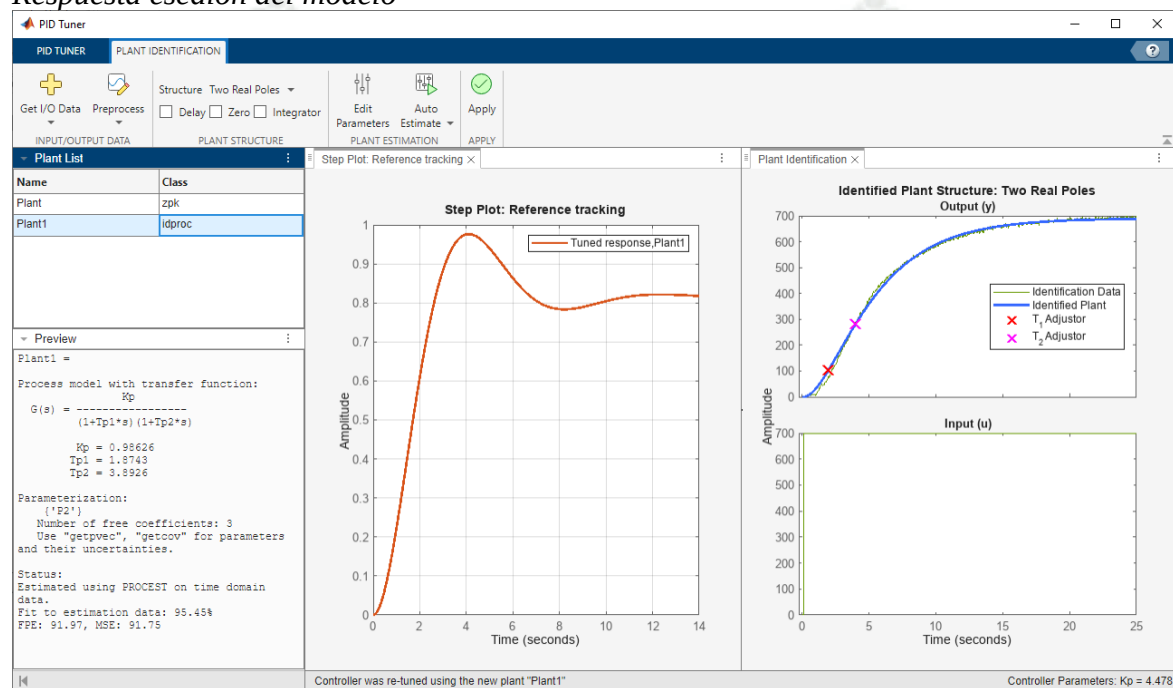


Nota. Elaboración Propia

El algoritmo utilizado fue el de mínimos cuadrados no lineales con un método de búsqueda de línea seleccionado automáticamente. A través de siete iteraciones, el costo disminuyó progresivamente, logrando una condición de terminación cercana a un mínimo local. La estimación se completó con una precisión del 95.45% en el ajuste a los datos de estimación, reflejando una alta fidelidad del modelo identificado. Luego se aplica esta estimación y se obtiene el modelo del proceso, representado en la Figura 63. La respuesta escalón del modelo se muestra con una ganancia proporcional.

El modelo de proceso incluye una función de transferencia con dos polos reales. La estimación se realizó utilizando el método PROCEST en datos de dominio temporal, con un ajuste de 95.45% a los datos de estimación. Esto indica una alta fidelidad en la representación del comportamiento dinámico del sistema, lo que es crucial para el diseño y ajuste del controlador PID. Los parámetros del modelo, como K_p , T_{p1} y T_{p2} , están especificados, permitiendo una comprensión detallada de la respuesta del sistema.

Figura 64
Respuesta escalón del modelo

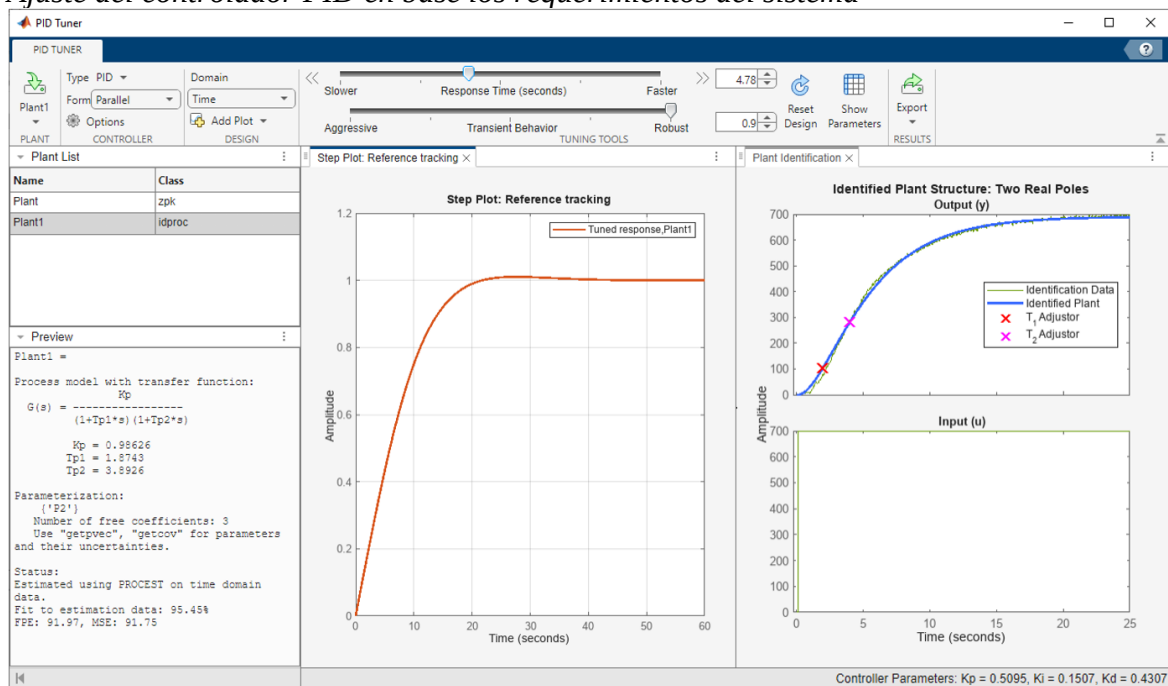


Nota. Elaboración Propia

Entonces, a partir de los valores obtenidos con la herramienta PID Tuner, el modelo del sistema que representa al transportador de cadena, tendrá la forma:

$$G_p = \frac{0.98626}{(1 + 1.8743 \cdot s)(1 + 3.8926 \cdot s)}$$

La herramienta PID Tuner también nos permite diseñar el controlador PID directamente según los requerimientos del sistema. Podemos ajustar parámetros críticos como el tiempo de respuesta y el comportamiento transitorio para optimizar el rendimiento del controlador. En la Figura 65, se observa el ajuste del controlador PID, donde la respuesta ajustada (línea naranja) sigue de cerca la referencia.

Figura 65
Ajuste del controlador PID en base los requerimientos del sistema


Nota. Elaboración Propia

7. Diseño del modelo de referencia

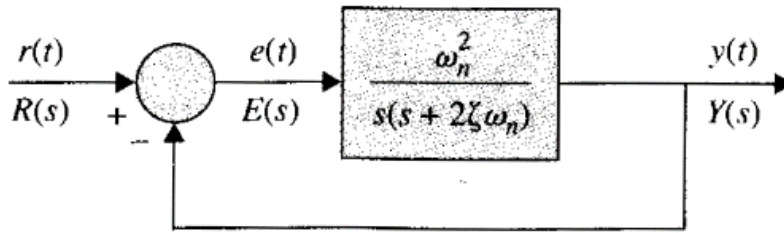
En “Sistemas de control automático” de Benjamin C. Kuo (1996), la función de transferencia de un sistema de segundo orden con realimentación unitaria es como se muestra en la Figura 65, donde la función de transferencia del sistema se expresa como:

$$\frac{\omega_n^2}{s(s + 2\zeta\omega_n)}$$

En la Figura 65, $r(t)$ es la señal de referencia, $e(t)$ es la señal de error, y $y(t)$ es la salida del sistema. La función de transferencia en el dominio de Laplace se representa como $Y(s)/R(s)$, indicando la relación entre la salida y la entrada del sistema. Este sistema de segundo orden es caracterizado por la frecuencia natural (ω_n) y el coeficiente de amortiguamiento (ζ), que determinan la respuesta dinámica del sistema.

Figura 66

Función de transferencia de un sistema de segundo orden



Nota. Tomado del libro “Sistemas de control automático”. Fuente (Kuo, 1996).

Función de transferencia de un sistema de segundo orden es:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Entonces, las raíces se pueden expresar como:

$$s_1, s_2 = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$s_1, s_2 = -\alpha \pm j\omega$$

Donde:

$$\alpha = \zeta\omega_n$$

$$\omega = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$$

- α controla el amortiguamiento y se conoce como el factor de amortiguamiento real y su inversa es proporcional a la constante de tiempo del sistema.
- ζ es el factor de amortiguamiento relativo y ω_n es la frecuencia natural no amortiguada.

El tiempo de establecimiento de un sistema, es el tiempo que tarda el sistema en alcanzar o permanecer dentro de cierto porcentaje del valor final (5%). Se utilizó este tiempo para diseñar el modelo de referencia del controlador MRAC, para esto se toma la siguiente aproximación (para valores de ζ mayores a 0.69):

$$t_s = \frac{4.5\zeta}{\omega_n}$$

Ya que se requiere que el sistema no tenga un sobre impulso, se escogerá un $\zeta > 1$, de esta manera obtenemos polos reales negativos y distintos, con esto el sistema se considera sobre amortiguado.

Para determinar el tiempo de establecimiento se consideró que el arranque del transportador debe de ser suave, para minimizar el esfuerzo mecánico sobre los componentes, además de que, con un sistema sobre amortiguado, se simula una rampa de aceleración en forma de “s” lo que permite una aceleración y desaceleración progresiva y suave, lo que permite manejar una carga inercial alta.

Entonces, se considera que el transportador debe tener un tiempo de establecimiento de 30 segundos ($t_s = 30$) y $\zeta = 1.01$, con esto calculamos la frecuencia natural del sistema:

$$t_s = \frac{4.5 \cdot \zeta}{\omega_n}$$

$$\omega_n = \frac{4.5 \cdot 1.01}{30}$$

$$\omega_n = 0.1515$$

Con este valor, el modelo de referencia diseñado tendrá la forma:

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$

$$G_m(s) = \frac{0.02295}{s^2 + 0.306s + 0.02295}$$

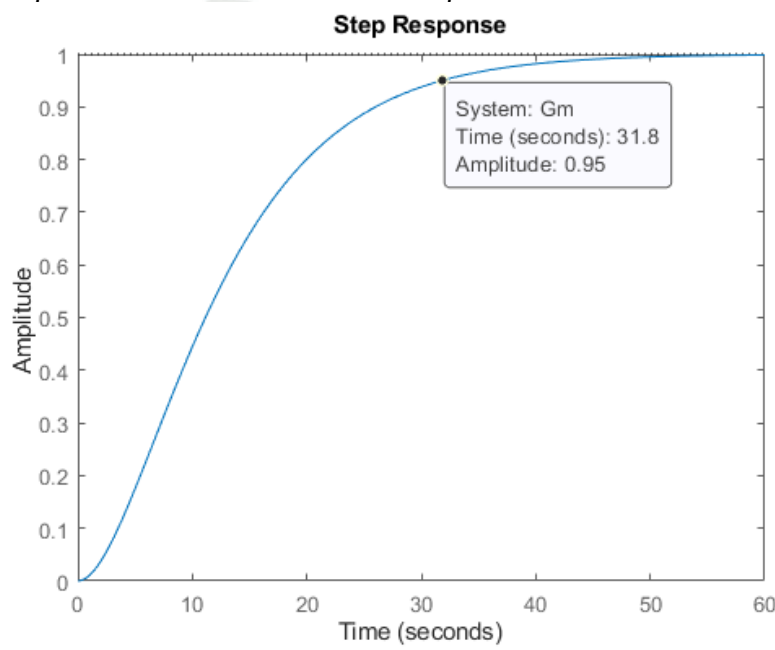
Para verificar la respuesta del modelo de referencia diseñado, ejecutamos el siguiente código en Matlab:

```
ts=30;
E=1.01;
Wn=(4.5*E)/(ts);
Gm=tf(Wn^2,[1 2*E*Wn Wn^2]);
[z,p,k]=tf2zp(Wn^2,[1 2*E*Wn Wn^2]);
step(Gm)
```

La respuesta al escalón (Ver Figura 66), muestra cómo el sistema responde a una entrada que cambia instantáneamente de 0 a 1. Con un factor de amortiguamiento de 1.01, el sistema es sobre amortiguado, lo que significa que no oscilará y alcanzará el estado estacionario sin sobrepasarse. Se observa que alcanza el 95% del valor del escalón unitario, en un tiempo de 31.8 segundos, con lo que se comprueba el correcto diseño del modelo de referencia.

Figura 67

Respuesta escalón del modelo de referencia diseñado



Nota. Elaboración Propia

El modelo de referencia también se puede descomponer en dos sistemas de primer orden, donde cada uno da lugar a una respuesta exponencial, con constantes de tiempo diferentes, entonces el modelo de referencia se puede expresar como:

$$Gm(s) = \frac{0.02295}{(s + 0.1745)(s + 0.1315)}$$

$$Gm(s) = \frac{1}{(1 + 7.6s)(1 + 5.7333s)}$$

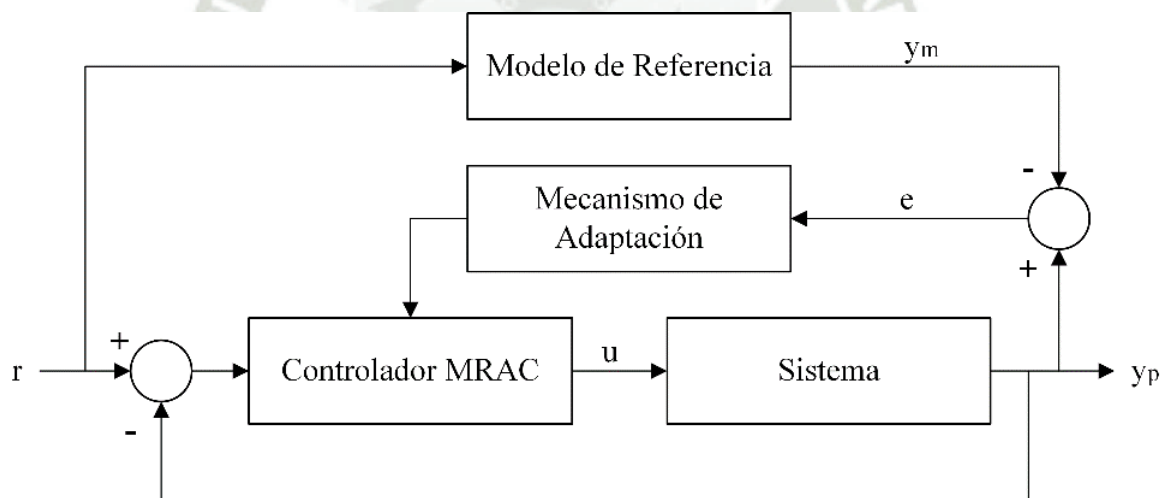
8. Diseño del controlador MRAC

El siguiente diagrama de bloques ilustra la estructura de un controlador MRAC (Model Reference Adaptive Control). En este esquema, la señal de referencia (r) se compara con la salida del sistema (y_p) para generar una señal de error (e). Este error es utilizado por el mecanismo de adaptación para ajustar el controlador MRAC, que a su vez genera la señal de control (u) para el sistema.

El modelo de referencia produce una salida (y_m) que se utiliza como estándar deseado para el sistema. El objetivo del controlador MRAC es minimizar la diferencia entre la salida del modelo de referencia (y_m) y la salida del sistema (y_p), logrando así una adaptación óptima del sistema a las condiciones cambiantes.

Figura 68

Diagrama de bloques del controlador MRAC



Nota. Elaboración Propia

Donde:

r : Señal de referencia

u : Señal de control

y_p : Salida del sistema

y_m : Salida del modelo de referencia

e : Señal de error

Para el control adaptativo basado en modelo (MRAC), consideramos el sistema y el modelo de referencia con las siguientes funciones de transferencia y ecuaciones diferenciales:

Función de transferencia del sistema a controlar:

$$G_p(s) = \frac{Y_p(s)}{U(s)} = \frac{B}{s^2 + A_1 \cdot s + A_2}$$

Como ecuación diferencial:

$$\ddot{y}_p + A_1 \cdot \dot{y}_p + A_2 \cdot y_p = B \cdot u$$

Función de transferencia del modelo de referencia:

$$G_m(s) = \frac{Y_m(s)}{R(s)} = \frac{B_m}{s^2 + A_{m1} \cdot s + A_{m2}}$$

Como ecuación diferencial:

$$\ddot{y}_m + A_{m1} \cdot \dot{y}_m + A_{m2} \cdot y_m = B_m \cdot r$$

La señal de error es:

$$e = y_p - y_m$$

$$\dot{e} = \dot{y}_p - \dot{y}_m$$

$$\ddot{e} = \ddot{y}_p - \ddot{y}_m$$

Con condiciones iniciales igual de cero.

Para un sistema de segundo orden tomamos la siguiente ley de adaptación (García Jaimes, 2009).

$$u = f \cdot r - \theta_0 \cdot \dot{y}_p - \theta_1 \cdot y_p$$

Donde f , θ_0 y θ_1 son las ganancias adaptativas.

Entonces, remplazamos la ley de control en la ecuación diferencial del sistema:

$$\ddot{y}_p + A_1 \cdot \dot{y}_p + A_2 \cdot y_p = B \cdot u$$

$$\ddot{y}_p + A_1 \cdot \dot{y}_p + A_2 \cdot y_p = B \cdot (f \cdot r - \theta_0 \cdot \dot{y}_p - \theta_1 \cdot y_p)$$

Simplificando:

$$\ddot{y}_p = B \cdot f \cdot r - (A_1 + B \cdot \theta_0) \cdot \dot{y}_p - (A_2 + B \cdot \theta_1) \cdot y_p$$

$$\ddot{y}_m = B_m \cdot r - A_{m1} \cdot \dot{y}_m - A_{m2} \cdot y_m$$

Remplazamos en la ecuación del error:

$$\ddot{e} = B \cdot f \cdot r - (A_1 + B \cdot \theta_0) \cdot \dot{y}_p - (A_2 + B \cdot \theta_1) \cdot y_p - B_m \cdot r + A_{m1} \cdot \dot{y}_m + A_{m2} \cdot y_m$$

$$\ddot{e} + (A_1 + B \cdot \theta_0) \cdot \dot{y}_p - A_{m1} \cdot \dot{y}_m + (A_2 + B \cdot \theta_1) \cdot y_p - A_{m2} \cdot y_m = (B \cdot f - B_m) \cdot r$$

Se establecen los siguientes parámetros:

$$\beta = B \cdot f - B_m$$

$$\dot{\beta} = B \cdot \dot{f}$$

$$\alpha_1 = A_1 + B \cdot \theta_0 - A_{m1}$$

$$\dot{\alpha}_1 = B \cdot \dot{\theta}_0$$

$$\alpha_2 = A_2 + B \cdot \theta_1 - A_{m2}$$

$$\dot{\alpha}_2 = B \cdot \dot{\theta}_1$$

Remplazando estos parámetros en la ecuación del error, obtenemos:

$$\ddot{e} + (\alpha_1 + A_{m1}) \cdot \dot{y}_p - A_{m1} \cdot \dot{y}_m + (\alpha_2 + A_{m2}) \cdot y_p - A_{m2} \cdot y_m = \beta \cdot r$$

Ordenando los términos:

$$\ddot{e} + A_{m1} \cdot (\dot{y}_p - \dot{y}_m) + A_{m2} \cdot (y_p - y_m) = \beta \cdot r - \alpha_1 \cdot \dot{y}_p - \alpha_2 \cdot y_p$$

$$\ddot{e} + A_{m1} \cdot \dot{e} + A_{m2} \cdot e = \beta \cdot r - \alpha_1 \cdot \dot{y}_p - \alpha_2 \cdot y_p$$

Se define la siguiente función de Lyapunov:

$$V = A_{m2} \cdot e^2 + \dot{e}^2 + \frac{1}{\gamma_0} \cdot \beta^2 + \frac{1}{\gamma_1} \cdot \alpha_1^2 + \frac{1}{\gamma_2} \cdot \alpha_2^2$$

$\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$: son constantes positivas

La derivada de la función de Lyapunov es:

$$\dot{V} = 2A_{m2} \cdot e \cdot \dot{e} + 2\dot{e} \cdot \ddot{e} + \frac{2}{\gamma_0} \cdot \beta \cdot \dot{\beta} + \frac{2}{\gamma_1} \cdot \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1 + \frac{2}{\gamma_2} \cdot \alpha_2 \cdot \dot{\alpha}_2$$

Remplazamos la doble derivada del error:

$$\begin{aligned} \dot{V} = 2A_{m2} \cdot e \cdot \dot{e} + 2\dot{e} \cdot (-A_{m1} \cdot \dot{e} - A_{m2} \cdot e + \beta \cdot r - \alpha_1 \cdot \dot{y}_p - \alpha_2 \cdot y_p) + \frac{2}{\gamma_0} \cdot \beta \cdot \dot{\beta} + \frac{2}{\gamma_1} \\ \cdot \alpha_1 \cdot \dot{\alpha}_1 + \frac{2}{\gamma_2} \cdot \alpha_2 \cdot \dot{\alpha}_2 \end{aligned}$$

Simplificando:

$$\dot{V} = -2A_{m1} \cdot \dot{e}^2 + 2\beta \left(\dot{e} \cdot r + \frac{1}{\gamma_0} \cdot \dot{\beta} \right) + 2\alpha_1 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_1} \cdot \dot{\alpha}_1 - \dot{e} \cdot \dot{y}_p \right) + 2\alpha_2 \cdot \left(\frac{1}{\gamma_2} \cdot \dot{\alpha}_2 - \dot{e} \cdot y_p \right)$$

Para asegurar que la derivada de la función de Lyapunov sea negativa se debe de cumplir que:

$$\dot{e} \cdot r + \frac{1}{\gamma_0} \cdot \dot{\beta} = 0$$

$$\frac{1}{\gamma_1} \cdot \dot{\alpha}_1 - \dot{e} \cdot \dot{y}_p = 0$$

$$\frac{1}{\gamma_2} \cdot \dot{\alpha}_2 - \dot{e} \cdot y_p = 0$$

Despejando los parámetros:

$$\dot{\beta} = -\gamma_0 \cdot \dot{e} \cdot r$$

$$\dot{\alpha}_1 = \gamma_1 \cdot \dot{e} \cdot \dot{y}_p$$

$$\dot{\alpha}_2 = \gamma_2 \cdot \dot{e} \cdot y_p$$

Entonces, remplazamos estos valores en las derivadas de los parámetros que se desarrollaron anteriormente:

$$\dot{\beta} = B \cdot \dot{f}$$

$$\dot{\alpha}_1 = B \cdot \dot{\theta}_0$$

$$\dot{\alpha}_2 = B \cdot \dot{\theta}_1$$

Con esto se obtiene:

$$\dot{f} = -\frac{\gamma_0}{B} \cdot \dot{e} \cdot r$$

$$\dot{\theta}_0 = \frac{\gamma_1}{B} \cdot \dot{e} \cdot \dot{y}_p$$

$$\dot{\theta}_1 = \frac{\gamma_2}{B} \cdot \dot{e} \cdot y_p$$

Despejamos las ganancias adaptativas, aplicando la integral:

$$f = -\frac{\gamma_0}{B} \int \dot{e} \cdot r \, dt$$

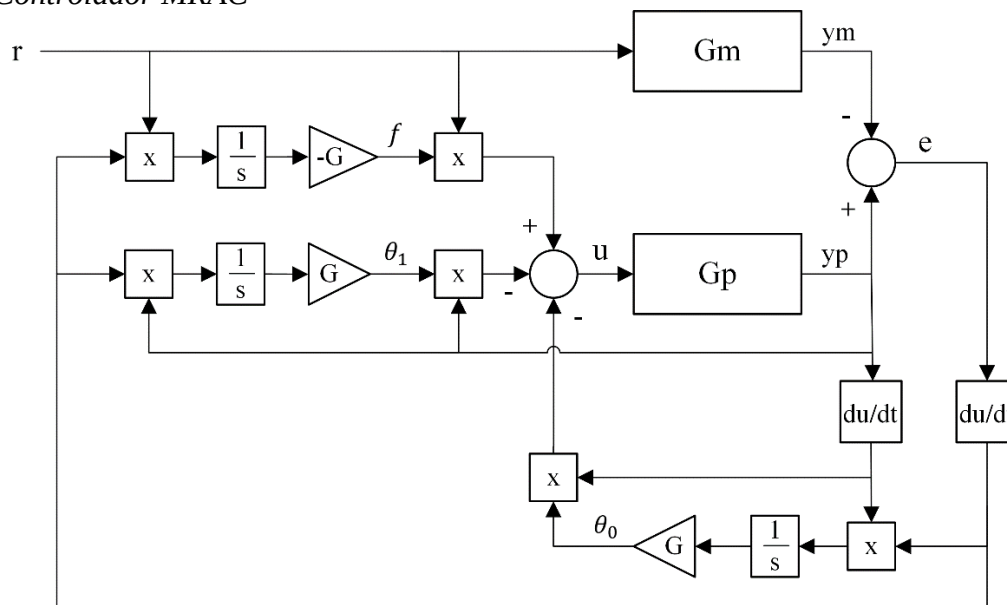
$$\theta_0 = \frac{\gamma_1}{B} \int \dot{e} \cdot \dot{y}_p \, dt$$

$$\theta_1 = \frac{\gamma_2}{B} \int \dot{e} \cdot y_p \, dt$$

Con condiciones iniciales igual a cero.

El siguiente diagrama de bloques (Ver Figura 68) muestra la implementación del controlador MRAC. Este controlador utiliza un modelo de referencia (G_m) para comparar su salida (y_m) con la salida del sistema real (y_p). La diferencia entre estas salidas genera una señal de error (e), que se utiliza para ajustar las ganancias adaptativas f, θ_0 y θ_1 a través de integradores y derivadores.

Figura 69
Controlador MRAC



Nota. Elaboración Propia

a) Componentes y flujo del diagrama:

- **Señal de referencia (r):** La entrada deseada para el sistema.
- **Modelo de referencia (G_m):** Genera la salida de referencia (y_m).
- **Sistema a controlar (G_p):** El proceso real cuya salida es y_p .
- **Error (e):** Diferencia entre la salida del modelo de referencia (y_m) y la salida del sistema (y_p).
- **Controlador MRAC:** Ajusta la señal de control (u) para minimizar el error.

b) Ley de adaptación:

- **Ganancia f :** Ajustada mediante la señal de error y la derivada de la señal de referencia.
- **Ganancia θ_0 :** Ajustada mediante la señal de error y la derivada de la salida del sistema.
- **Ganancia θ_1 :** Ajustada mediante la señal de error y la salida del sistema.

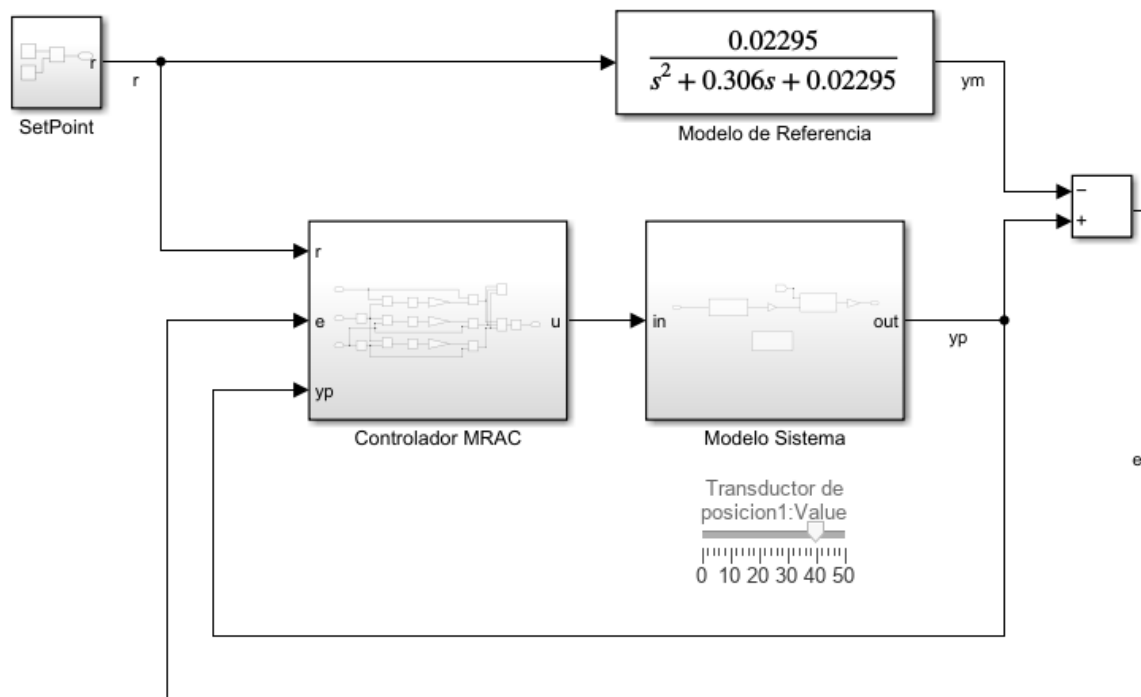
El objetivo del controlador MRAC es minimizar el error e , ajustando dinámicamente las ganancias adaptativas para que la salida del sistema (y_p) siga de cerca la salida del modelo de referencia (y_m), logrando así una mejor respuesta del sistema bajo condiciones variables.

9. Implementación del sistema en Simulink

Se desarrolló la simulación del sistema completo en Simulink, como se detalla en la Figura 69, se creó un bloque llamado “Modelo Sistema” el cual representa al transportador de cadena y la medición de flujo másico, también se creó el bloque de “Controlador MRAC” el cual contiene la implementación del controlador. A continuación, se describe el desarrollo de cada bloque.

Figura 70

Simulación del modelo de sistema y el controlador MRAC



Nota. Elaboración Propia

- **SetPoint (r):** Es la señal de referencia deseada.
- **Modelo de Referencia:** Tiene una función de transferencia de $\frac{0.02295}{s^2 + 0.306s + 0.02295}$, que define la dinámica deseada del sistema.
- **Modelo del Sistema:** Representa el sistema real a controlar, cuya salida es y_p .
- **Controlador MRAC:** Ajusta la señal de control (u) basándose en la señal de error (e) para minimizarla.
- **Error (e):** Es la diferencia entre la salida del modelo de referencia (y_m) y la salida del sistema (y_p).

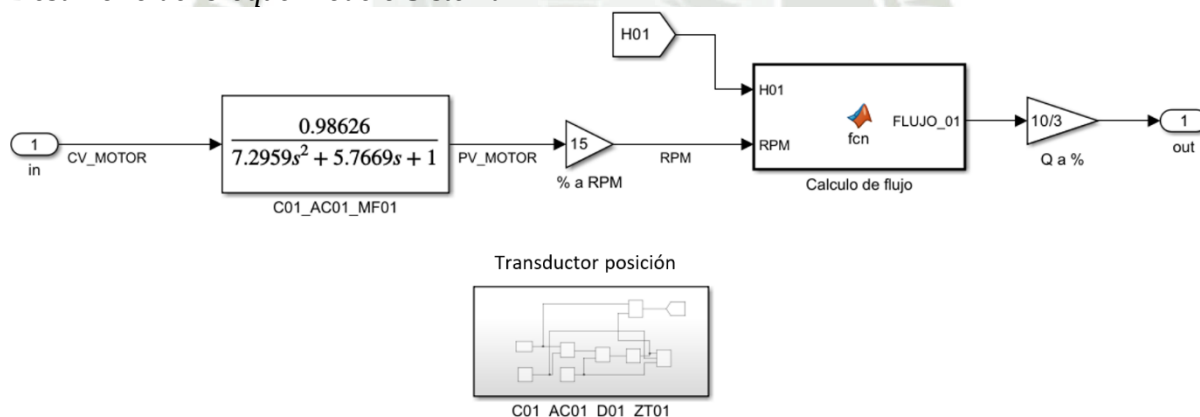
9.1 Bloque: Modelo Sistema

En el bloque “Modelo Sistema” se introdujo la función de transferencia que se obtuvo en la identificación del modelo con la herramienta de Matlab, esta función de transferencia describe el comportamiento del transportador de cadena (C01_AC01_MF01), bloque tiene como entrada la señal de mando al motor del transportador (CV_MOTOR) en un porcentaje de 0 a 100, a la salida de la función de transferencia se realiza el cambio a unidades de ingeniería de porcentaje a RPM.

Las RPM representa el valor que brinda el encoder del motor, este valor ingresa al bloque “Cálculo de flujo”, en donde se determina el valor de flujo másico en función de la velocidad del motor (RPM) y el valor del transductor de posición que detecta la altura de cama (H01), finalmente a la salida del bloque “Calculo de flujo”, se convierte este valor de T/h a porcentaje.

Figura 71

Desarrollo del bloque Modelo Sistema



Nota. Elaboración Propia

9.2 Bloque: Cálculo de flujo

El código mostrado a continuación, está desarrollado en una función de Matlab llamada FLUJO_01, en donde se realiza el cálculo del flujo másico a partir de las medidas de los elementos que se utilizan para la medición de la altura de cama que se forma en el transportador de cadena, aquí se calcula en área de sección transversal (Area_01) y con la velocidad del motor (RPM) se calcula el flujo másico en T/h. El desarrollo teórico de estos cálculos se mostró en el apartado 4.5.

```

function FLUJO_01 = fcn(H01,RPM)
    % Inicialización de variables y constantes
    Area_01 = 0;
    R01 = 55;
    L01 = 150;

    % Cálculo del coseno del ángulo de la lámina de detección
    COS_PHI_01 = ((2*R01*R01) - 2*R01*(R01 + L01) + (H01*H01) + 2*R01*L01)
    / (2*R01*(R01 + L01 - H01));

    % Definición de la banda muerta y zona de medición
    BM01 = 93; % Banda muerta en mm
    ZM01 = 100; % Zona de medición en mm

    % Cálculo de la altura de la cama de carbón
    Altura_cama_01 = BM01 + ZM01 * (1 - COS_PHI_01);

    % Conversión de alturas y distancias a metros
    Base01 = 0.92; % Base del transportador en metros
    a01 = BM01 / 1000; % Altura donde no detecta el transductor en metros
    b01 = 0.022; % en metros
    d01 = a01 + b01; % Altura en el área rectangular en metros
    c01 = 0.078; % en metros (y01)
    x01 = 0.13; % Distancia del formador de cama

    % Conversión de altura de la cama a metros
    Altura01 = Altura_cama_01 / 1000; % en metros
    tng_theta = tan(c01 / x01);

    % Cálculo del área en función de la altura de la cama
    if Altura01 <= a01
        Area_01 = Base01 * a01;
    elseif Altura01 > a01 && Altura01 <= d01
        Area_01 = Base01 * Altura01;
    elseif Altura01 > d01
        Area_01 = Base01 * Altura01 - 2 * ((Altura01 - d01) * (Altura01 -
d01) / (2 * tng_theta));
    else
        Area_01 = 0; % Caso por defecto (aunque no debería alcanzarse)
    end

    % Cálculo del flujo másico
    k01 = 0.0000342; % Coeficiente de conversión de RPM a m/s
    Densidad = 1190; % Densidad del carbón en kg/m^3, dato de laboratorio

    % Cálculo del flujo másico en kg/s
    FLUJO_01 = RPM * k01 * Densidad * Area_01;

    % Conversión de flujo másico a toneladas por hora (Tn/h)
    FLUJO_01 = FLUJO_01 * 3.6; % en Tn/h
end

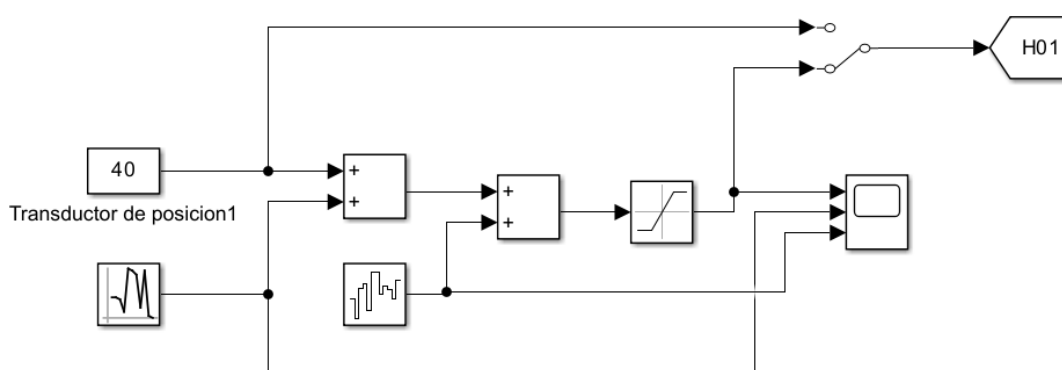
```

9.3 Bloque: Transductor de posición

Este bloque representa el transductor de posición (C01_AC01_D01_ZT01), que emula el comportamiento del sensor de posición magnetostrictivo a través de variaciones aleatorias dentro de un rango determinado. Como entrada, puede ingresar el valor de la posición del sensor en un rango de 0 a 50 mm, esto se puede realizar desde un Slider que se encuentra en la pantalla principal, y a la salida del bloque (H01) se introduce ruido y variaciones en la señal, simulando condiciones reales de operación del sensor.

Figura 72

Simulación de transductor de posición

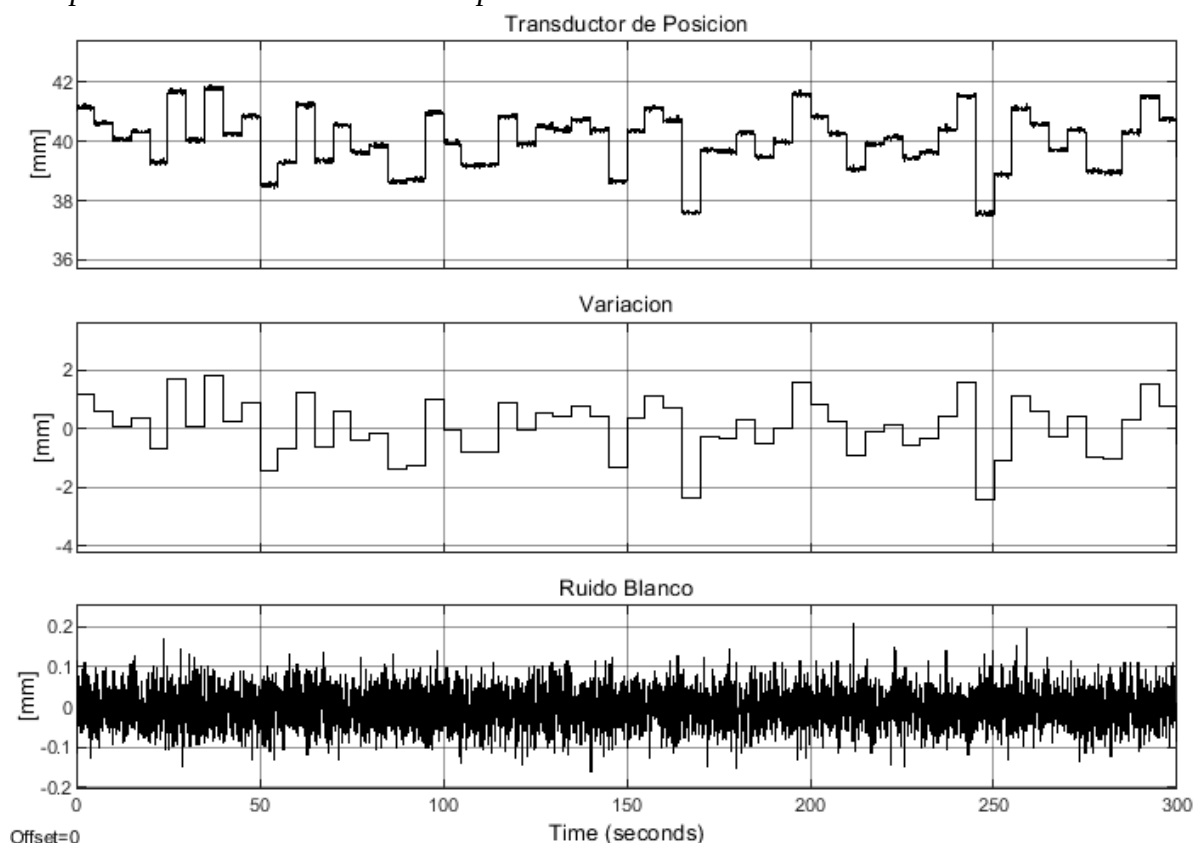


Nota. Elaboración Propia

La Figura 72 muestra tres gráficos que detallan el comportamiento del transductor de posición a lo largo del tiempo:

- **Transductor de Posición:** Este gráfico muestra la señal del transductor de posición en milímetros (mm) a lo largo del tiempo (segundos). La señal presenta fluctuaciones debido a las variaciones aleatorias introducidas. Las variaciones reflejan el comportamiento típico del sensor en un entorno real, donde se producen cambios debido a las condiciones del sistema y el entorno.
- **Variación:** Este gráfico presenta las variaciones de la señal del transductor de posición, mostrando las diferencias entre valores consecutivos. Las variaciones simulan los cambios en la altura de la cama de carbón.

- **Ruido Blanco:** El gráfico inferior muestra el ruido blanco. Este es un tipo de ruido aleatorio que tiene una distribución de energía constante en todas las frecuencias. Este gráfico muestra cómo el ruido afecta la señal del sensor, introduciendo pequeñas perturbaciones que pueden influir en la precisión de la medición.

Figura 73*Comportamiento del transductor de posición**Nota. Elaboración Propia*

El propósito de estas simulaciones es entender cómo las variaciones y el ruido afectan las lecturas del transductor de posición. En un entorno real, los sensores no son perfectos y están sujetos a perturbaciones y ruido. Los gráficos de la Figura 72 muestran cómo estos factores influyen en la señal del sensor y cómo se comporta el sistema bajo estas condiciones.

Además, con esta simulación se intenta replicar los cambios que podría presentar el transductor de posición ante las variaciones de la altura del carbón debido a sus características físicas.

9.4 Bloque: Controlador MRAC

En el bloque “Controlador MRAC” se realiza el cálculo de la señal de control “ u ” a través de las ganancias adaptativas f , θ_0 y θ_1 . Este bloque tiene como variables de entrada; la señal “ r ” que es el setpoint, “ e ” que es el error ($y_p - y_m$) y la señal de realimentación de la planta (y_p). La salida del bloque es la señal de control “ u ” la cual está limitada por un bloque de 0 a 100%. El desarrollo teórico de este bloque se encuentra detallado en el apartado 4.8.

La siguiente figura muestra el desarrollo de la ley de adaptación:

$$u = f \cdot r - \theta_0 \cdot \dot{y}_p - \theta_1 \cdot y_p$$

A través del cálculo de las ganancias adaptativas:

$$f = -\frac{\gamma_0}{B} \int \dot{e} \cdot r \, dt$$

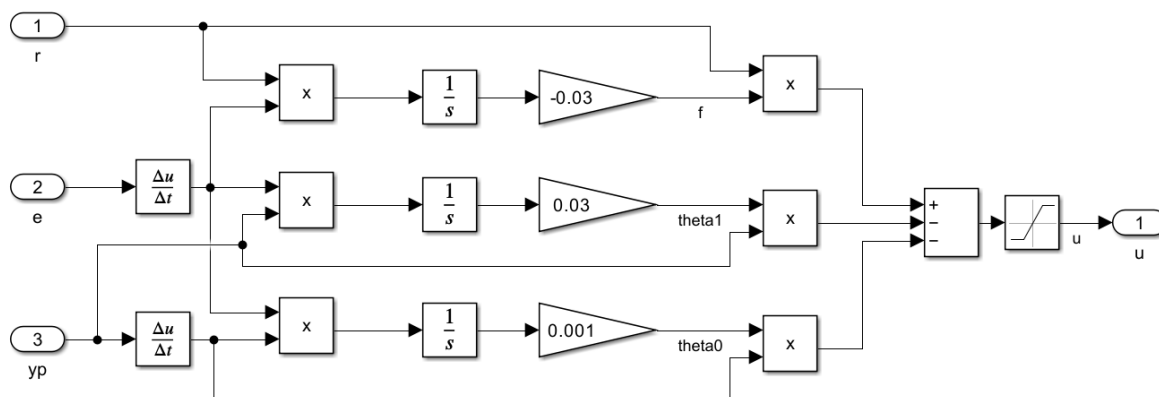
$$\theta_0 = \frac{\gamma_1}{B} \int \dot{e} \cdot \dot{y}_p \, dt$$

$$\theta_1 = \frac{\gamma_2}{B} \int \dot{e} \cdot y_p \, dt$$

La siguiente figura muestra la implementación del controlador MRAC en Simulink, de acuerdo con el desarrollo teórico realizado en la Figura 68.

Figura 74

Desarrollo del bloque MRAC



Nota. Elaboración Propia

10. Implementación en Studio 5000

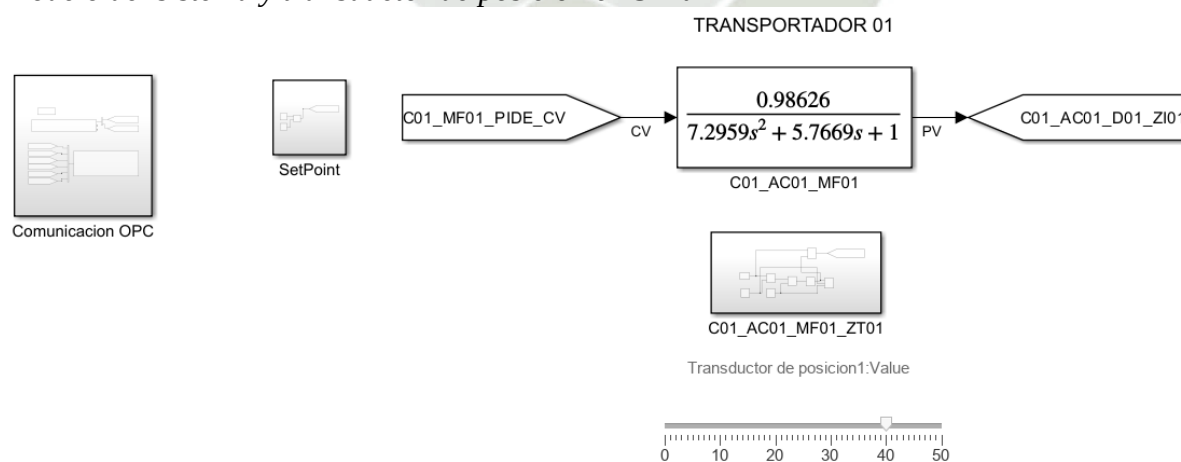
Para la simulación de este proyecto se utilizó un controlador de Rockwell Automation modelo 1756-L75 con revisión 32.011, el mismo que se planea instalar en la industria. La simulación del controlador se realizó utilizando el software Studio 5000 Logix Emulate V32.00, y la programación se efectuó en Studio 5000 Logix Designer V32.00.

El controlador MRAC se ejecuta en el controlador simulado y la implementación de la función de transferencia del transportador se realizó en Simulink. La siguiente figura muestra los bloques utilizados en Simulink que permite simular el proceso y la comunicación OPC entre Simulink y Logix Emulate, la entrada del sistema es la señal de control para el motor del transportador, que representa la señal que envía el variador de frecuencia al motor, mientras que la salida es la respuesta en velocidad del motor, esta señal representa al encoder del motor (C01_AC01_D01_ZI01).

Además, se simuló el transductor de posición, siguiendo el desarrollo descrito en el punto anterior. Esta simulación permite evaluar y ajustar el comportamiento del sistema antes de su implementación en la industria, garantizando su eficacia y eficiencia.

Figura 75

Modelo del sistema y transductor de posición en Simulink



Nota. Elaboración Propia

Para realizar la comunicación entre Simulink y Logix Emulate, se utilizó RSLinx como servidor OPC. La Figura 75 ilustra cómo se establece este enlace de comunicación, permitiendo la integración de las herramientas de simulación y control.

Figura 76
Enlace de comunicación OPC
Cliente



Nota. Elaboración Propia

10.1 Configuración de Cliente OPC

Para establecer y gestionar la comunicación entre Simulink y Logix Emulate, se crea un bloque de comunicación OPC en Simulink y se configura como cliente. La Figura 76 muestra la ventana de configuración del bloque OPC, donde se definen las opciones de control en tiempo real, los clientes OPC a utilizar y el comportamiento ante errores y eventos OPC.

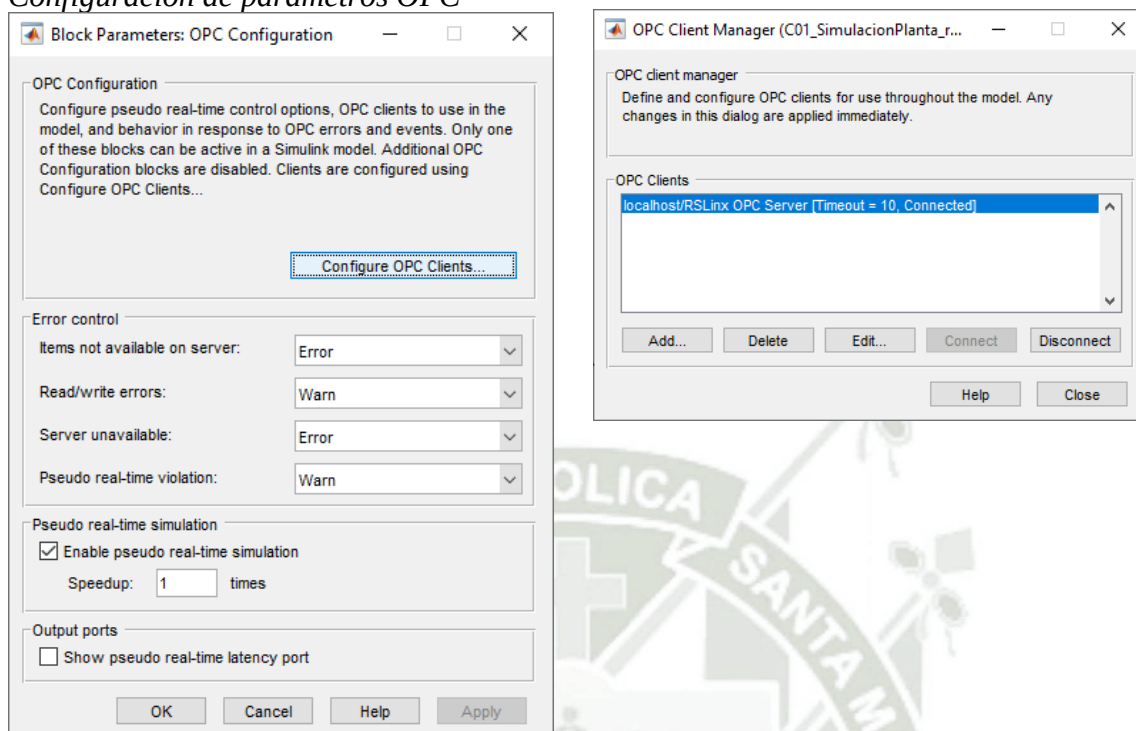
Para la configuración de parámetros se selecciona el botón “Configure OPC Clients” para definir los clientes OPC que se utilizarán en Simulink. Esta configuración permite que el bloque OPC actúe como un cliente, estableciendo una conexión con el servidor OPC (RSLinx).

La opción “OPC Client Manager” de Simulink permite la configuración de gestión de clientes OPC, donde se define y configura el cliente OPC que se utilizará en el modelo. En la Figura 76, se puede apreciar que se ha configurado un cliente OPC, “localhost/RSLinx OPC Server”, con un estado de “Connected” y un tiempo de espera de 10 segundos. Esto indica que la conexión entre Simulink y el servidor OPC de RSLinx se ha establecido correctamente y está operativa.

De esta manera podemos escribir y leer datos desde el servidor OPC, además, se configura un tiempo de muestreo de 100ms para la lectura y escritura de datos, los datos que se leen y se escriben se encuentran en el bloque “Comunicación OPC”, es en este bloque donde se direccionan las etiquetas utilizadas en Simulink con los TAG que se encuentran en el servidor y son utilizadas por el controlador simulado.

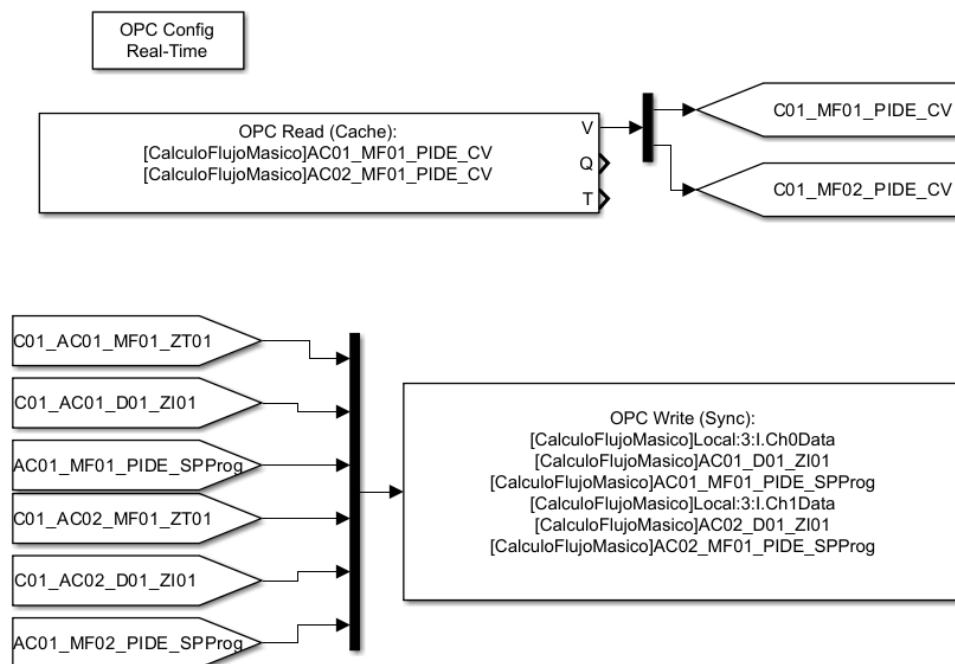
La Figura 77 muestra el contenido del bloque “Comunicación OPC”, donde se encuentran las etiquetas utilizadas en Simulink.

Figura 77
Configuración de parámetros OPC



Nota. Elaboración Propia

Figura 78
Desarrollo de bloque Comunicación OPC



Nota. Elaboración Propia

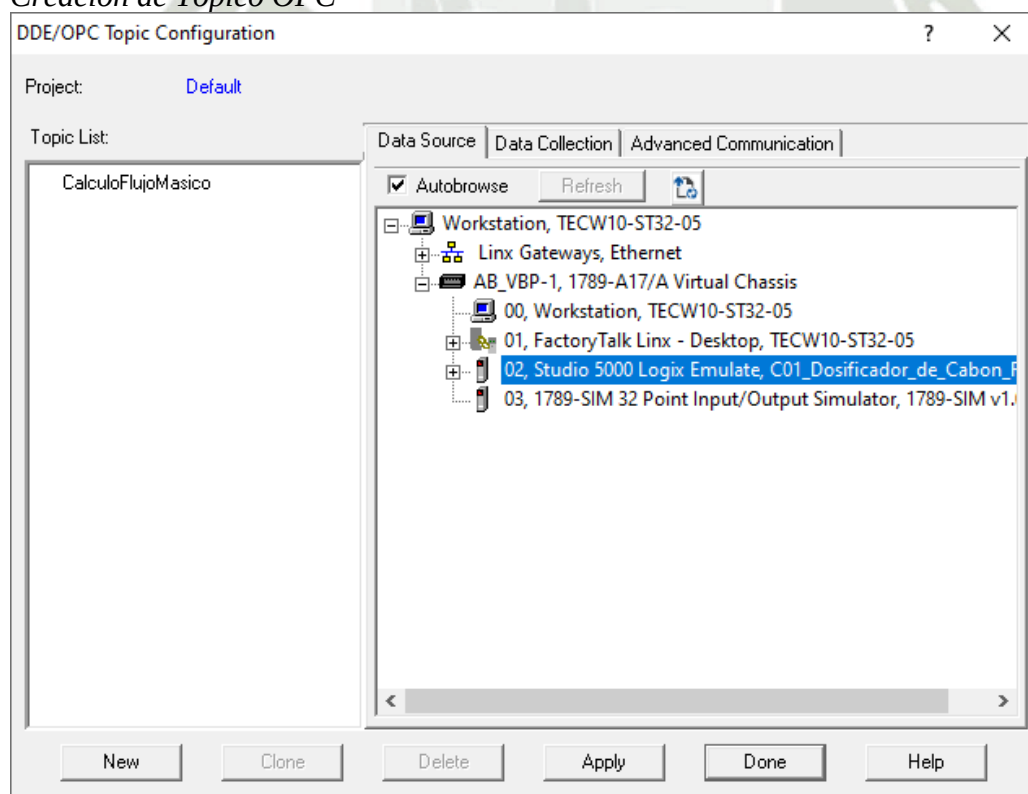
10.2 Configuración de Servidor OPC

Desde RSLinx se realiza la configuración del servidor OPC, en el menú “DDE/OPC”, se selecciona la opción “Topic Configuration” (Configuración de tópico) y se crea un nuevo tópico OPC, los tópicos son puntos de referencia que dirigen al servidor hacia una ruta de comunicación específica.

Aquí se asigna un nombre descriptivo al nuevo tópico, para este caso: “Calculo Flujo Másico”, lo cual facilita su identificación. Después se selecciona el controlador deseado en la estructura de “RSWho”, que en este caso es un controlador simulado que se encuentra en el slot 02 del “Virtual Chassis”, con esto se asocia el tópico con el controlador específico. Finalmente se hace clic en "Apply" y luego en "Done" para guardar el tópico OPC.

La siguiente figura muestra la pantalla donde se realiza la configuración del tópico OPC.

Figura 79
Creación de Tópico OPC



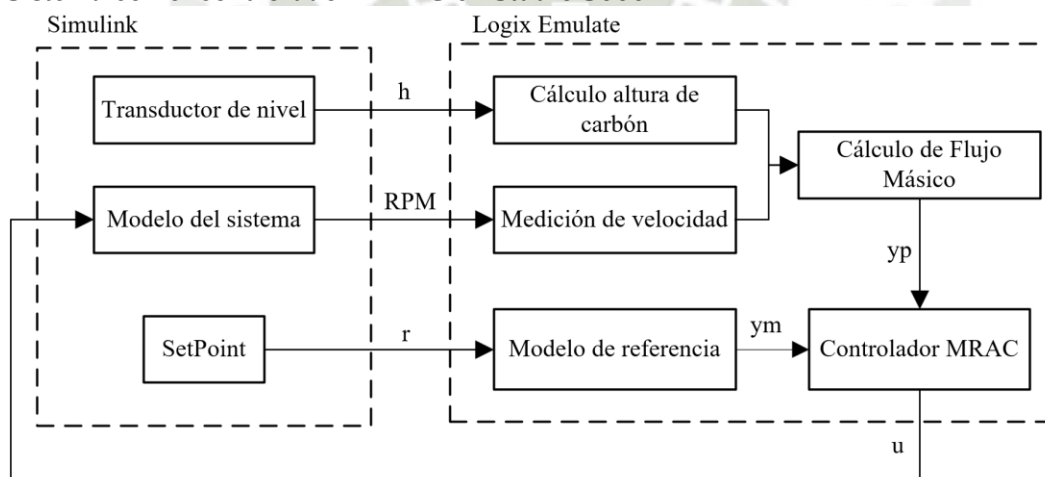
Nota. Elaboración Propia

10.3 Programación en Studio 5000 Logix Designer

Se realizó la programación en Logix Designer para obtener la respuesta del sistema con el controlador MRAC. La Figura 79 muestra un sistema que integra Simulink y Logix Emulate para implementar y controlar un modelo de referencia adaptativo (MRAC). En Simulink, se encuentran el transductor de nivel, el modelo del sistema y el setpoint. Estos componentes generan y envían señales de control y simulación. Logix Emulate, por otro lado, se encarga del cálculo de la altura de la cama de carbón y el cálculo del flujo másico. Además, incluye el modelo de referencia y el controlador MRAC.

Figura 80

Sistema con el controlador MRAC en Studio 5000



Nota. Elaboración Propia

El transductor de nivel mide la altura de la cama de carbón, que se utiliza para calcular el flujo másico. El modelo del sistema representa al transportador de cadena y el modelo de referencia genera la salida ideal del sistema, y el controlador MRAC ajusta la señal de control para minimizar el error entre la salida real y la ideal. Este sistema integrado permite una simulación y control precisos del transportador de cadena, asegurando un rendimiento óptimo y una respuesta adecuada a las variaciones en las condiciones del sistema.

La Figura 80 muestra las subrutinas que se utilizaron en el programa principal para realizar el cálculo y control del flujo másico utilizando un bloque PIDE y el control MRAC. En el Anexo 04 se desarrolla la programación completa de cada una de estas subrutinas, siguiendo el desarrollo teórico de los puntos anteriores.

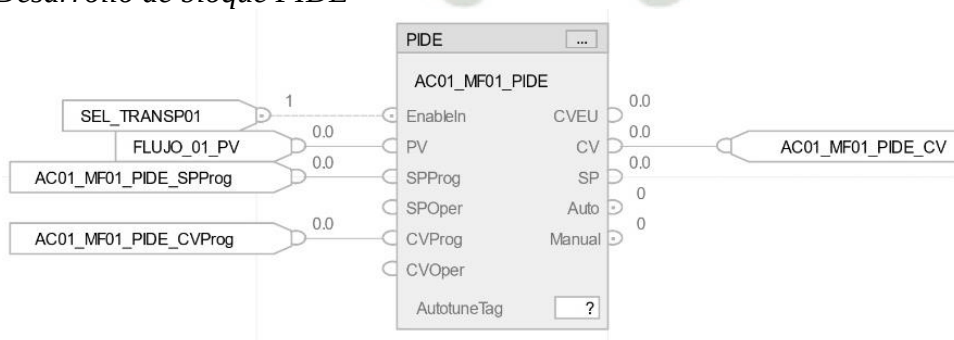
Figura 81
Subrutinas del programa principal


Nota. Elaboración Propia

10.3.1 Controlador MRAC en Studio 5000

Para el control MRAC, se creó una tarea periódica (Periodic Task), esta tarea, a diferencia del programa principal, se ejecuta en intervalos de tiempo predefinidos, para este caso se programó en 100ms, esto permite que el controlador ejecute la tarea de manera repetitiva y precisa, manteniendo un ciclo de actualización constante.

Dentro de la tarea periódica se utilizó el bloque PIDE (PID Enhanced), el cual es una versión avanzada del bloque PID estándar, este bloque está orientado a sistemas que requieren un control avanzado gracias a sus características mejoradas y opciones adicionales de configuración. Las ganancias programadas para este controlador son; $P = 0.5$. $I = 0.1$ y $D = 0.0001$.

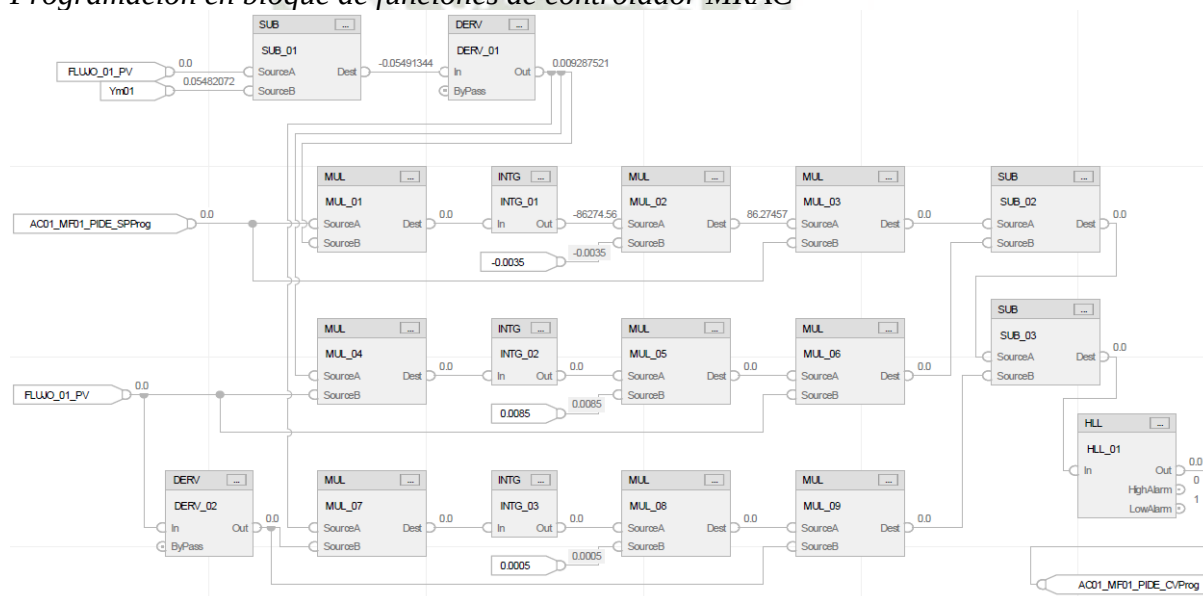
Figura 82
Desarrollo de bloque PIDE


Nota. Elaboración Propia

SPProg representa el valor del setpoint programado, este es el valor objetivo o deseado para la variable de proceso (PV) que el sistema debe alcanzar. En este caso el setpoint es establecido desde Simulink. CVProg representa el valor de la variable de control programada. La CV es la salida del controlador PIDE y se utiliza para manipular un actuador, el CVProg se establece mediante la lógica de control y se puede usar para forzar un valor específico en la salida de control del PIDE. En este caso la CVProg tomará el valor de la salida del controlador MRAC. Siguiendo el esquema de la Figura 73, se realizó la programación en bloque de funciones del controlador MRAC en Studio 5000 Logix Designer.

Figura 83

Programación en bloque de funciones de controlador MRAC



Nota. Elaboración Propia

El ajuste de las ganancias adaptativas es $f = -0.0035$, $\theta_0 = 0.0085$, $\theta_1 = 0.005$, con lo que se minimiza el error entre el sistema y el modelo de referencia, de esta manera el sistema se adapta automáticamente.

10.3.2 Modelo de referencia en Studio 5000

Para la programación del modelo de referencia en Studio 5000 Logix Designer se utilizó el bloque “LDLG” (Lead-Lag), con el cual representaremos el comportamiento deseado del sistema. Este bloque permite ajustar un adelanto y un retraso de fase par una señal de entrada, a través de la siguiente ecuación:

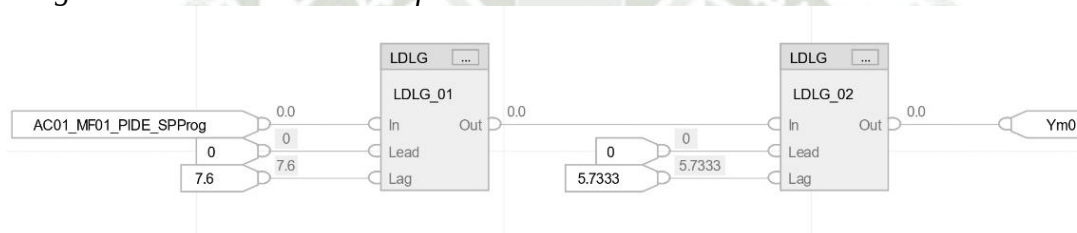
$$H(s) = \left[\frac{1 + Lead * s}{1 + Lag * s} \right]$$

Entonces, para representar nuestro modelo de referencia de segundo orden, se utilizaron dos bloques “LDLG” conectados en serie, seguidamente configuramos el tiempo de avance (Lead) y el tiempo de retraso (Lag) según lo desarrollado en el apartado 4.7. La Figura 83 muestra los bloques “LDLG” con los cuales obtenemos la respuesta deseada del sistema.

$$Gm(s) = \frac{1}{(1 + 7.6s)(1 + 5.7333s)}$$

Figura 84

Programación del modelo de referencia en Studio 5000



Nota. Elaboración Propia

10.4 Diseño de HMI en FactoryTalk View

La Figura 84 muestra la implementación del HMI en FactoryTalk View Site Edition, para el monitoreo del flujo másico de carbón que ingresa al molino. Este sistema permite visualizar en tiempo real diversos parámetros operativos, asegurando una gestión eficiente del proceso.

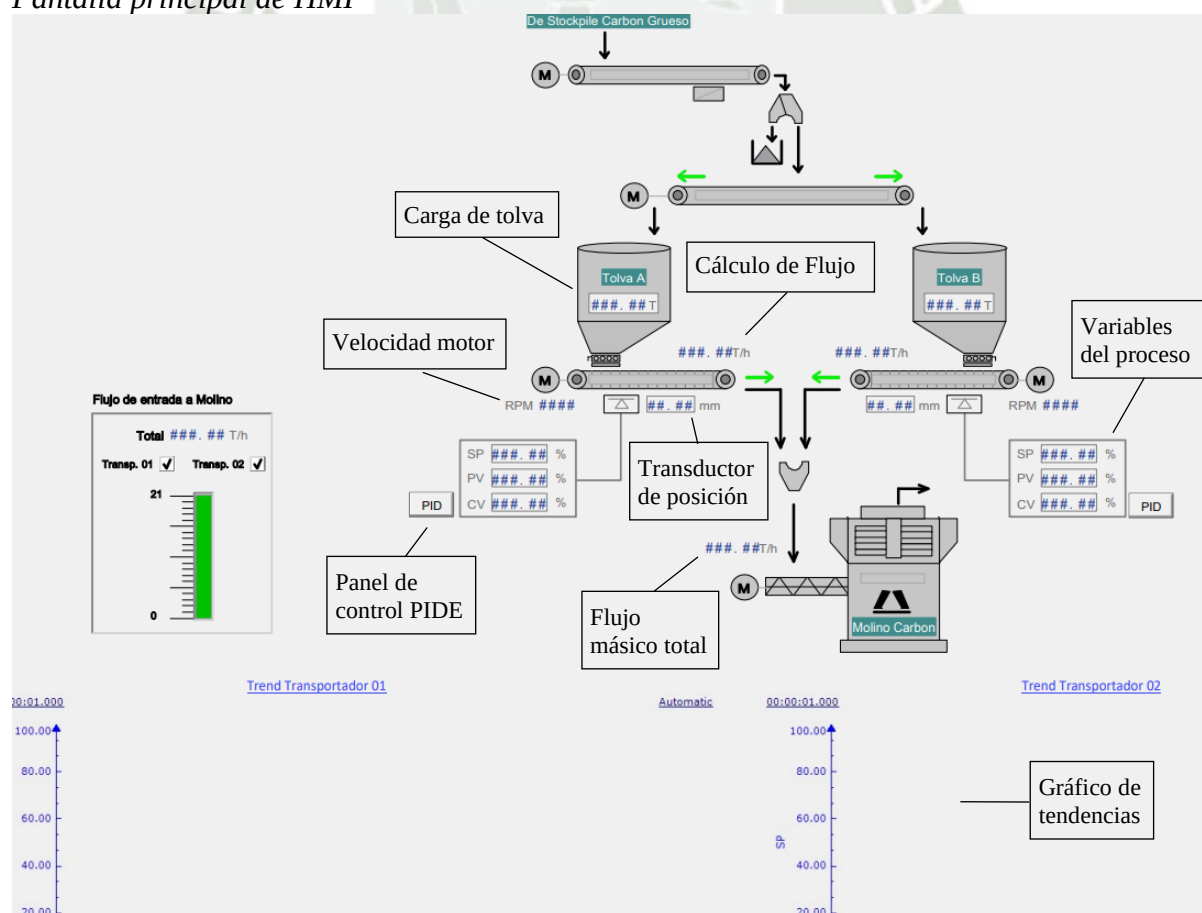
La pantalla principal se desarrolló siguiendo el diagrama de flujo del proceso, mostrado en la Figura 35. El diseño de la pantalla HMI inicia con la representación del sistema de transporte, esto inicia desde la descarga de stockpile de carbón hasta el molino, esto permite al operador de sala de control entender la secuencia de operación del sistema.

La interfaz indica el estado de cada elemento del sistema, el verde indica operación activa, mientras que el gris representa estado inactivo, los motores están simbolizados por la letra M y las flechas indican la dirección del flujo del carbón en el proceso.

La pantalla muestra puntos relevantes del sistema, como la carga actual de las tolvas A y B en toneladas, la velocidad de los transportadores de cadena (en RPM), el desplazamiento medido por el transductor de posición (en mm) y el flujo másico calculado por el controlador (en T/h). En la parte izquierda, se presenta un medidor gráfico del "Flujo de entrada a Molino", que combina las mediciones de los transportadores 01 y 02. Esto permite al operador seleccionar uno o ambos transportadores de cadena para que alimenten al molino, de esta manera se tiene un control sobre la alimentación y permite observar el flujo real de carbón en tiempo real.

En la parte inferior de la pantalla, se encuentran dos gráficos de tendencias, etiquetados como "Trend Transportador 01 y 02". Estos gráficos muestran el comportamiento del sistema a lo largo del tiempo, permitiendo la comparación entre el setpoint (SP) y el valor de proceso (PV), los gráficos incluyen opciones de ajuste automático para visualizar el rendimiento en distintos periodos de tiempo.

Figura 85
Pantalla principal de HMI



Nota. Elaboración Propia

El panel de control del bloque PIDE se despliega haciendo clic en el botón PID, este “faceplate” proporciona una interfaz estandarizada para la supervisión y ajuste del controlador PIDE que se utilizó en Studio 5000 Logix Designer. La Figura 85 muestra los parámetros principales del lazo PID:

- SP (Setpoint): El valor objetivo al cual se desea llegar.
- PV (Process Variable): El valor actual de la variable de proceso, que se compara con el SP para determinar el error del sistema.
- CV (Control Variable): La señal de salida generada por el controlador, que se envía al actuador.

La pantalla permite alternar entre los modos de control Automático y Manual:

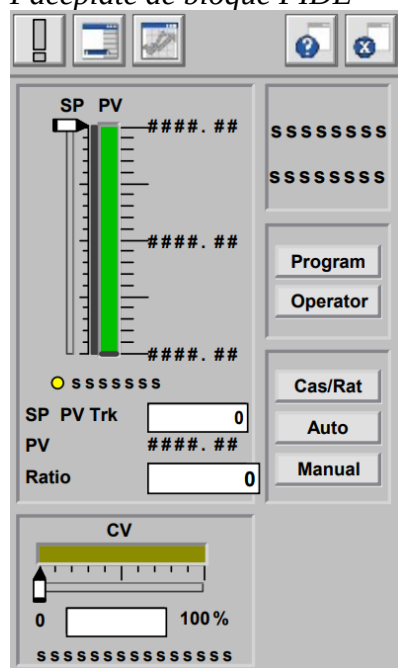
- Modo Automático: El PID ajusta el CV automáticamente para minimizar el error entre el SP y el PV.
- Modo Manual: El operador tiene control directo sobre el CV, permitiendo ajustes específicos que pueden ser útiles en casos de prueba o calibración.

Además, en se incluye los modos de operación Program y Operator:

- Modo Program: Permite que la salida CV tome el valor de CVProg, lo cual significa que el controlador MRAC tomará el control sobre el sistema.
- Modo Operator: El bloque PIDE tomará control directo sobre el proceso.

Figura 86

Faceplate de bloque PIDE



Nota. Elaboración Propia

CAPÍTULO V: PRUEBAS Y RESULTADOS

1. Simulación de controlador MRAC y PID en Simulink

1.1 Sintonización de controlador MRAC

La sintonización del controlador MRAC, se realizó con una serie de pruebas en las que se varió el coeficiente de cada ganancia adaptativa mientras se mantenían constantes las otras dos, en estas pruebas se mantiene constante el valor del transductor de posición, con el objetivo de encontrar el valor óptimo de cada ganancia que permita al sistema responder de manera estable y precisa.

1.2 Variación de ganancia adaptativa f

Se inicio con la ganancia adaptativa f , la Tabla 7 muestra las pruebas realizadas en donde se mantiene constante el setpoint y las otras ganancias adaptativas.

Tabla 8

Pruebas con variación de ganancia adaptativa f

Prueba	Setpoint	Ganancia f	Ganancia θ_1	Ganancia θ_0
1	100	-0.001	0.001	0.001
2	100	-0.003	0.001	0.001
3	100	-0.03	0.001	0.001
4	100	-0.1	0.001	0.001

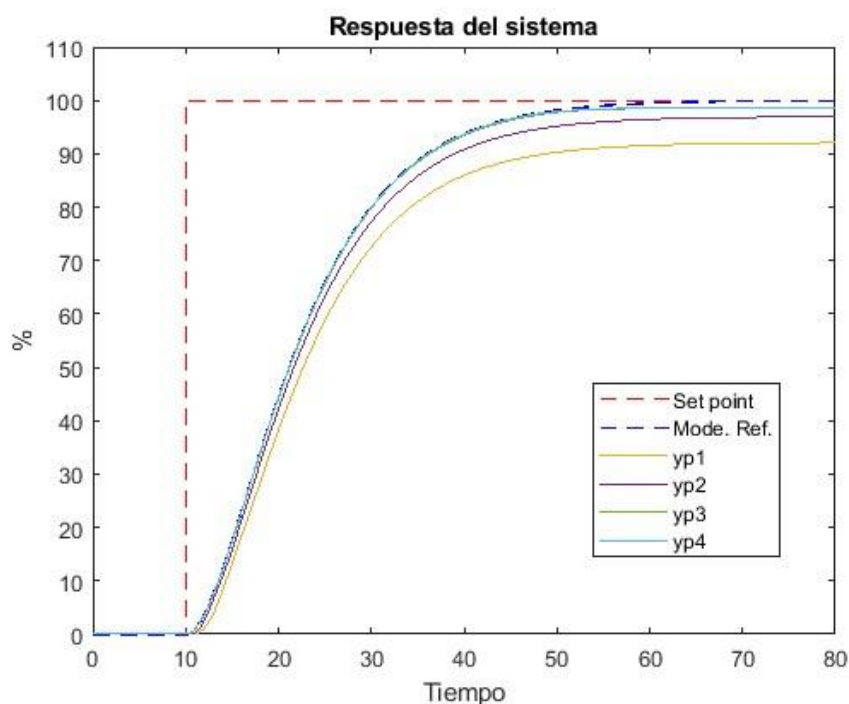
Nota. Elaboración Propia

La Figura 86 muestra la respuesta del sistema ante las variaciones de la ganancia adaptativa f , el setpoint se mantiene constante al 100% y está representada por una línea de color roja discontinua. La repuesta del modelo de referencia está se ilustra de color azul discontinua y sirve como comparación para evaluar el comportamiento del controlador. Las respuestas de la planta estas representadas por y_p y el número de cada prueba.

La Figura 87 muestra cómo responde la variable de control (CV) ante las variaciones de la ganancia adaptativa f , esta variable es la señal que envía el controlador MRAC al actuador para ajustar la respuesta del sistema.

Figura 87

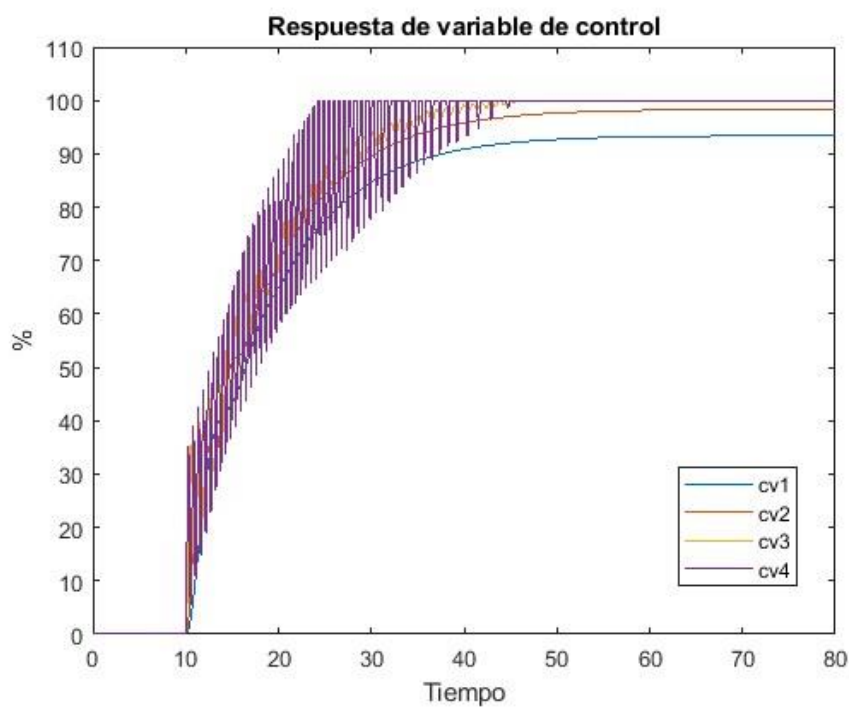
Respuesta de sistema ante variación de ganancia f



Nota. Elaboración Propia

Figura 88

Variable de control ante variación de ganancia f



Nota. Elaboración Propia

Comportamiento de la variación de ganancia adaptativa f

Al incrementar la ganancia adaptativa f , el sistema mejora su capacidad de seguimiento al modelo de referencia, reduciendo el error en estado estable y el tiempo de respuesta. Sin embargo, es importante notar que un valor excesivo de f genera una oscilación y un sobreajuste en la variable de control (CV), lo que no es adecuado para el actuador. Con esto se determinó que la prueba 3 tiene una mejor respuesta y no genera oscilaciones en la variable de control, con una ganancia adaptativa f igual a -0.03.

1.3 Variación de ganancia adaptativa θ_1

Tabla 9

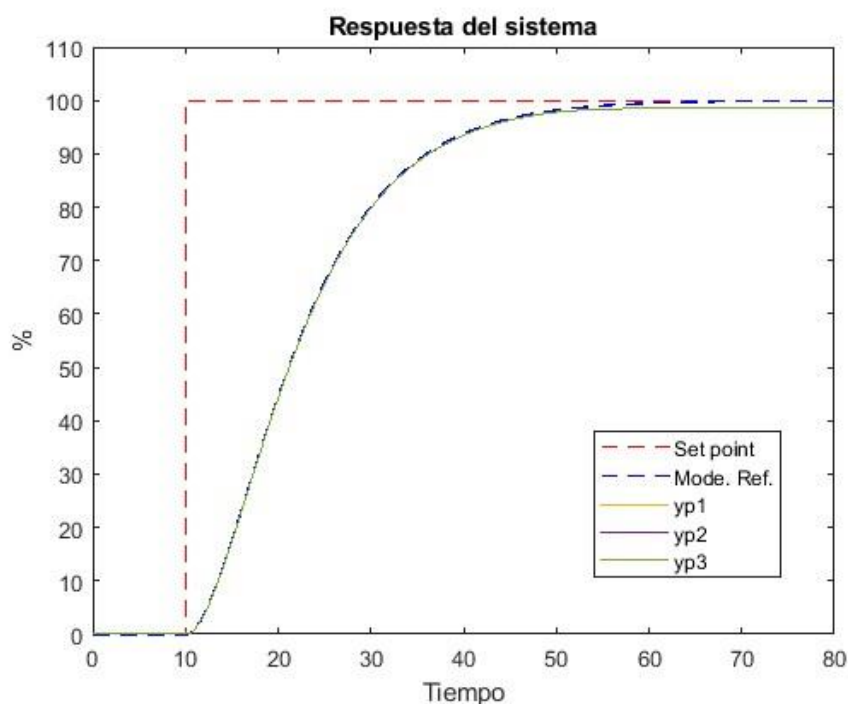
Pruebas con variación de ganancia adaptativa θ_1

Prueba	Setpoint	Ganancia f	Ganancia θ_1	Ganancia θ_0
1	100	-0.03	0.0008	0.001
2	100	-0.03	0.01	0.001
3	100	-0.03	0.03	0.001

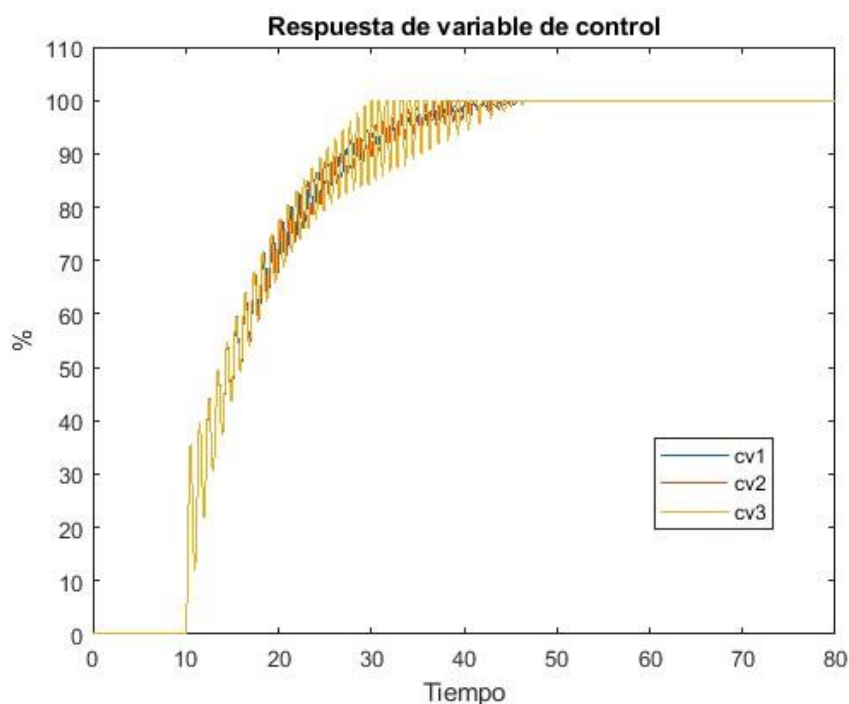
Nota. Elaboración Propia

Figura 89

Respuesta de sistema ante variación de ganancia θ_1



Nota. Elaboración Propia

Figura 90
Variable de control ante variación de ganancia θ_1


Nota. Elaboración Propia

Comportamiento de la variación de ganancia adaptativa θ_1

La variación de la ganancia adaptativa θ_1 no tiene repercusión en la respuesta del sistema ante la adecuada asignación de la ganancia adaptativa f , como se muestra en la Figura 88. Mientras que la variable de control (CV) si se ve afectada por la variación de esta ganancia, ya que a medida que aumenta se genera una respuesta oscilatoria, por lo que la prueba 1 representa la mejor opción con una ganancia θ_1 igual a 0.0008, ya que reduce las oscilaciones en la variable de control.

1.4 Variación de ganancia adaptativa θ_0

Tabla 10
Pruebas con variación de ganancia adaptativa θ_0

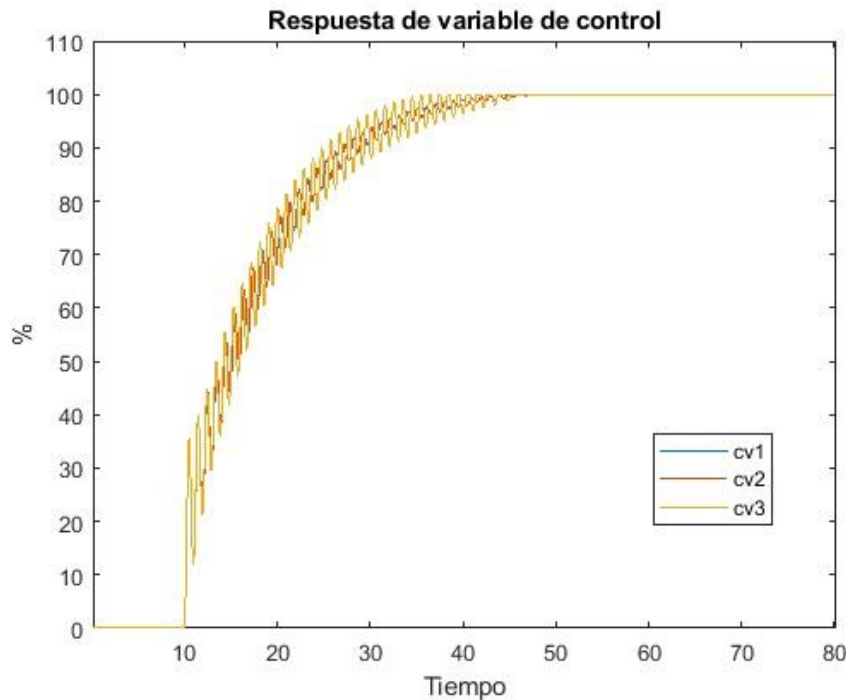
Prueba	Setpoint	Ganancia f	Ganancia θ_1	Ganancia θ_0
1	100	-0.03	0.0008	0.0001
2	100	-0.03	0.0008	0.01
3	100	-0.03	0.0008	1

Nota. Elaboración Propia

Ya que la respuesta del sistema es adecuada ante la asignación de la ganancia adaptativa f , se analizó el comportamiento de la respuesta de la variable de control, ante las variaciones de la ganancia adaptativa θ_0 .

Figura 91

Variable de control ante variación de ganancia θ_0



Nota. Elaboración Propia

Comportamiento de la variación de ganancia adaptativa θ_0

Al reducir la ganancia adaptativa θ_0 , la variable de control reduce sus oscilaciones, mientras que un valor demasiado alto causa una respuesta oscilatoria, sin embargo un valor demasiado bajo podría comprometer la respuesta del sistema por lo que se selecciona una ganancia adaptativa θ_0 igual a 0.001.

Entonces, tras las pruebas realizadas y el ajuste de las ganancias adaptativas, se identificaron los valores óptimos que permitieron mejorar el rendimiento del sistema. La Figura 91 muestra la prueba con un setpoint de 60% y las variaciones del transductor de posición que representan las condiciones reales del sistema.

El controlador MRAC mostró una respuesta estable siguiendo al modelo de referencia con las ganancias adaptativas:

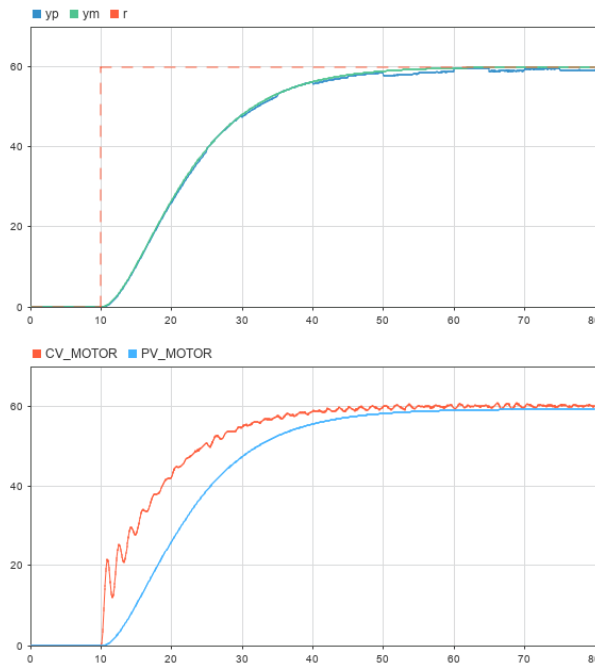
$$f = -0.03 \int \dot{e} \cdot r \, dt$$

$$\theta_0 = 0.0008 \int \dot{e} \cdot \dot{y}_p \, dt$$

$$\theta_1 = 0.001 \int \dot{e} \cdot y_p \, dt$$

Figura 92

Respuesta del sistema con MRAC



Nota. Elaboración Propia

Los resultados muestran que la salida del sistema (y_p) sigue de cerca la salida del modelo de referencia (y_m), indicando que el controlador MRAC está funcionando correctamente y ajustando la señal de control (u) para minimizar el error (e). Este comportamiento es consistente con los cálculos y las respuestas al escalón discutidas anteriormente.

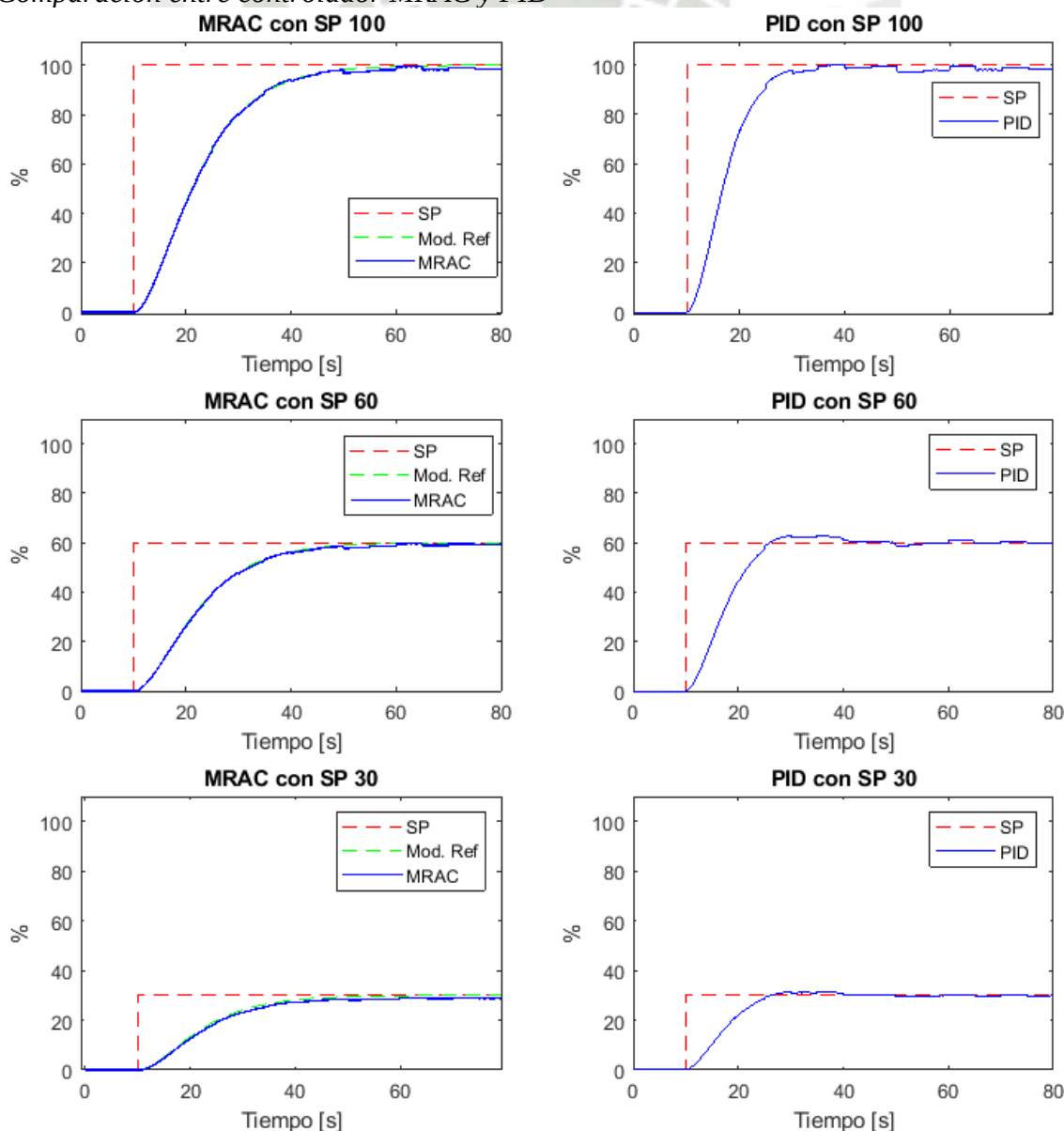
La señal de control (CV_MOTOR) sube rápidamente y la velocidad del motor (PV_MOTOR) responde con un aumento gradual, mostrando una dinámica típica de un sistema de segundo orden con cierta inercia. Las oscilaciones y fluctuaciones en la señal de control se traducen en variaciones en la velocidad del motor, indicando que el sistema está tratando de adaptarse rápidamente a los cambios en la demanda.

1.5 Comparación entre controlador MRAC y PID

Para la comparación entre el controlador MRAC y un controlador PID, se agregó el bloque PID en Simulink, el cual se configuró con los parámetros obtenidos por el PID Tuner de la Figura 65. EL controlador MRAC, se configuró con las ganancias adaptativas establecidas en el punto anterior. Para estas pruebas el transductor de posición presenta variaciones en el tiempo, lo que representa el comportamiento real del sistema. Se realizaron pruebas con tres niveles de setpoint diferente. La siguiente figura muestra la comparación entre los ambos controladores.

Figura 93

Comparación entre controlador MRAC y PID



Nota. Elaboración Propia

Tabla 11
Comparación de respuestas transitorias

Set Point = 100	MRAC	PID
Respuesta máxima	99.4491	100.0707
Sobre impulso [%]	0.0055	0.0007
Tiempo de establecimiento [s]	42.3509	26.6465
Set Point = 60	MRAC	PID
Respuesta máxima	59.6932	63.1463
Sobre impulso [%]	0.0051	0.0524
Tiempo de establecimiento [s]	42.3509	24.8500
Set Point = 30	MRAC	PID
Respuesta máxima	29.0516	31.5551
Sobre impulso [%]	0.0316	0.0518
Tiempo de establecimiento [s]	49.85	24.9

Nota. Elaboración Propia

Análisis de la comparación:

- El controlador MRAC muestra una respuesta alineada con el modelo de referencia en todos los setpoint. Esto indica que el MRAC es capaz de adaptarse a cambios en el setpoint de manera más dinámica y precisa. Mientras que el controlador PID presenta un sobre impulso ante el setpoint de 60% y 30%.
- En todos los casos, el tiempo de establecimiento del controlador PID es menor, lo que significa que el sistema alcanza la estabilidad más rápido. Esto es ventajoso en aplicaciones donde el tiempo de respuesta es crítico. Sin embargo para esta aplicación se busca un tiempo de establecimiento lento y una curva suave.
- Ambos controladores logran estabilidad final, pero el controlador MRAC muestra una mejor respuesta ante los cambios del transductor de posición, reducción el error del sistema.

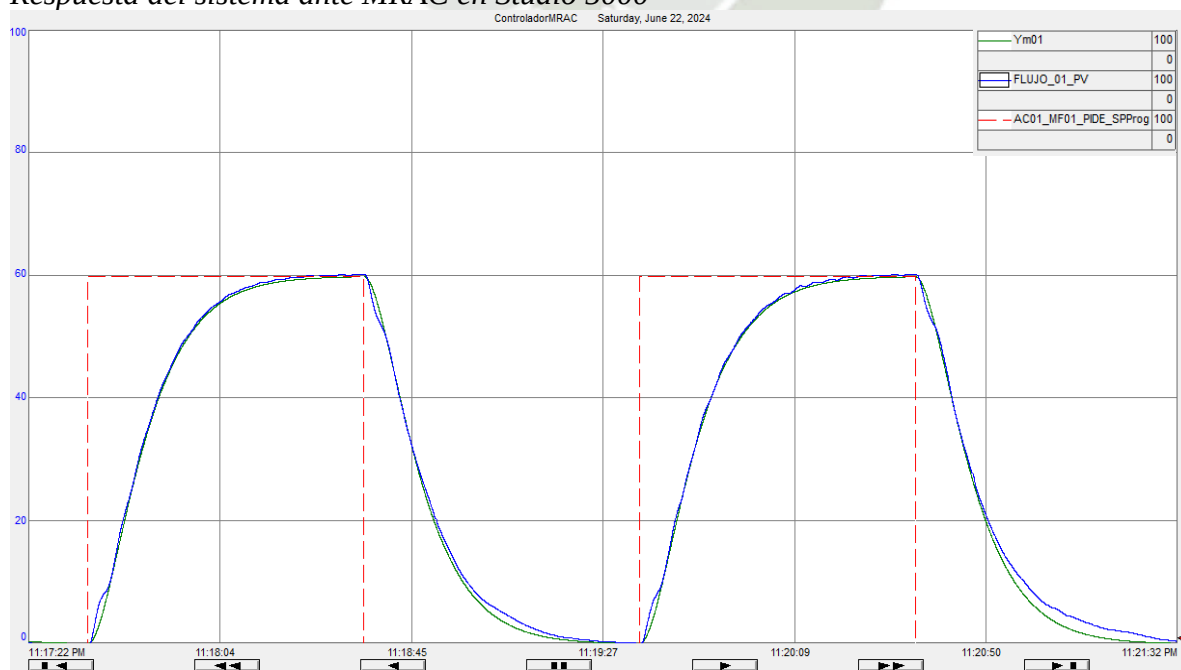
2. Simulación de controlador MRAC en Studio 5000

Para las pruebas del controlador MRAC implementado en Studio 5000, se estableció un setpoint de 60%, con el transductor de posición sin perturbaciones, para observar adecuadamente la respuesta del sistema. La Figura 93 fue tomada desde la interfaz de Studio 5000 la cual permite realizar un trend de señales establecidas, a continuación, se describen las características de la figura.

- El setpoint (línea roja) define los valores objetivo que el sistema debe alcanzar en términos de amplitud y tiempo. Este es el punto de referencia contra el cual se mide el desempeño del sistema controlado.
- La línea verde muestra cómo debería comportarse idealmente el sistema. El modelo de referencia proporciona una guía para el controlador MRAC, estableciendo un estándar de rendimiento que el sistema real debe intentar replicar.
- La línea azul representa la respuesta del sistema real cuando se aplica el controlador MRAC. El objetivo del controlador es ajustar la señal de control para minimizar la diferencia entre la respuesta del sistema real y la del modelo de referencia.

Figura 94

Respuesta del sistema ante MRAC en Studio 5000



Nota. Elaboración Propia

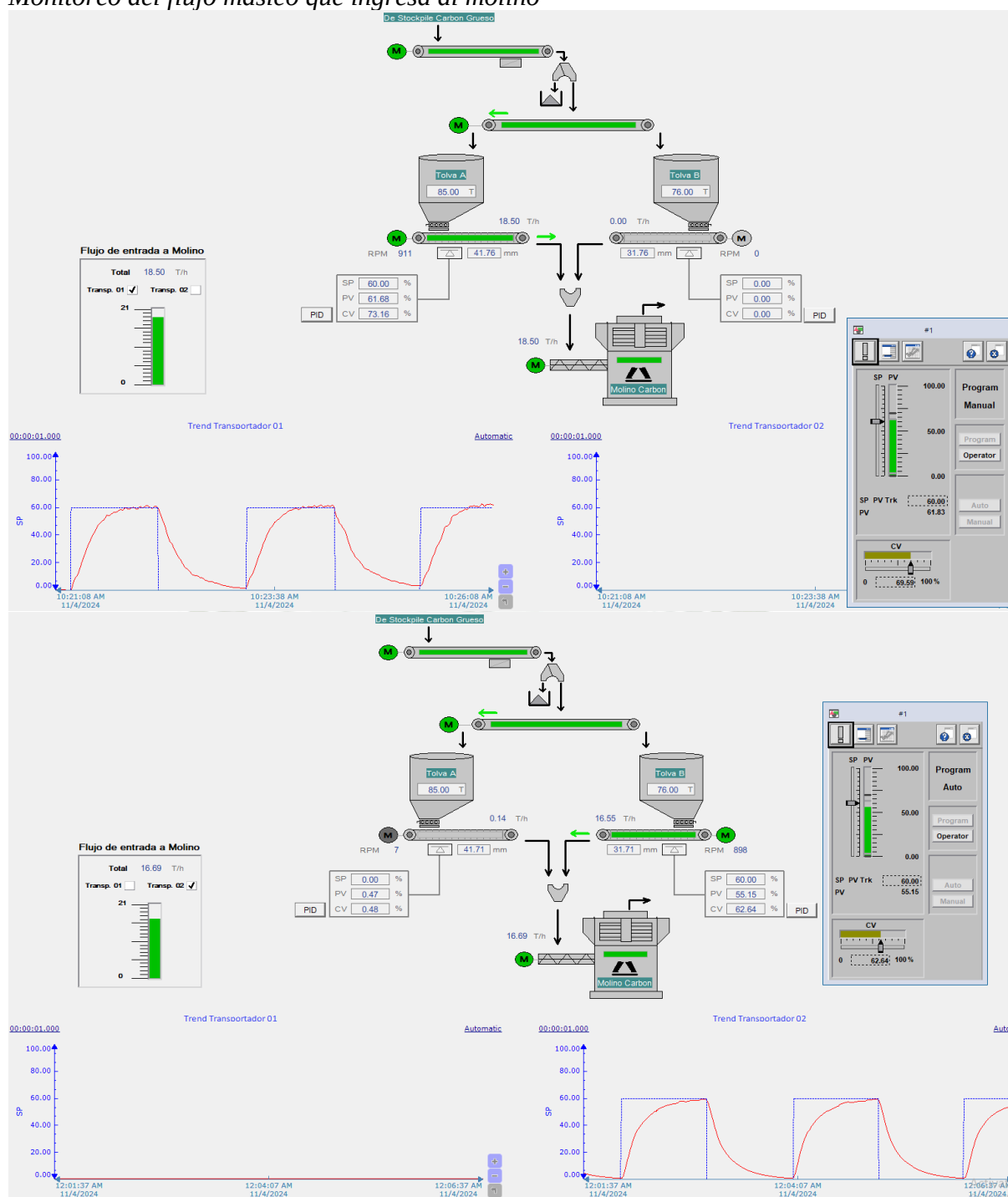
Análisis del comportamiento del sistema:

- La Figura 93 muestra que la respuesta del sistema real (azul) sigue muy de cerca la respuesta del modelo de referencia (verde), lo que indica que el controlador MRAC está funcionando correctamente y ajustando el sistema real para que se comporte de manera similar al modelo ideal.
- La proximidad entre las líneas azul y verde demuestra la precisión del controlador MRAC en la adaptación del sistema a los cambios en el setpoint. Esto sugiere que el controlador está realizando los ajustes necesarios en tiempo real para mantener el rendimiento deseado.
- La Figura 93 también permite observar el tiempo de respuesta del sistema y su estabilidad. La rapidez con que el sistema alcanza el setpoint y su capacidad para mantenerse estable sin oscilaciones excesivas son indicadores de un buen desempeño del controlador.

3. Monitoreo del sistema en HMI

A continuación, se muestran la pantalla implementada para el monitoreo del proceso, muestras las principales variables para el cálculo indirecto del flujo másico y su control.

Figura 95
Monitoreo del flujo másico que ingresa al molino



Nota. Elaboración Propia

En esta simulación se agregó las variaciones del transductor de posición para representar las variaciones reales que se presentan por las característica del material. Este sistema permite visualizar en tiempo real diversos parámetros operativos, asegurando una gestión eficiente del proceso.

- La gráfica de Tendencia del Transportador 01 muestra la respuesta del flujo de carbón con el controlador MRAC. Se puede observar que el sistema alcanza rápidamente el setpoint y mantiene el flujo de manera constante. Esto sugiere que el sistema de control adaptativo está funcionando de manera efectiva, ajustando las variables operativas para mantener el flujo deseado.
- Similar a la gráfica del transportador 01, se observa una estabilización del flujo de carbón en la gráfica de Tendencia del Transportador 02. Esta respuesta corresponde al controlador PID.
- En la pantalla de HMI, se muestra el flujo de entrada al molino en tiempo real. La visualización clara y precisa de las variables operativas, como la altura de la cama de carbón, la velocidad del transportador y el flujo másico, permite una monitorización efectiva y una rápida toma de decisiones.

La implementación del controlador MRAC y el uso de un HMI para el monitoreo en tiempo real en un entorno simulado han mejorado significativamente la precisión y eficiencia en las mediciones del flujo de carbón que ingresa al molino, considerando posibles errores acumulativos y variaciones en las condiciones de operación. Las gráficas de las tendencias del transportador de la Figura 94 muestran una respuesta rápida y estable a los cambios en el setpoint, lo que indica una mejora en la precisión del control. Además, la reducción de la intervención manual y la optimización del rendimiento contribuyen a una operación más eficiente y estable del sistema de molienda.

4. Resultados de la implementación

A continuación, se muestra la comparación del sistema realizado utilizando el controlador MRAC con el sistema manual que se tenía inicialmente.

Tabla 12
Sistema de Medición de Flujo Másico: Situación Inicial vs. Nuevo Sistema

Aspecto	Situación Inicial	Nuevo Sistema (Controlador MRAC)
Sistema de Medición de Flujo Másico	Alimentador de tornillo y transportadores de cadena.	Controlador MRAC ajusta automáticamente el flujo.
	Dosificación manual a través de agujas reguladoras.	Utiliza transductores de nivel y modelos de referencia.
	Intervención manual constante por variabilidad del carbón.	Elimina necesidad de intervención manual constante.
Operación	Operador de sala estima el flujo de carbón usando celdas de carga.	Monitoreo en tiempo real a través del HMI.
	Coordinación constante entre operador de sala y operario de campo.	Ajustes automáticos y precisos.
	Inestabilidad reflejada en presión diferencial, temperatura de gases, velocidad de vibración y carga de flujo en IDFAN.	- Visualización de parámetros clave como RPM, altura de la cama de carbón y flujo másico. - Controlador MRAC mantiene estabilidad y optimiza el rendimiento.
Consecuencias /Problemas	Ineficiencia y falta de precisión.	Mejora en la precisión y estabilidad del flujo de carbón.
	Pérdidas económicas y aumento en el consumo de recursos.	Reducción de inestabilidad y desgaste de componentes.
	Riesgo de inestabilidad, desgaste de componentes y paradas no programadas.	Capacidad de alcanzar el máximo rendimiento.
Beneficios	Incapacidad de alcanzar el máximo rendimiento del molino.	Incremento en eficiencia y reducción de pérdidas económicas.
		Medición y control precisos.
	Ninguno significativo.	- Eliminación de intervención manual constante. - Optimización del rendimiento del molino. - Operación más estable y eficiente.

Nota. Elaboración Propia

5. Evaluación entre sistema de medición indirecta y balanzas dosificadoras

Con el objetivo de conocer el flujo de carbón que ingresa al molino vertical, se han evaluado tres opciones que buscan mejorar el control de dosificación y garantizar la eficiencia operativa. A continuación, se comparan las dos balanzas dosificadoras descritas anteriormente (Schenck y Pfister) y el nuevo sistema de medición indirecta diseñado con controlador MRAC.

En el caso de las balanzas dosificadora, se solicitó una cotización a los respectivos proveedores para conocer el costo de adquisición en ambas marcas, para la balanza de cinta Schenck, el costo de adquisición es de EUR 107,500.00, mientras que para la balanza Pfister el costo es de EUR 207,700.00. Además, se debe tomar en cuenta que en ambos casos se deben realizar modificaciones mecánicas y la integración completa con el sistema actual, ya que estas balanzas rempazan al transportador de cadena, lo que eleva aún más el costo.

Por otro lado, el nuevo sistema de medición indirecta que se propone, es una opción más económica, ya que se destaca por aprovechar la infraestructura del transportador de cadena existente, evitando así la adquisición de equipos costosos como las balanzas dosificadoras. Esta alternativa se basa en la instalación de una paleta de detección de altura, conectada a un transductor de posición que mide la altura en tiempo real para calcular el flujo de carbón. Al requerir solo sensores y ajustes en el sistema de control, los costos de adquisición e instalación son considerablemente menores, reduciendo también el tiempo necesario para su implementación. Además, este sistema destaca por sus bajos costos de mantenimiento al no contar con mecanismos complejos o partes móviles susceptibles a desgaste. El consumo energético es mínimo, ya que se utiliza el transportador original y solo se añaden sensores y programación adicional en el PLC con la incorporación del control adaptativo MRAC.

La siguiente Tabla muestra el detalle del costo de instalación del sistema de detección de altura de material, para el cálculo se considera la instalación de dos sistemas ya que se plantea la instalación para los dos transportadores de cadena del proceso.

Tabla 13
Costo de instalación de sistema de detección

Ítem	Descripción	Cant.	Ud.	Precio Unit.	Precio Total
1	Montaje de sistema de detección de material con transductor de posición	2	GLB	S/6,500.00	S/13,000.00
2	Suministro, tendido y conexionado de cable Belden 1x2x18AWG	96	m	S/14.00	S/1,344.00
3	Pruebas de inspección y comisionamiento	1	GLB	S/3,500.00	S/3,500.00
					S/17,844.00

Nota. Elaboración Propia

En cuanto a la precisión del sistema de medición indirecta propuesto, se puede estimar el error, calculando la raíz cuadrática de la suma de los errores individuales, este método es conocido como propagación de incertidumbre. El error del modelo del sistema es de 4.55%, el encoder presenta un error del 0.005%, mientras que el transductor de nivel tiene un error del 0.1%, entonces el error total combinado será:

$$E_{total} = \sqrt{(4.55)^2 + (0.005)^2 + (0.1)^2}$$

$$E_{total} = \pm 4.5511\%$$

La siguiente tabla muestra un análisis comparativo entre las tres opciones antes mencionadas.

Tabla 14
Análisis comparativo entre balanzas

Criterio	Balanza Schenk	Balanza Pfister	Medición Indirecta
Costo de adquisición	S/ 434,656.74	S/ 839,797.25	S/ 5,254.04
Costo de instalación	S/ 870,00.00	S/ 890,00.00	S/17,844.00
Costo de mantenimiento	Moderado	Moderado	Mínimo
Complejidad de integración	Alto	Alto	Bajo
Precisión de dosificación	0.5%	1%	4.55%

Nota. Elaboración Propia

Entonces, el sistema de medición indirecta representa una opción más económica que las balanzas dosificadoras Schenck y Pfister, principalmente debido a los bajos costos de adquisición, instalación y mantenimiento. Además, al aprovechar el transportador de cadena existente, se evita una inversión significativa en equipos nuevos.

Aunque este sistema no proporciona la misma precisión que las balanzas dosificadoras, el control adaptativo MRAC en el PLC compensa parcialmente esta limitación, asegurando un flujo adecuado para la operación eficiente del molino, ofreciendo así una solución más económica y operativamente viable, permitiendo optimizar costos sin comprometer significativamente el desempeño del proceso, siempre que se mantenga un monitoreo adecuado para evitar desviaciones críticas en el flujo.

6. Especificaciones técnicas del sistema de medición indirecta

La siguiente tabla resume las principales especificaciones técnicas de los componentes clave que conforman el sistema de medición, ha sido diseñado para aplicaciones industriales que requieren un monitoreo preciso y continuo del caudal de material sólido transportado mediante un transportador de cadena. A diferencia de los métodos directos, esta solución estima el flujo másico a partir de variables físicas como la altura de la cama de carbón, la velocidad lineal del transportador y la densidad del material.

La arquitectura del sistema está compuesta por sensores industriales de alta confiabilidad, un accionamiento eléctricos controlados por variadores de frecuencia, y un controlador lógico programable (PLC) que implementa un algoritmo adaptativo MRAC el cual permite ajustar dinámicamente la operación del sistema frente a variaciones en las condiciones del proceso.

Este diseño demuestra cómo la instrumentación y automatización avanzada pueden superar las limitaciones de la medición directa, contribuyendo significativamente a la optimización del proceso, reducción de costos operativos y mejora en la calidad del control del flujo de materiales sólidos.

Tabla 15
Resumen de especificaciones técnicas

Principio de medición:	Calculo indirecto de flujo másico $M = \rho * A * v$
Rango de dosificación:	3.1 – 31 T/h
Error total del sistema:	±4.5511 %
Motor de accionamiento:	SEW modelo RF77 DRS132MC4 ES7S 7.5 kW, 440 V, 1750 rpm
Variador de frecuencia:	SEW modelo MDX61B 0110-5A3-4-0T 11 kW, 380–500 V, 24 A
Encoder:	Encoder incremental SEW ES7S Conectado al módulo del variador
Transductor de posición:	Balluff BTL6-E500-M0200-PF-S115 – 254 mm Alimentación 24 v DC Salida 4–20 mA
PLC de control:	Allen-Bradley ControlLogix L75 – 32 MB, Ethernet/IP
Algoritmo de control:	MRAC – Ajuste basado en modelo de referencia
Entrada del sistema:	Altura de cama del material (de 93 mm a 193 mm) Velocidad de transportador (de 0 a 1700 RPM) Densidad del carbón (entre 1.2 y 1.8 gr/cm ³)
Salida del sistema:	Frecuencia de operación del motor (de 0 a 1700 RPM)
Comunicación industrial:	Ethernet/IP (PLC – variador – SCADA) 4–20 mA (Balluff – PLC)

Nota. Elaboración Propia

CONCLUSIONES

Se logró identificar y seleccionar componentes críticos que cumplen con los requisitos de precisión y fiabilidad necesarios para el sistema de medición de flujo másico de carbón en molinos verticales. Entre estos componentes destacan los transductores de posición Balluff BTL6, los encoders ES7S, y el motor SEW con variador de frecuencia MDX61B.

El desarrollo del modelo matemático multivariable permitió capturar con precisión las dinámicas del flujo másico de carbón en los molinos verticales. Utilizando el System Identification Toolbox de MATLAB, se modeló la respuesta dinámica del transportador de cadena, lo cual es crucial para desarrollar controles precisos. Este modelo matemático demostró ser capaz de predecir con alta precisión las variaciones en el flujo másico, proporcionando una base sólida para la implementación del control adaptativo y mejorando la estabilidad operativa del molino.

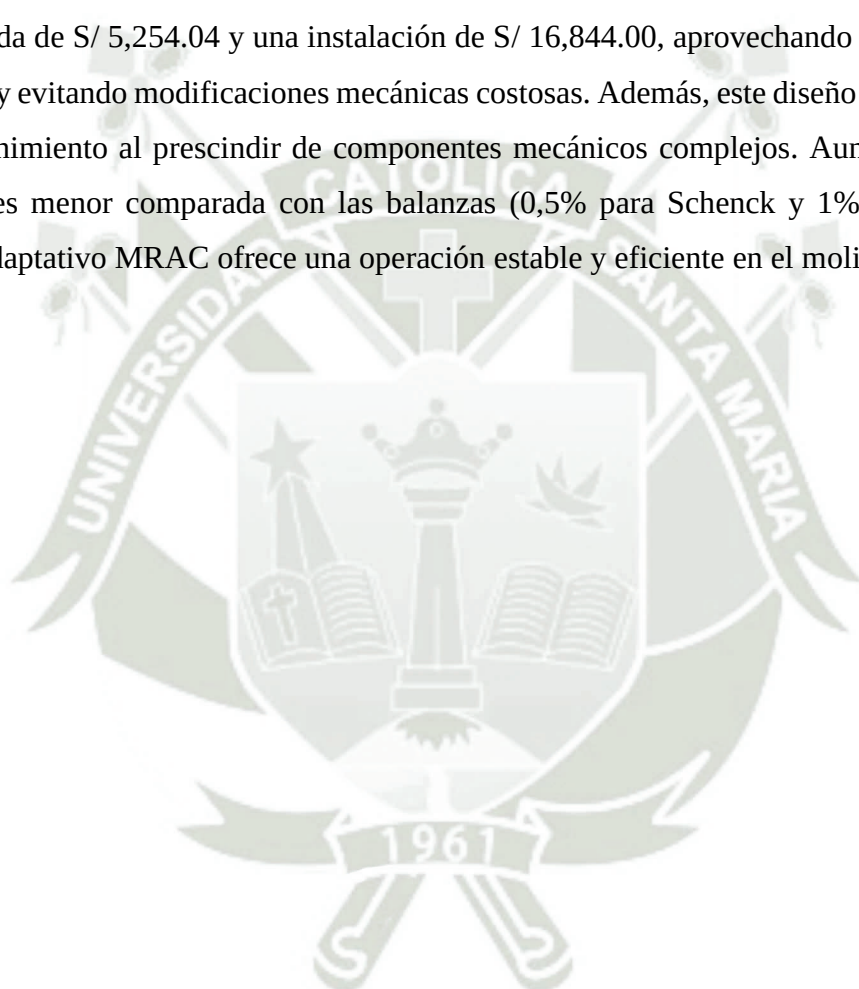
El algoritmo de control adaptativo desarrollado, basado en el modelo matemático, mostró una capacidad notable para ajustarse en tiempo real a las variaciones en las condiciones de operación y las características del carbón. Las simulaciones realizadas en MATLAB/Simulink confirmaron que el algoritmo puede mantener la estabilidad del sistema y optimizar el rendimiento operativo del molino. La implementación del controlador MRAC (Model Reference Adaptive Control) permitió ajustes precisos y dinámicos, reduciendo la variabilidad del flujo másico y mejorando la eficiencia del proceso.

La integración del sistema de medición indirecta con un PLC simulado y el algoritmo de control adaptativo en Simulink se realizó con éxito. Este sistema permitió la simulación completa del modelo del sistema y el controlador MRAC, asegurando que el sistema funcione correctamente antes de su implementación en el entorno real. La simulación facilitó la evaluación y ajuste del comportamiento del sistema, garantizando una mayor precisión y adaptabilidad del sistema de medición indirecta en condiciones operativas reales.

Las simulaciones en MATLAB/Simulink validaron la eficacia del control adaptativo en comparación con sistemas convencionales. Los resultados mostraron una mejora significativa en la precisión de la medición del flujo másico y una reducción en las fluctuaciones del proceso. El sistema adaptativo demostró ser más eficiente en la gestión del flujo másico de carbón,

mejorando la respuesta del sistema ante las variaciones del proceso. Estas simulaciones confirmaron que el control adaptativo es una solución avanzada y efectiva para la optimización de la operación de molinos verticales.

El sistema adaptativo de medición indirecta resulta una alternativa mucho más económica que las balanzas dosificadoras convencionales. Mientras que la balanza Schenck cuesta EUR 107,500.00 y la Pfister EUR 207,700.00, el sistema adaptativo requiere una inversión aproximada de S/ 5,254.04 y una instalación de S/ 16,844.00, aprovechando la infraestructura existente y evitando modificaciones mecánicas costosas. Además, este diseño reduce los gastos de mantenimiento al prescindir de componentes mecánicos complejos. Aunque su precisión (4,55%) es menor comparada con las balanzas (0,5% para Schenck y 1% para Pfister), el control adaptativo MRAC ofrece una operación estable y eficiente en el molino.



RECOMENDACIONES

Es fundamental realizar evaluaciones periódicas del algoritmo de control adaptativo (MRAC) para asegurar su precisión y eficacia. Se sugiere ajustar los parámetros del controlador en función de las condiciones operativas cambiantes y las características del carbón, garantizando así un rendimiento óptimo del sistema y minimizando el riesgo de inestabilidad y desgaste de componentes.

Se recomienda proporcionar formación y capacitación continua al personal operativo sobre el funcionamiento del sistema de medición indirecta y el control adaptativo en caso de realizarse una implementación en un entorno real. Esto incluye la interpretación de los datos del HMI, la identificación de posibles problemas operativos y la aplicación de ajustes necesarios. Un personal bien capacitado puede maximizar el rendimiento del sistema y responder eficazmente a cualquier desafío operativo que surja.

Se recomienda continuar mejorando el sistema de medición indirecta integrando un sistema de diagnóstico predictivo basado en inteligencia artificial y machine learning para anticipar fallas y optimizar el mantenimiento del sistema de medición y control. Este sistema puede analizar datos históricos y en tiempo real para identificar patrones que preceden a fallos o ineficiencias, permitiendo una intervención proactiva y reduciendo el tiempo de inactividad no planificado.

Se recomienda actualizar la interfaz hombre-máquina (HMI) del sistema, siguiendo las recomendaciones de la norma ANSI/ISA-101. Esto permitirá a los operadores tener una visión clara y precisa del estado del sistema, facilitando la toma de decisiones y la intervención rápida en caso de desviaciones operativa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

911Metallurgist (2018). Molinos SAG o AG.

<https://www.911metallurgist.com/metalurgia/molinos-sag-o-ag/>

Aragón H., y Suan M., A. (2019). Diseño de un módulo didáctico para la medición y control de nivel, presión y caudal para un laboratorio de automatización (Trabajo de grado). Fundación Universidad de América. <http://hdl.handle.net/20.500.11839/7563>

Balluff (s.f). Sensores magnetostrictivos. <https://www.balluff.com/es-es/products/areas/A0001/groups/G0116>

Barrios, M. (2015). *Optimización de los sistemas de control de un Molino de Bolas*. Unsa.edu.pe; Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/a42e842d-aab1-43b2-a5f6-9a7025526d6>

Bevington, P. y Robinson, D. (1993). Data reduction and error analysis for the physical sciences, 2nd ed. McGraw Hill, New York.

Blanco E. (2014). Tecnología Mineralúrgica. BLOQUE II - CAPÍTULO 8. MOLIENDA. Unican.es. <https://ocw.unican.es/course/view.php?id=261>

Corres, J. (2022). Análisis y control avanzado para actuadores basados en materiales inteligentes con memoria de forma ferromagnética. Universidad del País Vasco. Leioa

Eaton (s.f). Controladores lógicos programables EasyE4 nano. <https://www.eaton.com/mx/es-mx/catalog/machinery-controls/easye4.html>

FLSmidth Pfister. (2014). Product brochure: Pfister TRW / TRW-K gravimetric feeding of abrasive and hot materials.

García Jaimes, L. E. (2009). Sistemas de Control Avanzado (1.^a ed.). Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

Godoy, J. (2011). Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniería en Electrónica y Control. Bolivia. Quito.

- González, C. (2011) *Lógica Difusa, Una Introducción Práctica*. Recuperado el 19 de julio de 2018 de www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf.
- Haro, J. (2019). *Diseño de un sistema de control difuso para la estabilidad de los niveles de las celdas de flotación en un proceso continuo Cuprífero*. Universidad Tecnológica del Perú. Lima. Perú
- Hinojosa, J. (2017). *Diseño y Simulación de un Molino de Bolas Horizontal de 15 [TN/HR] Aplicado a una Planta Concentradora Mediante el Uso de Software Cad Especializado*. Puno: UNAP
- Huamani, S., y Fabian, A. (2021). *Diseño de un sistema oleo hidráulico para el accionamiento de la compuerta de una tolva de flujo masico de 1 ton de capacidad en una mina de cobre - Region de Junín*. *Unac.edu.pe*. <http://hdl.handle.net/20.500.12952/5675>
- Inga, M. (2019). *Diseño de un controlador PID adaptativo para el control de nivel en tres tanques cilíndricos interconectados*. *Espol.edu.ec*. <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/48142>
- Ipanaque, D., y Paredes, Z. (2021). *Propuesta de un sistema automatizado de control de humedad para optimizar la línea de secado de harina de pescado*. *Ucv.edu.pe*. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/87211>
- Isermann, R. (1982). Parameter adaptive control algorithms—A tutorial. *Automatica*, 18(5), 513–528. [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(82\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0005-1098(82)90002-4)
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de control automático*. Pearson Educación.
- Landau, I. D. (1973). A Survey of Model Reference Adaptive Techniques (Theory and Applications). *IFAC Proceedings Volumes*, 6(2), 15–42. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)68164-3](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)68164-3)
- Landau, I. D. (1982). A Unified Presentation of Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self Tuning Regulators (Concepts, Algorithms, Applications). *IFAC Proceedings Volumes*, 15(7), 11–23. [https://doi.org/10.1016/s1474-6670\(17\)62798-8](https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)62798-8)

- Llamosa, E., Gómez, D., y Ramírez, F. (2019). Metodología para la estimación de la incertidumbre en mediciones directas. *Scientia et Technica*, 1(41), 384–389. <https://doi.org/10.22517/23447214.2927>
- Llamosa, L., Gomez J., y Ramirez A. (2009). Diseño de un Procedimiento para el Cálculo de Incertidumbre en Mediciones Indirectas. Universidad Tecnológica de Pereira.
- LOESCHE. (2013). Instrucciones de funcionamiento LOESCHE molino y separador.
- Made-In-China (s.f.). Molino de bolas Horizontal de pigmentos ultra fina de alta calidad Molino. Recuperado de https://es.made-in-china.com/co_jieruixin/product_Pigment-Horizontal-Beads-Mill-Ultra-Fine-Grinding-Mill-High-Quality_uonenynyhy.html
- Mahnke , W., & Leitner, S. H. (2009). Arquitectura OPC unificada. Revista ABB
- Martínez, A. A. (2017). Desarrollo de Ingeniería Básica y de Detalle en Instrumentación y Automatización de un Molino Vertical de Cementos. Arequipa: UNSA.
- Micossi, E. G., y Reynoso, A. N. (2019). Diseño y automatización de planta de producción de masa de moldeo. *Utn.edu.ar*. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/7522>
- Mira, O. (2015). Diseño de Central Térmica de Ciclo Convencional. Tesis. Universidad de Salamanca. Salamanca. España.
- Moreno, J. (2021). Estudio metrológico y determinación de la incertidumbre del tiempo que tarda una esfera en recorrer una rampa inclinada. Pontificia Universidad Católica. Escuela de Posgrado. Perú.
- Mott, R. L., y Untener, J. A. (2015). Mecánica de Fluidos séptima edición. Pearson educación.
- Núñez Cornejo, J. O. (2010). Diseño E Implantación De Un Sistema SCADA Para Un Molino De Cemento para ser Usado como Combustible Industrial. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Núñez, C. (2022). Diseño de un sistema de control PID adaptativo de temperatura en cubos de mango para reducir el consumo eléctrico del túnel continuo IQF en la empresa Procesadora Perú S.A.C. *Usat.edu.pe*. <https://doi.org/RTU005737>

OPC Foundation. (s.f.). OPC Unified Architecture Overview. Consultado el Octubre de 2024, de <https://www.opcfoundation.org>

Panamá, L., y Rojas, X. (2021). Diseño e implementación de un sistema de supervisión, control y adquisición de datos en el área de molienda de la planta concentradora de minerales Multicoexpa Cia. Ltda. *Ups.edu.ec*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21334>

Pfeiffer. (s.f). Molino vertical de rodillos MPS. Recuperado de: <https://www.gebr-pfeiffer.com/es/productos/molino-vertical-de-rodillos-mps>

Ponce, L. (2019). Automatización de la etapa de lavado de fibras naturales en la industria textil. *Unsa.edu.pe*; Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9259>

Real, J. (2006). Diseño de un Sistema para el Proceso de Molienda de Carbón Mineral.

Rockwell Automation (s.f). Controladores ControlLogix 5580. <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/allen-bradley/i-o/all-modules.html>

Rockwell Automation. (2022). FactoryTalk View Ordering Guide . Obtenido de https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/qr/ftalk-qr003_-en-p.pdf

Román Pimentel, C. D. (2018). Programación de Rutas de Transporte de Materiales desde las Balanzas Dosificadoras Hacia Las Fajas Transportadoras en un Sistema Scada Utilizando El Software SIMATIC PCS 7 CEMAT en la Planta de Cemento UNACEM. <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/387>

Rosales, F., Vega, R., y de Sacarosa, R. (2017). Análisis comparativo del proceso de preparación y maduración de semilla para cristalización de azúcar. Recuperado de: <https://cengicana.org/files/20170927174149261.pdf>

Rubio, F. R., y Sánchez, M. J. (1996). Control adaptativo y robusto (Vol. 9). Universidad de Sevilla.

Sánchez, V. (2020). Diseño de un sistema SCADA con control remoto, usando un controlador lógico programable (PLC), un sistema CCTV, un servidor VNC y el software Team Viewer, aplicado a la seguridad residencial. Unsa.edu.pe; Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/11509>

Savona (s.f). Molino de Guijarros Paul O. Abbe de 48" x 60". Savona Equipment. <https://www.savonaequipment.com/es/molino-de-guijarros-paul-o-abbe-de-48-x-60-p231116>

Schenck Process. (2009). Manual de servicio técnico MULTIDOS MTD E, M y H.

Schenck Process. (2015). Manual de funcionamiento de básculas de cinta dosificadoras DISOCONT.

SEW-EURODRIVE. (2010). Encoder and Encoder Cable Comparison MOVIDRIVE® MDX 61B DT.- / DV.. Motors vs. DR.. Motors. Recuperado de: <https://download.sew-eurodrive.com/download/pdf/16900413.pdf>

SEW-EURODRIVE. (2015). DR.. series AC motors (1 speed) | SEW-EURODRIVE. Seweurodrive.com. <https://goo.su/tpIaGGh>

SEW-EURODRIVE. (2024). Variadores para aplicaciones MOVIDRIVE® B | SEW-EURODRIVE. Sew-Eurodrive.com.co. <https://goo.su/2XzJP>

Sinomaly (2015). Fabricante de Molinos SAG | Molinos Semiautógenos. Heavy-Plants.com. <http://heavy-plants.com/2-1-semi-autogenous-mill.html>

TE Connectivity. (s.f). LVDT Position Sensors. <https://www.te.com/en/products/sensors/position-sensors/lvdt-sensors.html?tab=pgp-story>

Troncoso, C. (2016). Diseño e Implementación de Estrategia de Control Predictivo en Proceso de Flotación de Minerales. Tesis. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso. Chile.

Woodcock, C. R., y Mason, J. S. (2012). Bulk solids handling: an introduction to the practice and technology. Springer Science & Business Media.

Zenith (s.f.). Equipos de Molienda - Molino de Barras. Zenithcrusher.com.
<https://es.zenithcrusher.com/products/molino/molino-de-barras.html>

Zhang, Z., y Freudenberg, J. S. (1993). Discrete-time loop transfer recovery for systems with nonminimum phase zeros and time delays. Automatica, 29(2), 351–363.
[https://doi.org/10.1016/0005-1098\(93\)90128-g](https://doi.org/10.1016/0005-1098(93)90128-g)



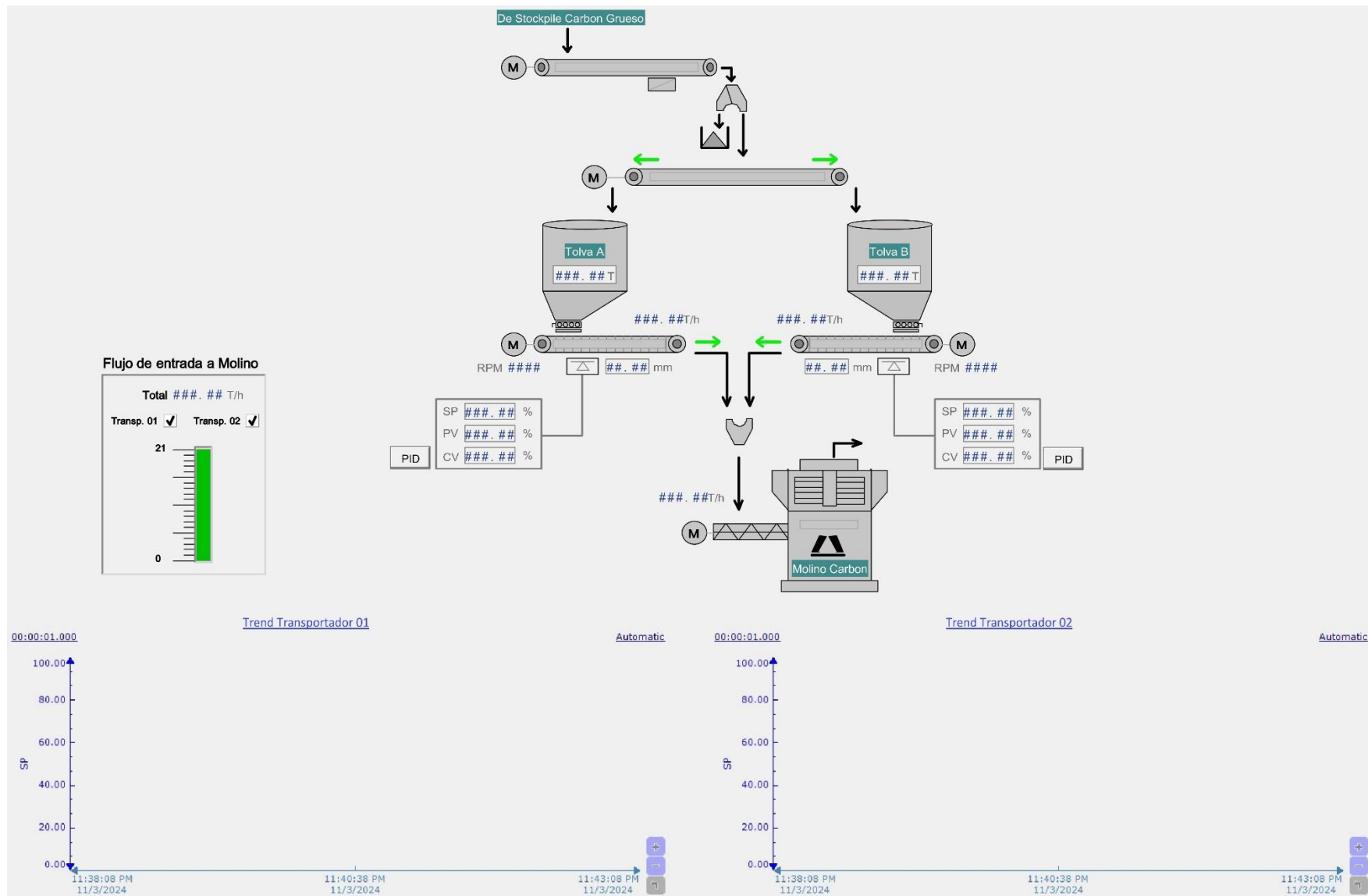
ANEXOS

ANEXO N°1: Matriz de Consistencia

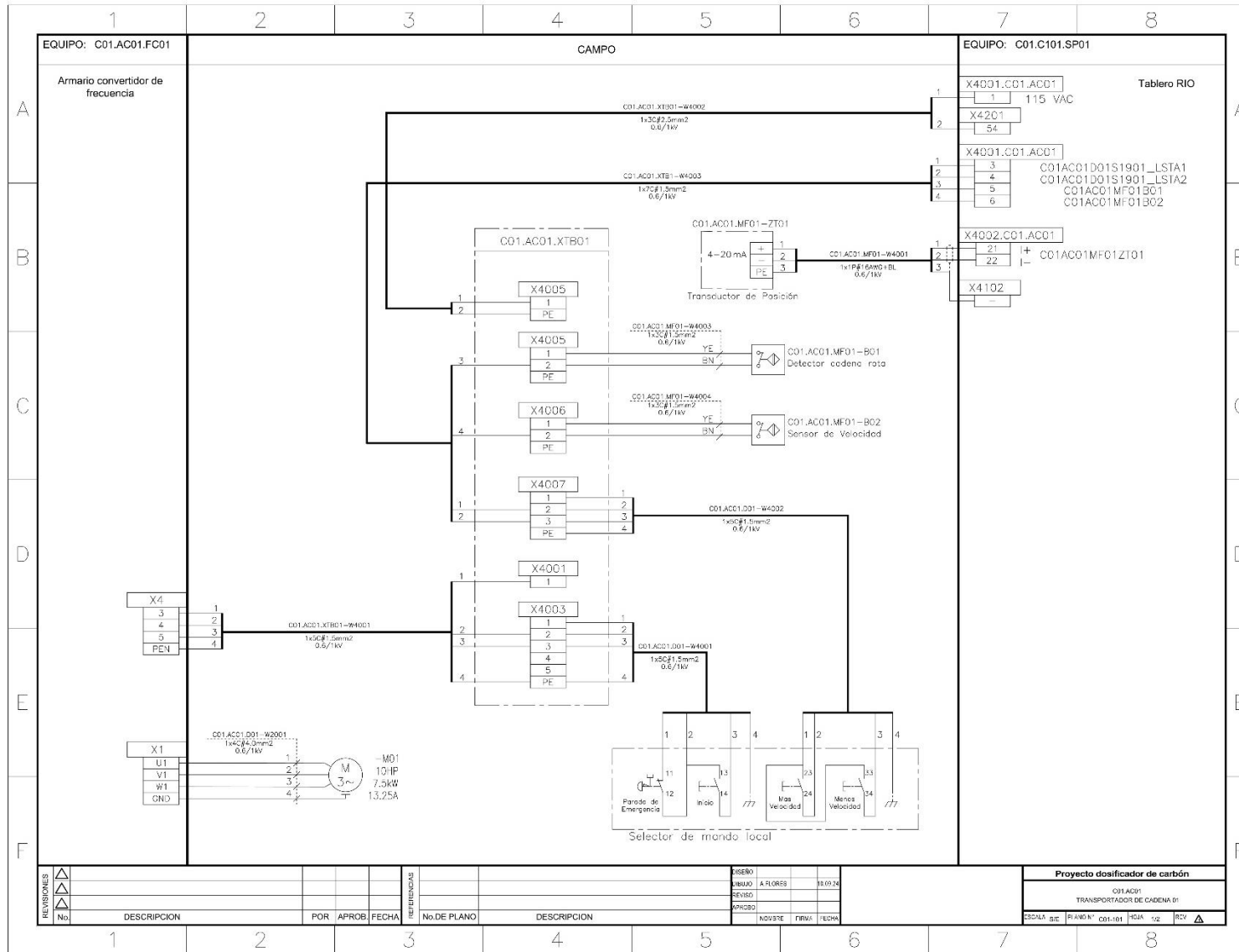
DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN INDIRECTA DE FLUJO MÁSCO DE CARBÓN EN MOLINOS VERTICALES MEDIANTE CONTROL ADAPTATIVO					
Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodologías
General	General	Variables Independientes			
Diseñar un sistema de medición indirecta para determinar el flujo másico de carbón en molinos verticales, utilizando un control adaptativo que garantice mediciones precisas y consistentes.	La implementación de un sistema de medición indirecta con control adaptativo para determinar el flujo másico de carbón en molinos verticales resultará en mediciones más precisas y consistentes, mejorando significativamente la eficiencia y seguridad del proceso de molienda.	Control adaptativo. Sistema de medición indirecta.	Estabilidad. Robustez. Tiempo de Respuesta. Exactitud. Fiabilidad.	Margen de Fase y de Ganancia. Tolerancia a Perturbaciones. Tiempo de Asentamiento. Error Porcentual Absoluto Medio. Coeficiente de Variación.	La investigación es de tipo aplicada. La investigación se encuadra dentro del diseño de Investigación Experimental. Para la investigación, se utilizarán técnicas de simulación computacional. Para la investigación, se emplearán softwares de simulación especializados, como MATLAB/Simulink,
Específicos	Específicos	Variable Dependiente			
Seleccionar componentes óptimos (sensores, actuadores, controlador) precisos para el sistema de medición en molinos verticales.	La selección de sensores, actuadores y controladores de alta precisión mejorará la fiabilidad del sistema de medición en molinos verticales.	Precisión y consistencia en la medición del flujo másico de carbón	Precisión. Repetibilidad.	Desviación Estándar.	

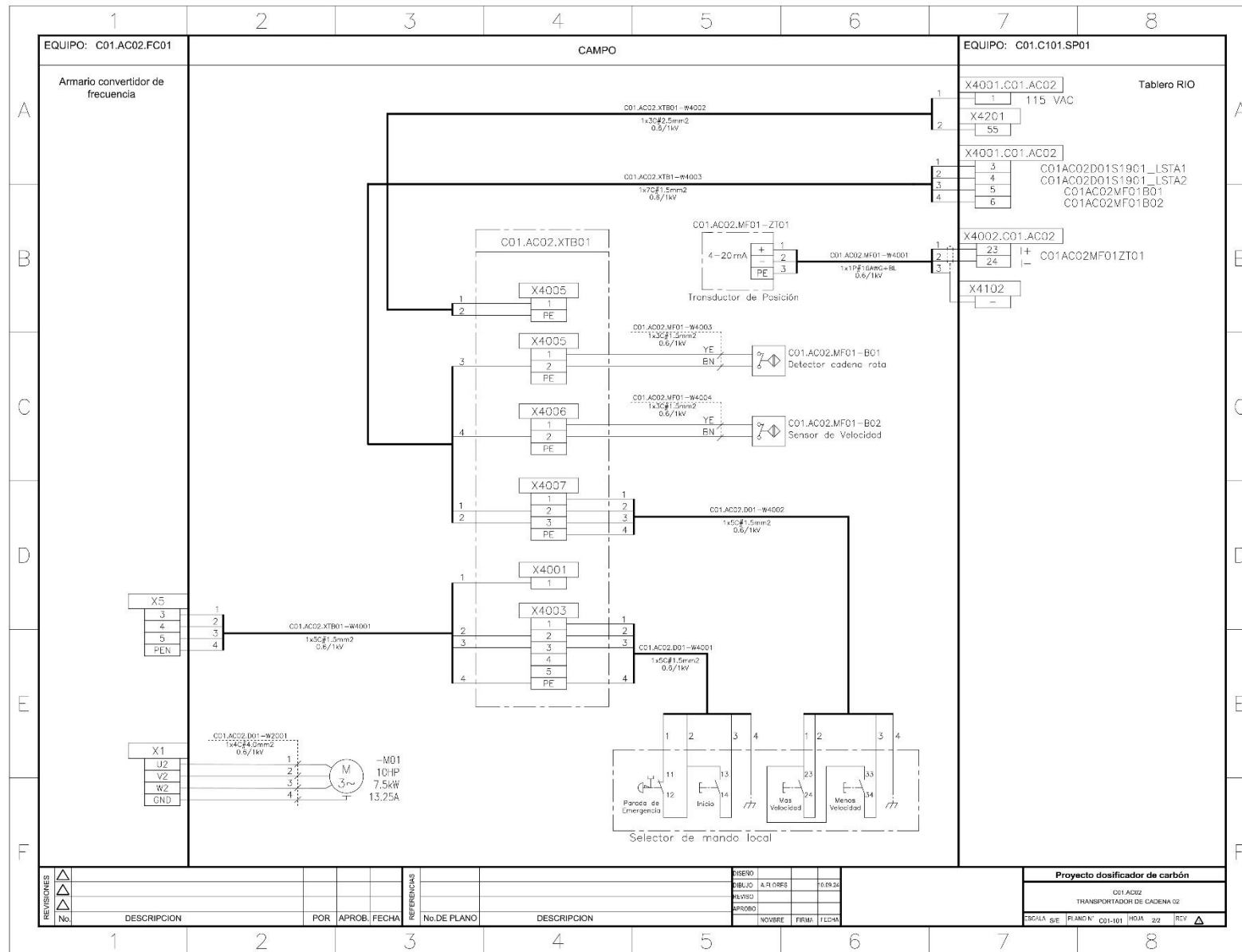
Desarrollar un modelo matemático multivariable que refleje el comportamiento del del flujo másico de carbón en molinos verticales.	El desarrollo de un modelo matemático multivariable será capaz de representar de manera precisa y fiable el comportamiento del flujo másico de carbón en molinos verticales.	en molinos verticales.		Varianza.	para recrear las condiciones de operación del molino vertical y el flujo másico de carbón.
Desarrollar un algoritmo de control adaptativo basado en el modelo propuesto para ajustes en tiempo real según variaciones operativas y características del carbón.	Un algoritmo de control adaptativo desarrollado podrá ajustarse eficazmente en tiempo real a las variaciones en las condiciones de operación y las características del carbón, mejorando la eficiencia del proceso.				
Desarrollar el sistema de medición indirecta para el molino vertical utilizando un PLC simulado e integrando el algoritmo de control adaptativo en Simulink.	El desarrollo de un sistema de medición indirecta utilizando un PLC simulado e integrando el algoritmo de control adaptativo en Simulink proporcionará una mayor precisión y adaptabilidad.				
Realizar simulaciones en MATLAB/Simulink para validar la eficacia y precisión del control adaptativo en molinos verticales, comparándolo con sistemas convencionales.	Las simulaciones realizadas en MATLAB/Simulink confirmarán la eficacia del control adaptativo, demostrando mejoras significativas en la precisión y eficiencia del molino vertical comparado con sistemas convencionales.				

ANEXO N°2: Pantalla de HMI

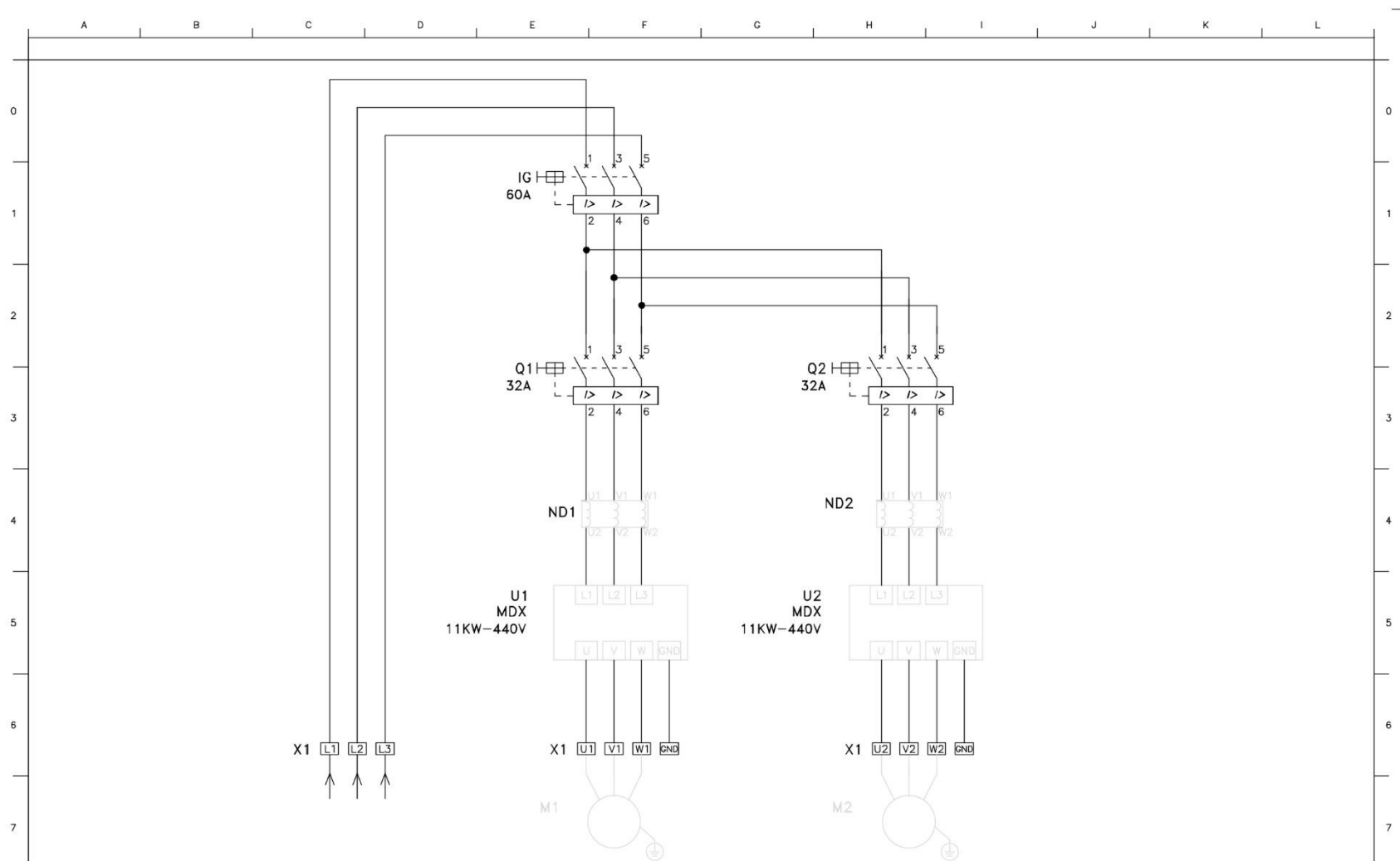


ANEXO N°3: Planos de Conexiones

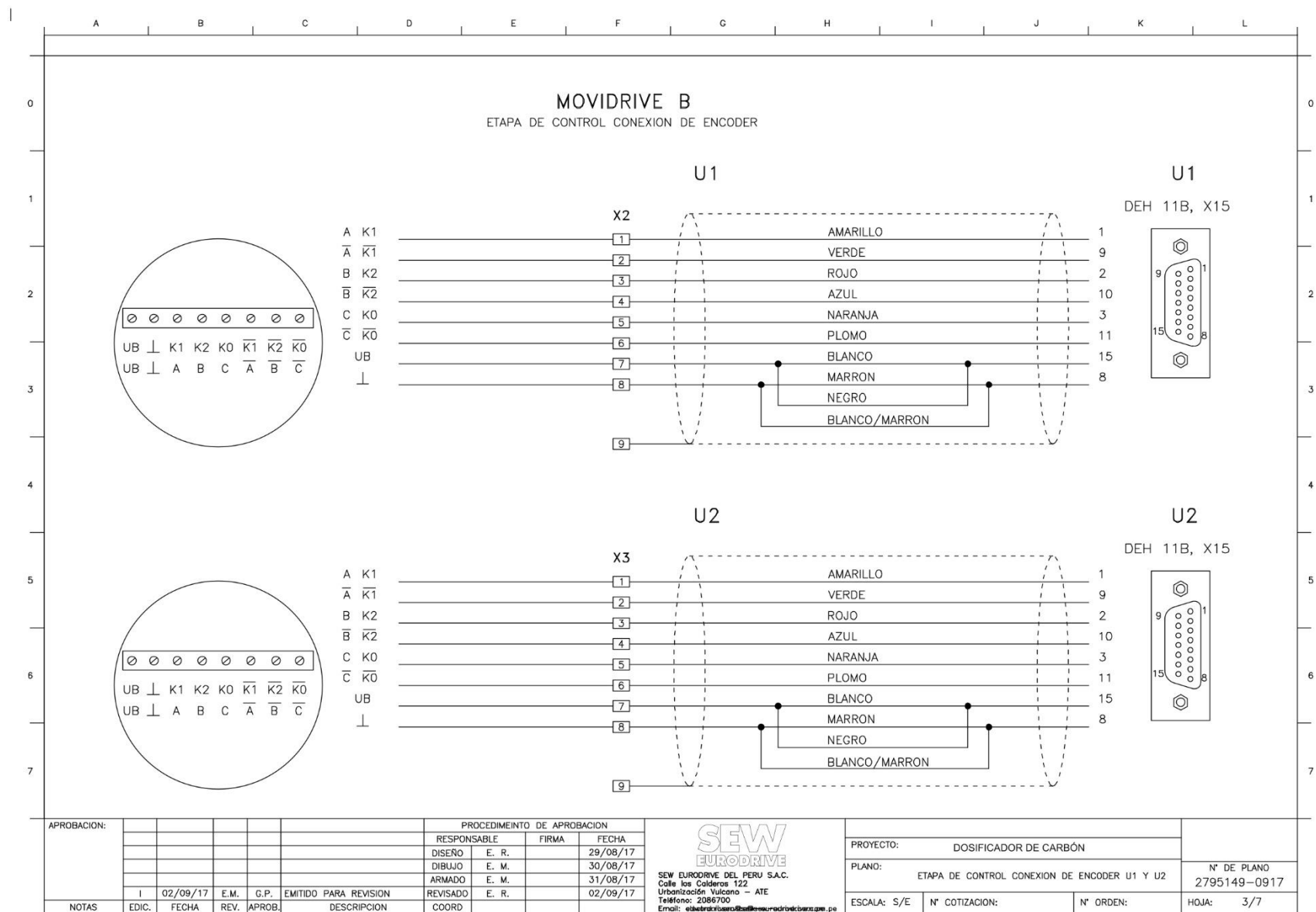


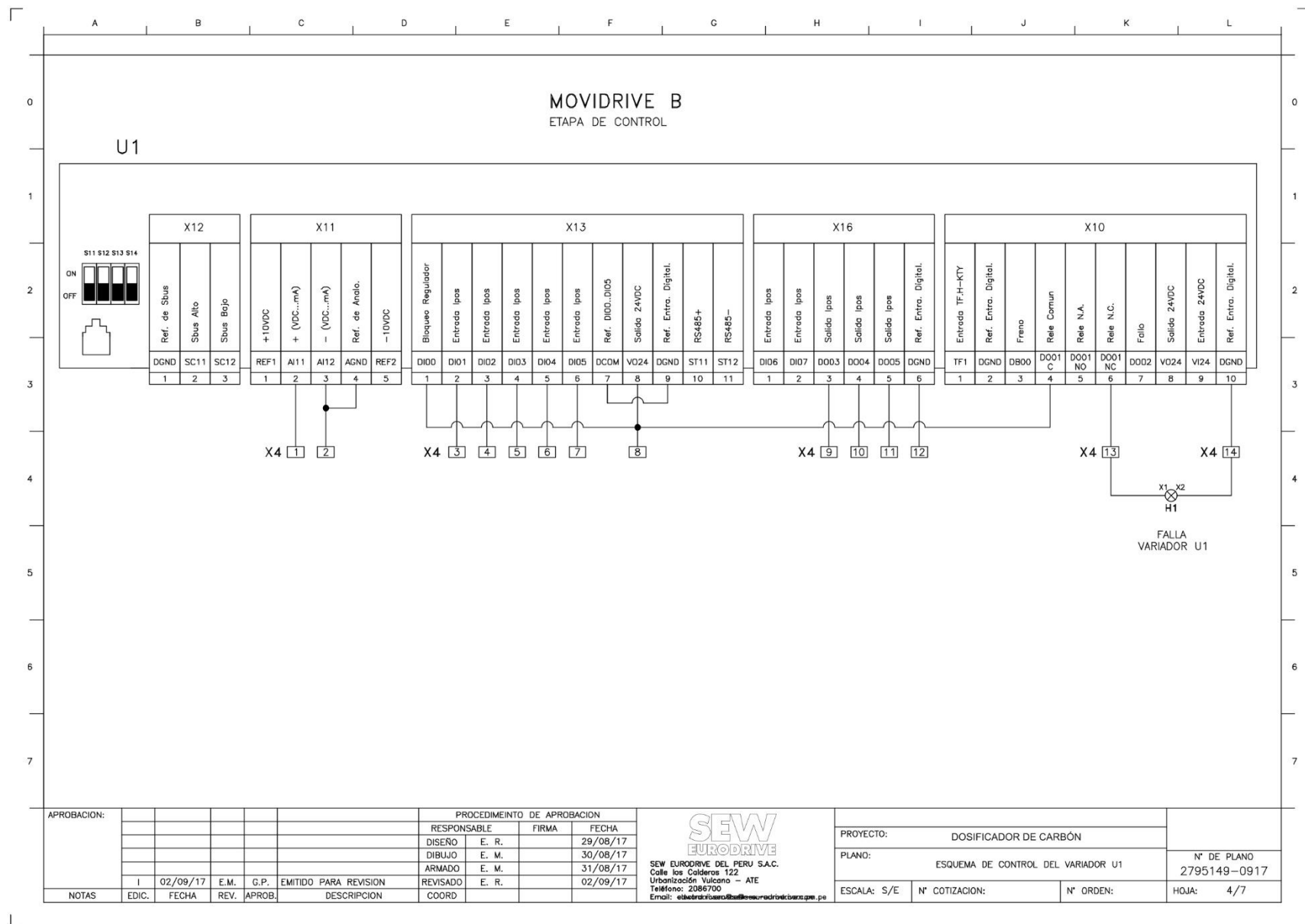


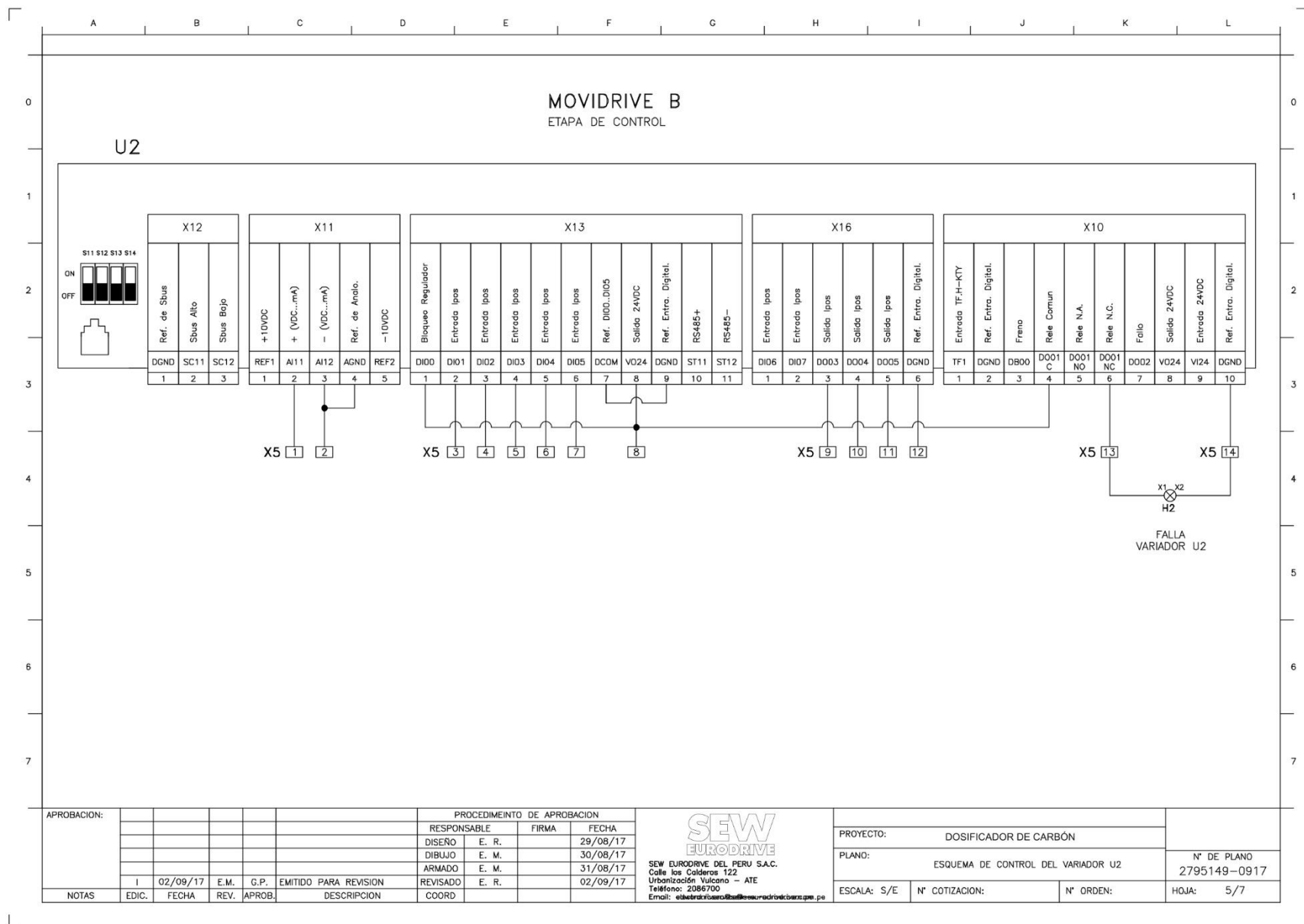
A B C D E F G H I J K L																																																																								
PLANOS ELECTRICOS PROYECTO: DOSIFICADOR DE CARBÓN NUMERO DE PLANO: 2795149-0917 CANTIDAD DE HOJAS: 7										INDICE <table border="1"><thead><tr><th>HOJA</th><th>DESIGNACION</th></tr></thead><tbody><tr><td>1</td><td>PRINCIPAL - INDICE</td></tr><tr><td>2</td><td>ESQUEMA DE FUERZA</td></tr><tr><td>3</td><td>ETAPA DE CONTROL CONEXION DE ENCODER U1 Y U2</td></tr><tr><td>4</td><td>ESQUEMA DE CONTROL DEL VARIADOR U1</td></tr><tr><td>5</td><td>ESQUEMA DE CONTROL DEL VARIADOR U2</td></tr><tr><td>6</td><td>EMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS</td></tr><tr><td>7</td><td>LEYENDA</td></tr></tbody></table>	HOJA	DESIGNACION	1	PRINCIPAL - INDICE	2	ESQUEMA DE FUERZA	3	ETAPA DE CONTROL CONEXION DE ENCODER U1 Y U2	4	ESQUEMA DE CONTROL DEL VARIADOR U1	5	ESQUEMA DE CONTROL DEL VARIADOR U2	6	EMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS	7	LEYENDA																																														
HOJA	DESIGNACION																																																																							
1	PRINCIPAL - INDICE																																																																							
2	ESQUEMA DE FUERZA																																																																							
3	ETAPA DE CONTROL CONEXION DE ENCODER U1 Y U2																																																																							
4	ESQUEMA DE CONTROL DEL VARIADOR U1																																																																							
5	ESQUEMA DE CONTROL DEL VARIADOR U2																																																																							
6	EMPLAZAMIENTO DE EQUIPOS																																																																							
7	LEYENDA																																																																							
APROBACION: <table border="1"><thead><tr><th colspan="5"></th><th colspan="3">PROCEDIMIENTO DE APROBACION</th></tr><tr><th colspan="5"></th><th>RESPONSABLE</th><th>FIRMA</th><th>FECHA</th></tr></thead><tbody><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>DISEÑO</td><td>E. R.</td><td>29/08/17</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>DIBUJO</td><td>E. M.</td><td>30/08/17</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>ARMADO</td><td>E. M.</td><td>31/08/17</td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>REVISADO</td><td>E. R.</td><td>02/09/17</td></tr></tbody></table> SEW EURODRIVE SEW EURODRIVE DEL PERU S.A.C. Calle los Calderos 122 Urbanización Vulcano - ATE Telefono: 2086700 Email: edward.rivera@sew-eurodrive.com.pe <table border="1"><thead><tr><th colspan="4">PROYECTO: DOSIFICADOR DE CARBÓN</th><th>Nº DE PLANO</th></tr><tr><th colspan="4">PLANO: PRINCIPAL - INDICE</th><th>2795149-0917</th></tr><tr><th>ESCALA: S/E</th><th>Nº COTIZACION:</th><th>Nº ORDEN:</th><th colspan="2">HOJA: 1/7</th></tr></thead></table>															PROCEDIMIENTO DE APROBACION								RESPONSABLE	FIRMA	FECHA						DISEÑO	E. R.	29/08/17						DIBUJO	E. M.	30/08/17						ARMADO	E. M.	31/08/17						REVISADO	E. R.	02/09/17	PROYECTO: DOSIFICADOR DE CARBÓN				Nº DE PLANO	PLANO: PRINCIPAL - INDICE				2795149-0917	ESCALA: S/E	Nº COTIZACION:	Nº ORDEN:	HOJA: 1/7	
					PROCEDIMIENTO DE APROBACION																																																																			
					RESPONSABLE	FIRMA	FECHA																																																																	
					DISEÑO	E. R.	29/08/17																																																																	
					DIBUJO	E. M.	30/08/17																																																																	
					ARMADO	E. M.	31/08/17																																																																	
					REVISADO	E. R.	02/09/17																																																																	
PROYECTO: DOSIFICADOR DE CARBÓN				Nº DE PLANO																																																																				
PLANO: PRINCIPAL - INDICE				2795149-0917																																																																				
ESCALA: S/E	Nº COTIZACION:	Nº ORDEN:	HOJA: 1/7																																																																					

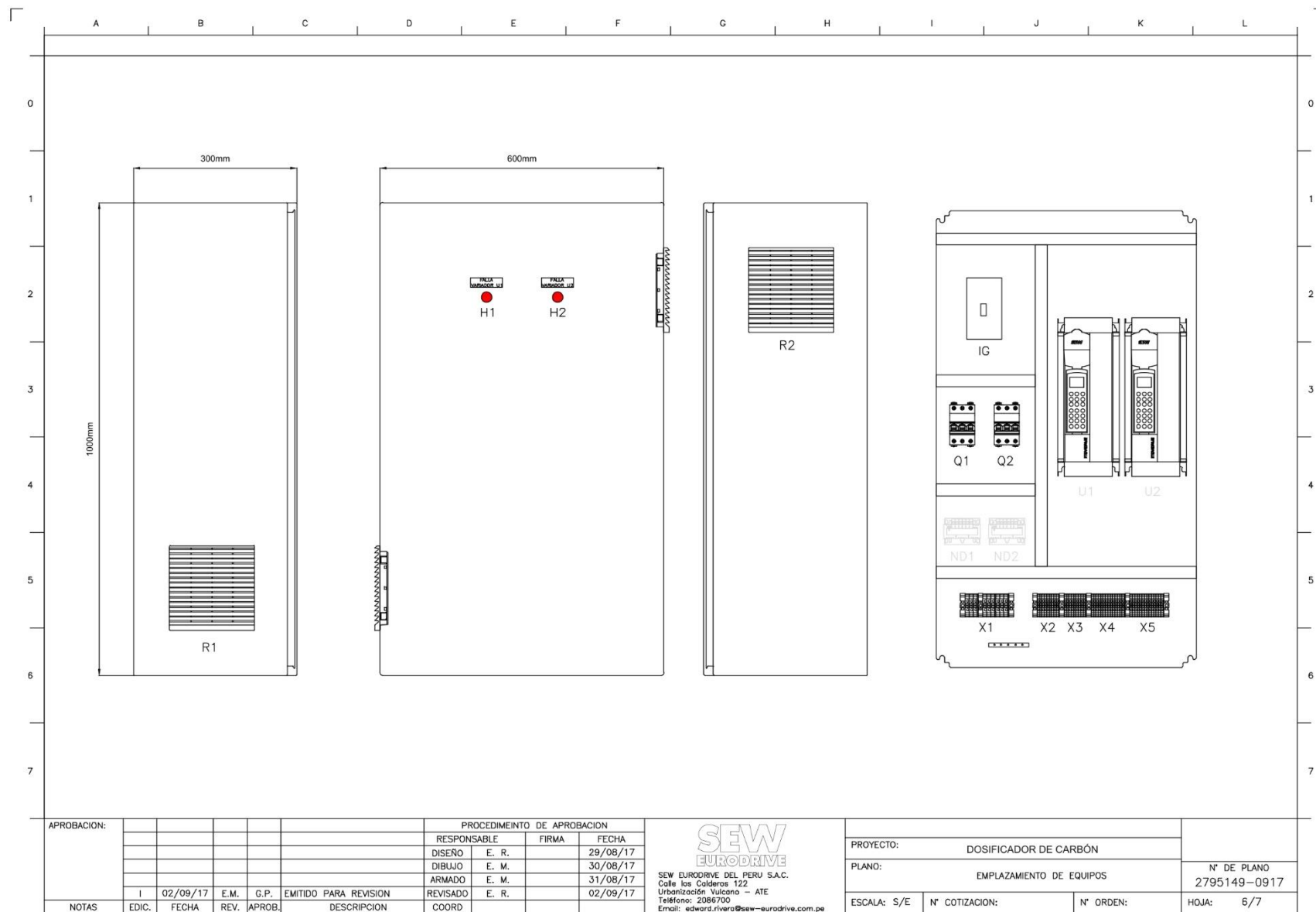


APROBACION:						PROCEDIMIENTO DE APROBACION			 SEW EURODRIVE DEL PERU S.A.C. Calle los Calderos 122 Urbanización Vulcano – ATE Teléfono: 2086700 Email: edward.rivera@sew-eurodrive.com.pe	PROYECTO:		N° DE PLANO
						RESPONSABLE	FIRMA	FECHA		DOSIFICADOR DE CARBÓN		
						DISEÑO	E. R.	29/08/17				2795149-0917
						DIBUJO	E. M.	30/08/17				
						ARMADO	E. M.	31/08/17				
						REVISADO	E. R.	02/09/17				
						COORD						
									</			









A B C D E F G H I J K L																																																																																																															
0																																																																																																															
1																																																																																																															
2																																																																																																															
3																																																																																																															
4																																																																																																															
5																																																																																																															
6																																																																																																															
7																																																																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">LEYENDA</th> </tr> <tr> <th>N°</th> <th>ROTULO</th> <th>DESIGNACION</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>IG</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO GENERAL DEL TABLERO DE 3x60A</td></tr> <tr><td>2</td><td>Q1</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE VARIADOR U1 3x32A</td></tr> <tr><td>3</td><td>Q2</td><td>INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE VARIADOR U2 3x32A</td></tr> <tr><td>4</td><td>ND1</td><td>REACTANCIA DE LINEA ND 020-013</td></tr> <tr><td>5</td><td>ND2</td><td>REACTANCIA DE LINEA ND 020-013</td></tr> <tr><td>6</td><td>U1</td><td>VARIADOR DE FRECUENCIA MDX 11KW</td></tr> <tr><td>7</td><td>U2</td><td>VARIADOR DE FRECUENCIA MDX 11KW</td></tr> <tr><td>8</td><td>X1</td><td>BORNERA DE ENTRADA AL TABLERO Y SALIDA A CADA MOTOR</td></tr> <tr><td>9</td><td>X2</td><td>BORNERA PARA ENCODER VARIADOR U1</td></tr> <tr><td>10</td><td>X3</td><td>BORNERA PARA ENCODER VARIADOR U2</td></tr> <tr><td>11</td><td>X4</td><td>BORNERA DE CONTROL VARIADOR U1</td></tr> <tr><td>12</td><td>X5</td><td>BORNERA DE CONTROL VARIADOR U2</td></tr> <tr><td>13</td><td>H1</td><td>PILOTO LED DE 24VDC COLOR ROJO - FALLA VARIADOR U1</td></tr> <tr><td>14</td><td>H2</td><td>PILOTO LED DE 24VDC COLOR ROJO - FALLA VARIADOR U2</td></tr> <tr><td>15</td><td>R1</td><td>REJILLA DE AIRE</td></tr> <tr><td>16</td><td>R2</td><td>REJILLA DE AIRE</td></tr> <tr><td>17</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>18</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>19</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>												LEYENDA			N°	ROTULO	DESIGNACION	1	IG	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO GENERAL DEL TABLERO DE 3x60A	2	Q1	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE VARIADOR U1 3x32A	3	Q2	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE VARIADOR U2 3x32A	4	ND1	REACTANCIA DE LINEA ND 020-013	5	ND2	REACTANCIA DE LINEA ND 020-013	6	U1	VARIADOR DE FRECUENCIA MDX 11KW	7	U2	VARIADOR DE FRECUENCIA MDX 11KW	8	X1	BORNERA DE ENTRADA AL TABLERO Y SALIDA A CADA MOTOR	9	X2	BORNERA PARA ENCODER VARIADOR U1	10	X3	BORNERA PARA ENCODER VARIADOR U2	11	X4	BORNERA DE CONTROL VARIADOR U1	12	X5	BORNERA DE CONTROL VARIADOR U2	13	H1	PILOTO LED DE 24VDC COLOR ROJO - FALLA VARIADOR U1	14	H2	PILOTO LED DE 24VDC COLOR ROJO - FALLA VARIADOR U2	15	R1	REJILLA DE AIRE	16	R2	REJILLA DE AIRE	17			18			19			20																																				
LEYENDA																																																																																																															
N°	ROTULO	DESIGNACION																																																																																																													
1	IG	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO GENERAL DEL TABLERO DE 3x60A																																																																																																													
2	Q1	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE VARIADOR U1 3x32A																																																																																																													
3	Q2	INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE VARIADOR U2 3x32A																																																																																																													
4	ND1	REACTANCIA DE LINEA ND 020-013																																																																																																													
5	ND2	REACTANCIA DE LINEA ND 020-013																																																																																																													
6	U1	VARIADOR DE FRECUENCIA MDX 11KW																																																																																																													
7	U2	VARIADOR DE FRECUENCIA MDX 11KW																																																																																																													
8	X1	BORNERA DE ENTRADA AL TABLERO Y SALIDA A CADA MOTOR																																																																																																													
9	X2	BORNERA PARA ENCODER VARIADOR U1																																																																																																													
10	X3	BORNERA PARA ENCODER VARIADOR U2																																																																																																													
11	X4	BORNERA DE CONTROL VARIADOR U1																																																																																																													
12	X5	BORNERA DE CONTROL VARIADOR U2																																																																																																													
13	H1	PILOTO LED DE 24VDC COLOR ROJO - FALLA VARIADOR U1																																																																																																													
14	H2	PILOTO LED DE 24VDC COLOR ROJO - FALLA VARIADOR U2																																																																																																													
15	R1	REJILLA DE AIRE																																																																																																													
16	R2	REJILLA DE AIRE																																																																																																													
17																																																																																																															
18																																																																																																															
19																																																																																																															
20																																																																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">APROBACION:</th> <th colspan="3">PROCEDIMIENTO DE APROBACION</th> <th rowspan="5">  SEW EURODRIVE DEL PERU S.A.C. Calle las Calderas 122 Urbanización Vulcano - ATE Teléfono: 2086700 Email: edward.rivera@sew-eurodrive.com.pe </th> <th colspan="2">PROYECTO:</th> <th rowspan="5"> N° DE PLANO 2795149-0917 </th> </tr> <tr> <th colspan="5"></th> <th>RESPONSABLE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> <th colspan="2">DOSIFICADOR DE CARBÓN</th> </tr> <tr> <th colspan="5"></th> <td>DISERO</td> <td>E. R.</td> <td>29/08/17</td> <th colspan="2"></th> </tr> <tr> <th colspan="5"></th> <td>DIBUJO</td> <td>E. M.</td> <td>30/08/17</td> <th colspan="2"></th> </tr> <tr> <th colspan="5"></th> <td>ARMADO</td> <td>E. M.</td> <td>31/08/17</td> <th colspan="2"></th> </tr> <tr> <th colspan="5"></th> <td>REVISADO</td> <td>E. R.</td> <td>02/09/17</td> <th colspan="2">PLANO:</th> <th></th> </tr> <tr> <th colspan="5"></th> <td></td> <td></td> <td></td> <td colspan="2">LEYENDA</td> <th></th> </tr> <tr> <td>NOTAS</td> <td>EDIC.</td> <td>FECHA</td> <td>REV.</td> <td>APROB.</td> <td>DESCRIPCION</td> <td>COORD</td> <td></td> <td></td> <td>ESCALA: S/E</td> <td>N° COTIZACION:</td> <td>N° ORDEN:</td> <td>HOJA: 7/7</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>I</td> <td>02/09/17</td> <td>E.M.</td> <td>G.P.</td> <td>EMITIDO PARA REVISION</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>												APROBACION:					PROCEDIMIENTO DE APROBACION			 SEW EURODRIVE DEL PERU S.A.C. Calle las Calderas 122 Urbanización Vulcano - ATE Teléfono: 2086700 Email: edward.rivera@sew-eurodrive.com.pe	PROYECTO:		N° DE PLANO 2795149-0917						RESPONSABLE	FIRMA	FECHA	DOSIFICADOR DE CARBÓN							DISERO	E. R.	29/08/17								DIBUJO	E. M.	30/08/17								ARMADO	E. M.	31/08/17								REVISADO	E. R.	02/09/17	PLANO:											LEYENDA			NOTAS	EDIC.	FECHA	REV.	APROB.	DESCRIPCION	COORD			ESCALA: S/E	N° COTIZACION:	N° ORDEN:	HOJA: 7/7		I	02/09/17	E.M.	G.P.	EMITIDO PARA REVISION							
APROBACION:					PROCEDIMIENTO DE APROBACION			 SEW EURODRIVE DEL PERU S.A.C. Calle las Calderas 122 Urbanización Vulcano - ATE Teléfono: 2086700 Email: edward.rivera@sew-eurodrive.com.pe	PROYECTO:		N° DE PLANO 2795149-0917																																																																																																				
					RESPONSABLE	FIRMA	FECHA		DOSIFICADOR DE CARBÓN																																																																																																						
					DISERO	E. R.	29/08/17																																																																																																								
					DIBUJO	E. M.	30/08/17																																																																																																								
					ARMADO	E. M.	31/08/17																																																																																																								
					REVISADO	E. R.	02/09/17	PLANO:																																																																																																							
								LEYENDA																																																																																																							
NOTAS	EDIC.	FECHA	REV.	APROB.	DESCRIPCION	COORD			ESCALA: S/E	N° COTIZACION:	N° ORDEN:	HOJA: 7/7																																																																																																			
	I	02/09/17	E.M.	G.P.	EMITIDO PARA REVISION																																																																																																										

ANEXO N°4: Programación PLC

C01_Dosificador_de_Cabon_Rev01 - Table of Contents	Page i
	10/14/2024 8:56:56 AM
	C01_Dosificador de Cabon MRAC rev03.ACD
C01_Dosificador_de_Cabon_Rev01	
Controller Organizer Listing	1
C01_Periodic_Task	
Control_Loop	
C01_AC01_MF01_CONTROL	
Function Block Diagram	2
MainTask	
MainProgram	
C01_Calculo_Altura_Cama	
Ladder Diagram	6
C01_Calculo_Flujo	
Structured Text	8
C01_CalibracionAnalogica	
Function Block Diagram	10
C01_SIMULACION	
Function Block Diagram	11
MainRoutine	
Ladder Diagram	12

Controller C01_Dosificador_de_Cabon_Rev01

Controller Fault Handler

Power-Up Handler

Tasks C01_Periodic_Task Control_Loop C01_AC01_MF01_CONTROL MainTask MainProgram MainRoutine C01_Calculo_Altura_Cama C01_Calculo_Flujo C01_CalibracionAnalogica C01_SIMULACION

Unscheduled

Motion Groups

Ungrouped Axes

Add-On Instructions AICAL

Analog Calibration

 Logic Prescan**Data Types**

User-Defined

Strings

Add-On-Defined

AICAL

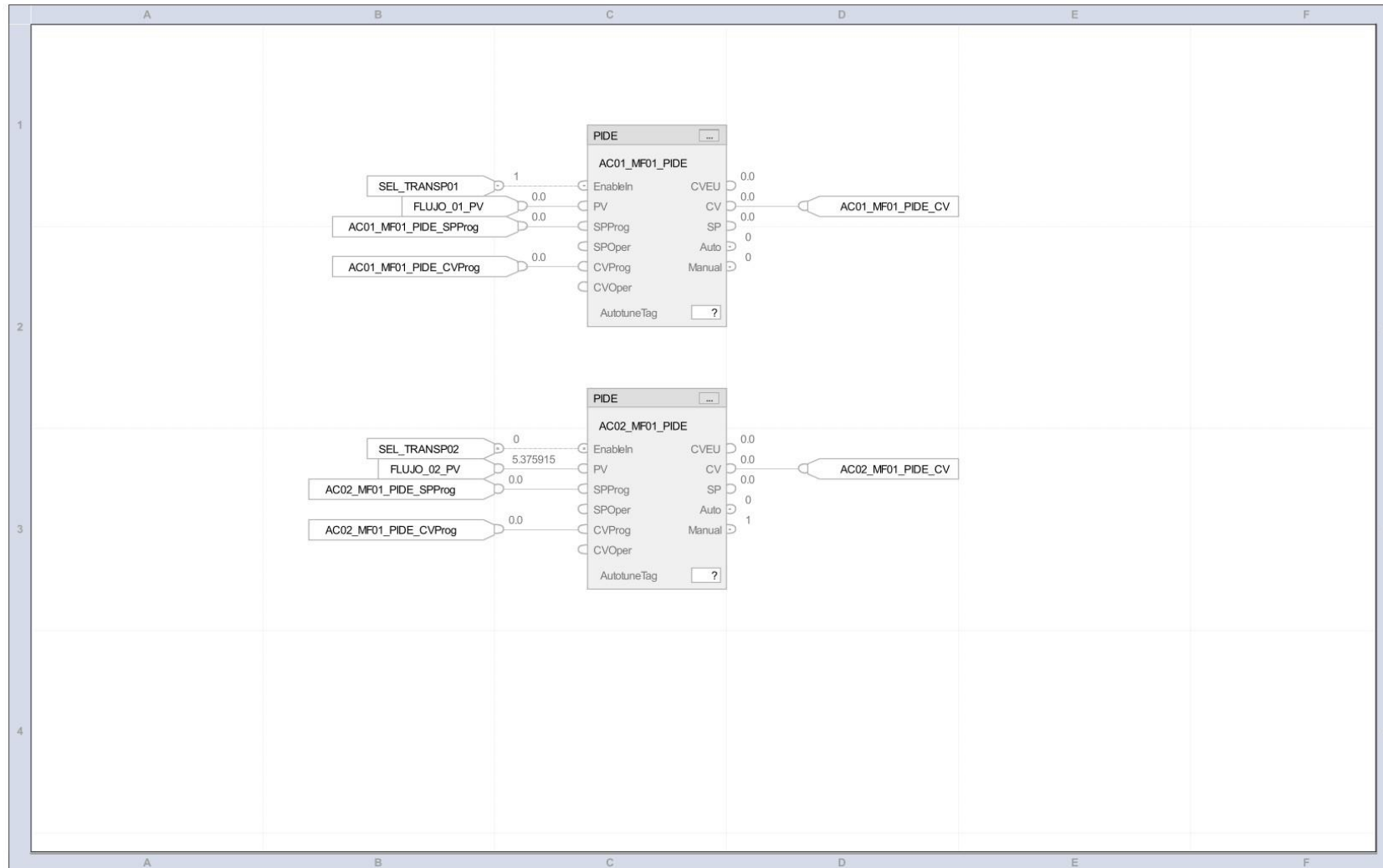
Analog Calibration

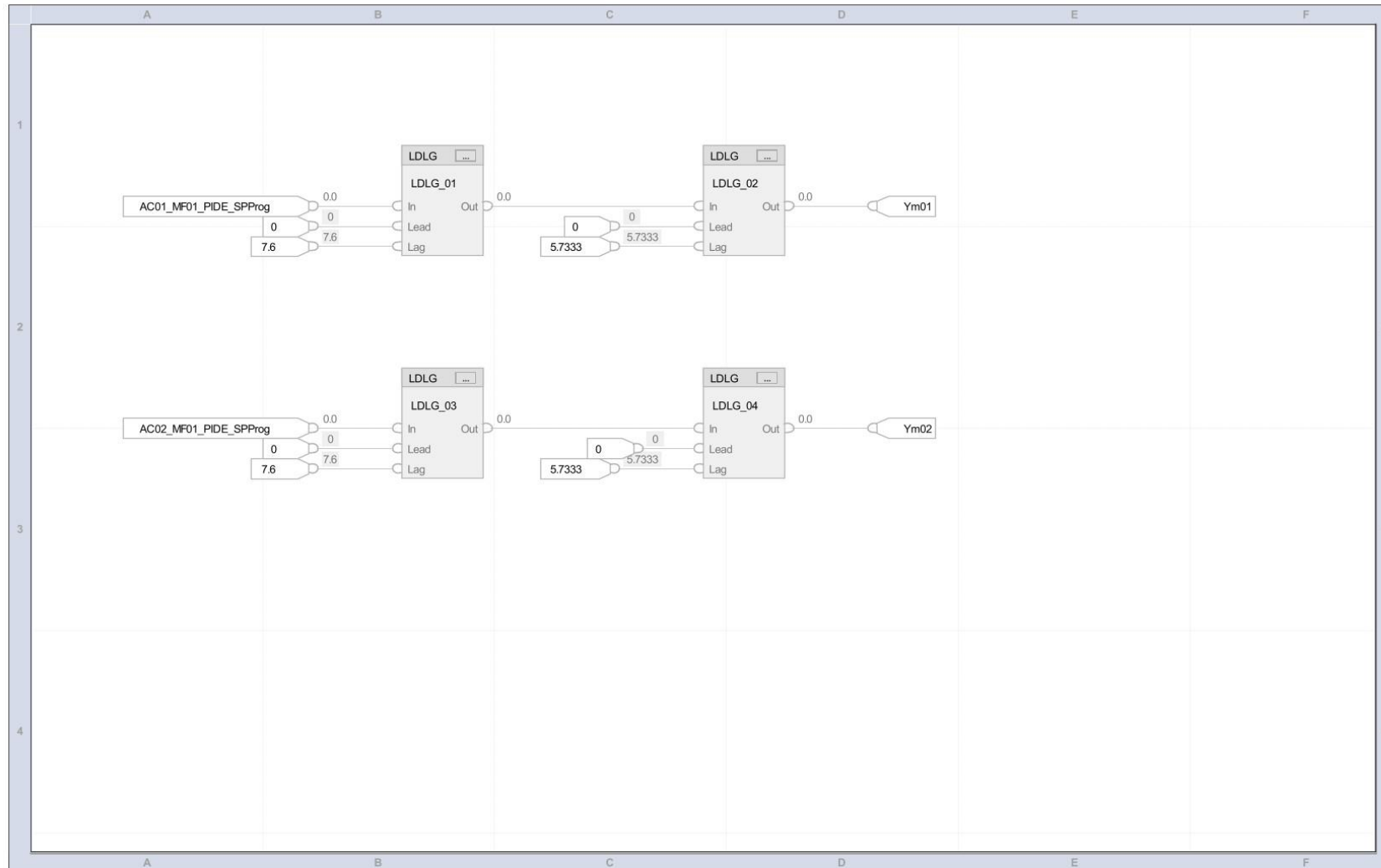
Module-Defined

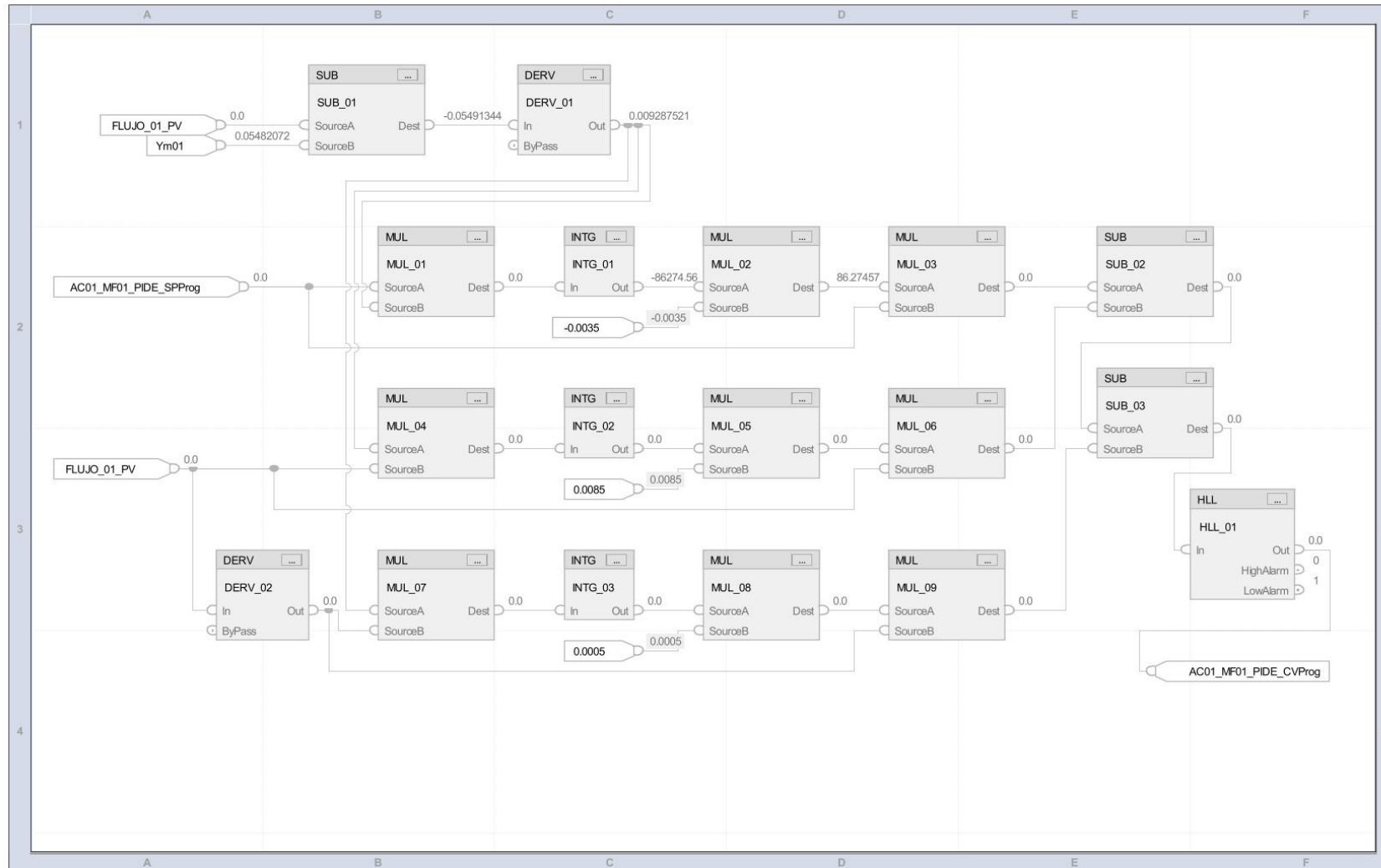
 AB:1756_IF8_Float:C:0 AB:1756_IF8_Float:I:0 AB:1756_NII_Struct:C:0**Trends** ControladorMRAC**I/O Configuration**

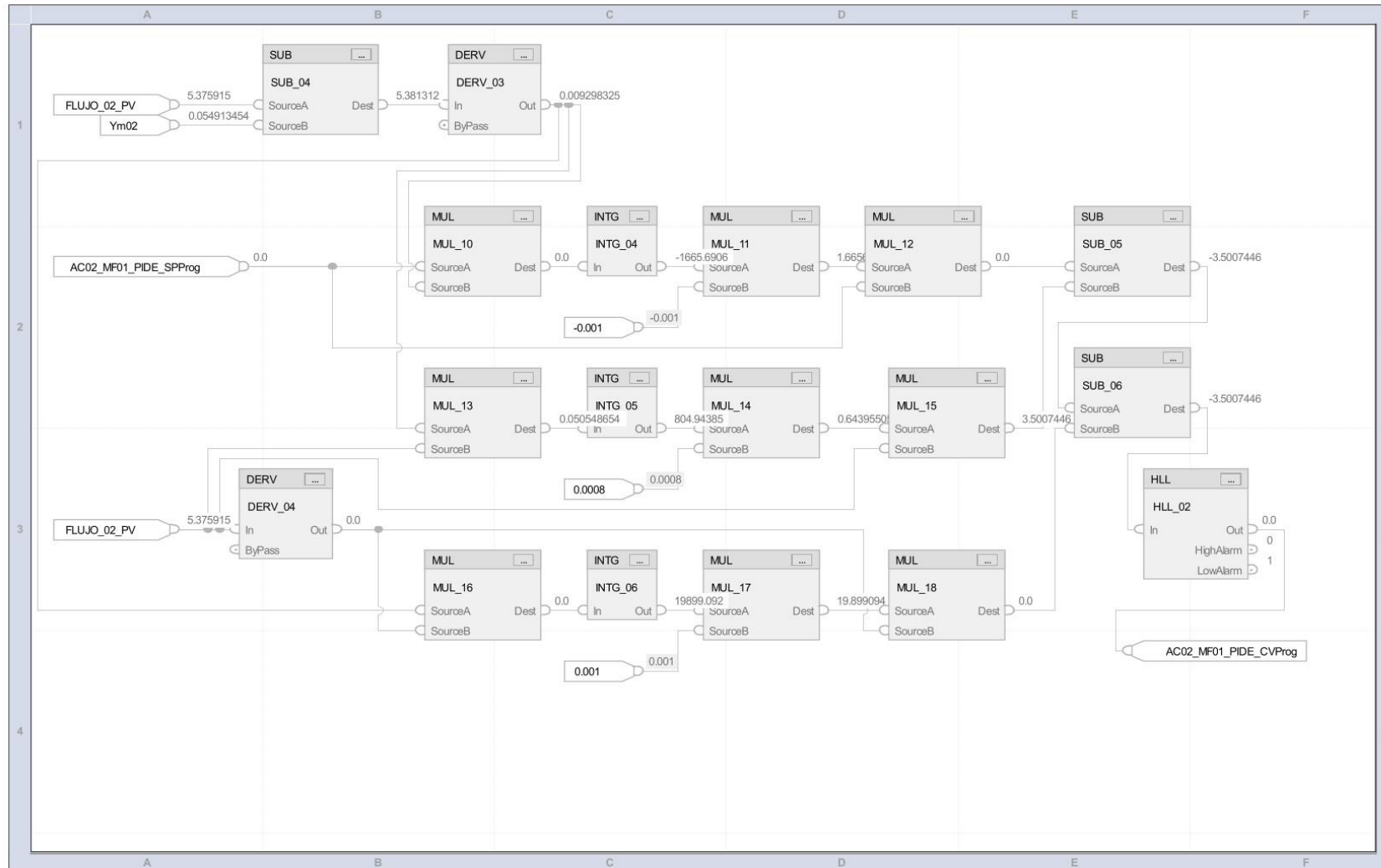
1756 Backplane, 1756-A10

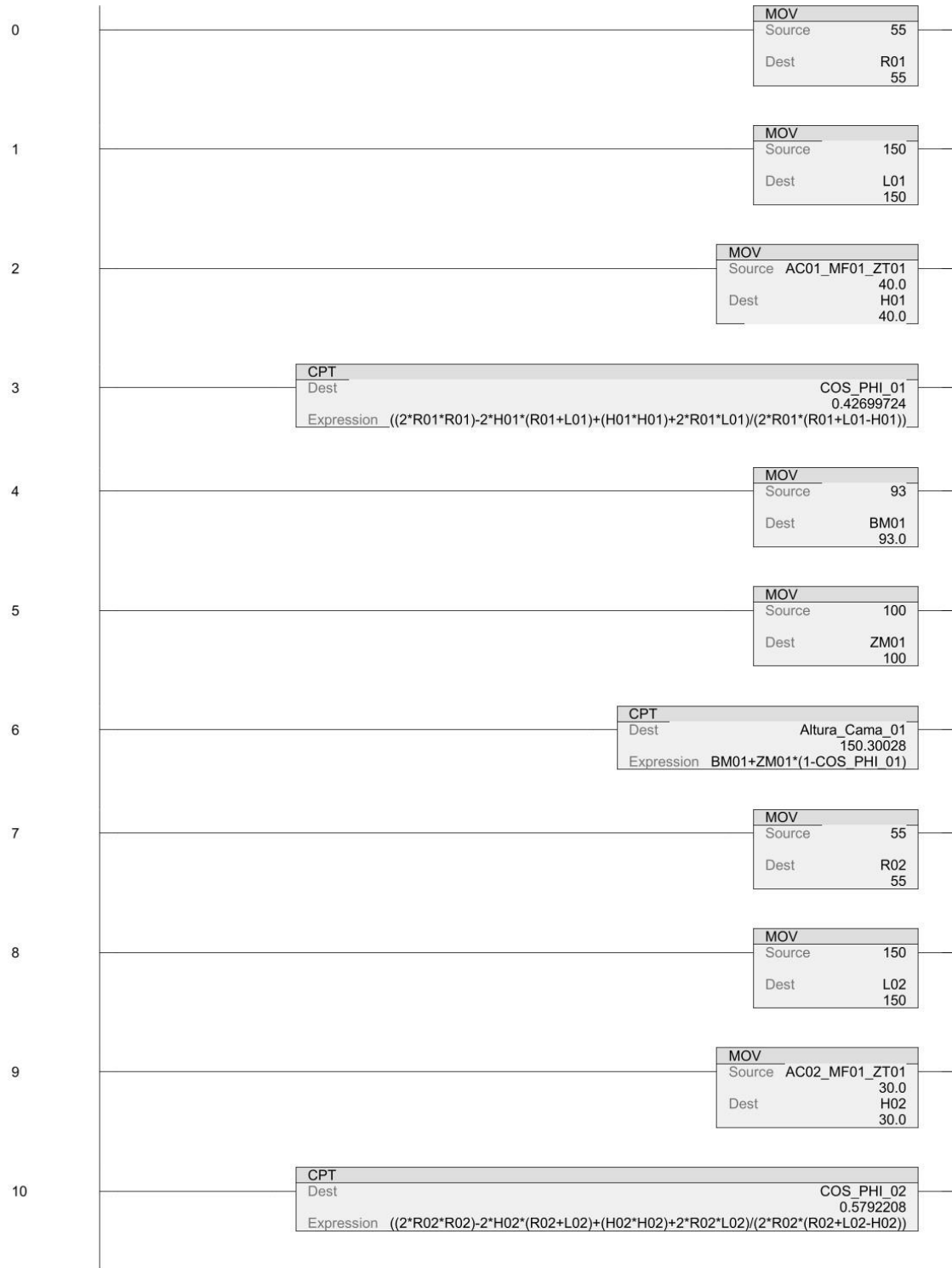
 [2] Emulate 5570 C01_Dosificador_de_Cabon_Rev01 [3] 1756-IF16 AnalogInput

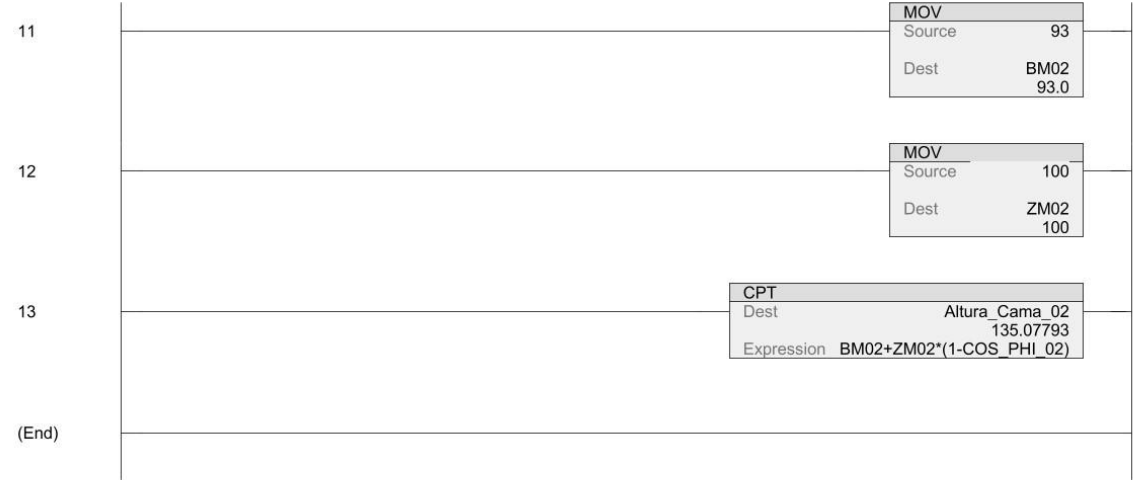












```

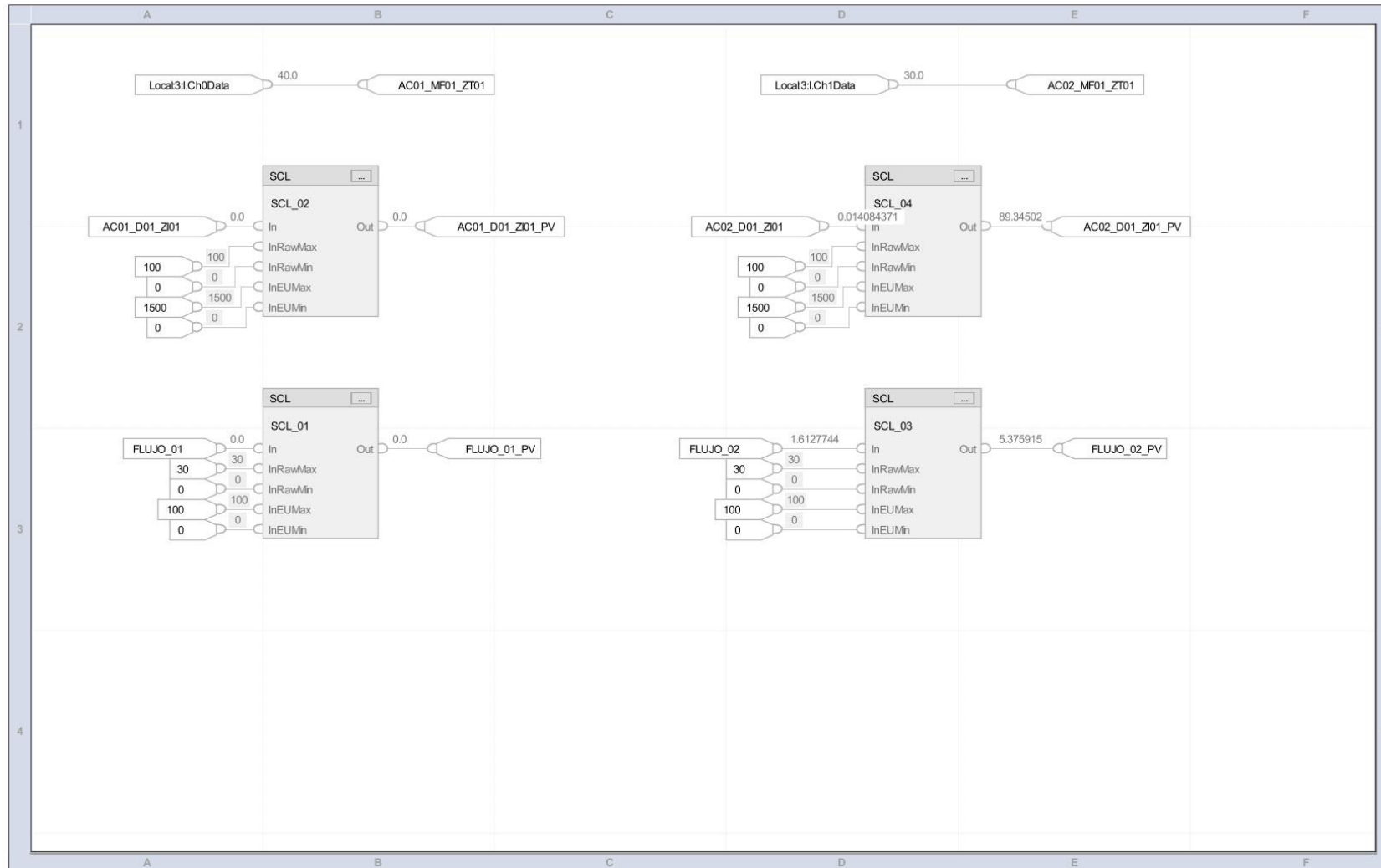
1 //*****TRANSPORTADOR 01*****
2 //Calculo de Area en funcion de la altura medida por transductor de posicion
3 //Base = base inferior de transportador de cadena
4 //a = altura de cama donde no detecta sensor de posicion
5 //b = altura donde el area es rectangular
6 //d = altura total del area rectangular
7 //c = altura del area trapezoidal
8
9 //Medidas del formador de cama:
10 Base01:=0.92; //Base de transportador en metros
11 a01:=BM01/1000; // Altura donde no detecta el transductor en metros
12 b01:=0.022; // en metros
13 d01:=a01+b01; // Altura en del area rectangular en metros
14 c01:=0.078; // en metros (y01)
15 x01:=0.13; // Distancia de formador de cama
16
17 //Conversion de altura de cama a metros:
18 Altura_Cama_01_m:=Altura_Cama_01/1000;
19
20 //Tangente de theta
21 tng_theta01:=TAN(c01/x01);
22
23 //Calculo del Area en funcion de la altura de cama:
24
25 IF Altura_Cama_01_m <= a01 then
26     Area_01:=Base01*a01;
27 else
28     if Altura_Cama_01_m>a01 AND Altura_Cama_01_m<=d01 then
29         Area_01:=Base01*Altura_Cama_01_m;
30     else
31         if Altura_Cama_01_m>d01 then
32             Area_01:=(Base01*Altura_Cama_01_m)-2*((Altura_Cama_01_m-d01)*(Altura_Cama_01_m-d01)/
(2*tng_theta01));
33         else
34             end_if;
35         end_if;
36     end_if;
37
38 //Calculo de flujo masico
39 //k01 = coeficiente de conversion de RPM a m/s
40 //Densidad = densidad del carbon en kg/m3 dato de laboratorio
41 //AC01_D01_ZI01_PV = FEEDBACK de velocidad de motor en RPM
42 k01:=0.0000342;
43 Densidad:=1190;
44 //Flujo Masico transportador 01
45 FLUJO_01:=AC01_D01_ZI01_PV*k01*Densidad*Area_01; //en Kg/s
46 //flujo Masico en Tn/h
47 FLUJO_01:=FLUJO_01*3.6; //[Tn/h]
48
49 //*****TRANSPORTADOR 02*****
50 //Calculo de Area en funcion de la altura medida por transductor de posicion
51 //Base = base inferior de transportador de cadena
52 //a = altura de cama donde no detecta sensor de posicion
53 //b = altura donde el area es rectangular
54 //d = altura total del area rectangular
55 //c = altura del area trapezoidal
56
57 //Medidas del formador de cama:
58 Base02:=0.92; //Base de transportador en metros
59 a02:=BM02/1000; // Altura donde no detecta el transductor en metros
60 b02:=0.022; // en metros
61 d02 :=a01+b01; // Altura en del area rectangular en metros

```

```

62 c02:=0.078; // en metros (y01)
63 x02:=0.13; // Distancia de formador de cama
64
65 //Conversion de altura de cama a metros:
66 Altura_Cama_02_m:=Altura_Cama_02/1000;
67
68 //Tangente de theta
69 tng_theta02:=TAN(c02/x02);
70
71 //Calculo del Area en funcion de la altura de cama:
72
73 IF Altura_Cama_02_m <= a02 then
74     Area_02:=Base02*a02;
75 else
76     if Altura_Cama_02_m>a02 AND Altura_Cama_02_m<=d02 then
77         Area_02:=Base02*Altura_Cama_02_m;
78     else
79         if Altura_Cama_02_m>d02 then
80             Area_02:=(Base02*Altura_Cama_02_m)-2*((Altura_Cama_02_m-d02)*(Altura_Cama_02_m-d02)/
(2*tng_theta02));
81         else
82             end_if;
83         end_if;
84     end_if;
85
86 //Calculo de flujo masico
87 //k01 = coeficiente de conversion de RPM a m/s
88 //Densidad = densidad del carbon en kg/m3 dato de laboratorio
89 //AC01_D01_ZI01_PV = FEEDBACK de velocidad de motor en RPM
90 k02:=0.0000342;
91 Densidad:=1190;
92 //Flujo Masico transportador 01
93 FLUJO_02:=AC02_D01_ZI01_PV*k02*Densidad*Area_02; //en Kg/s
94 //flujo Masico en Tn/h
95 FLUJO_02:=FLUJO_02*3.6; //[Tn/h]

```



C01_SIMULACION - Function Block Diagram

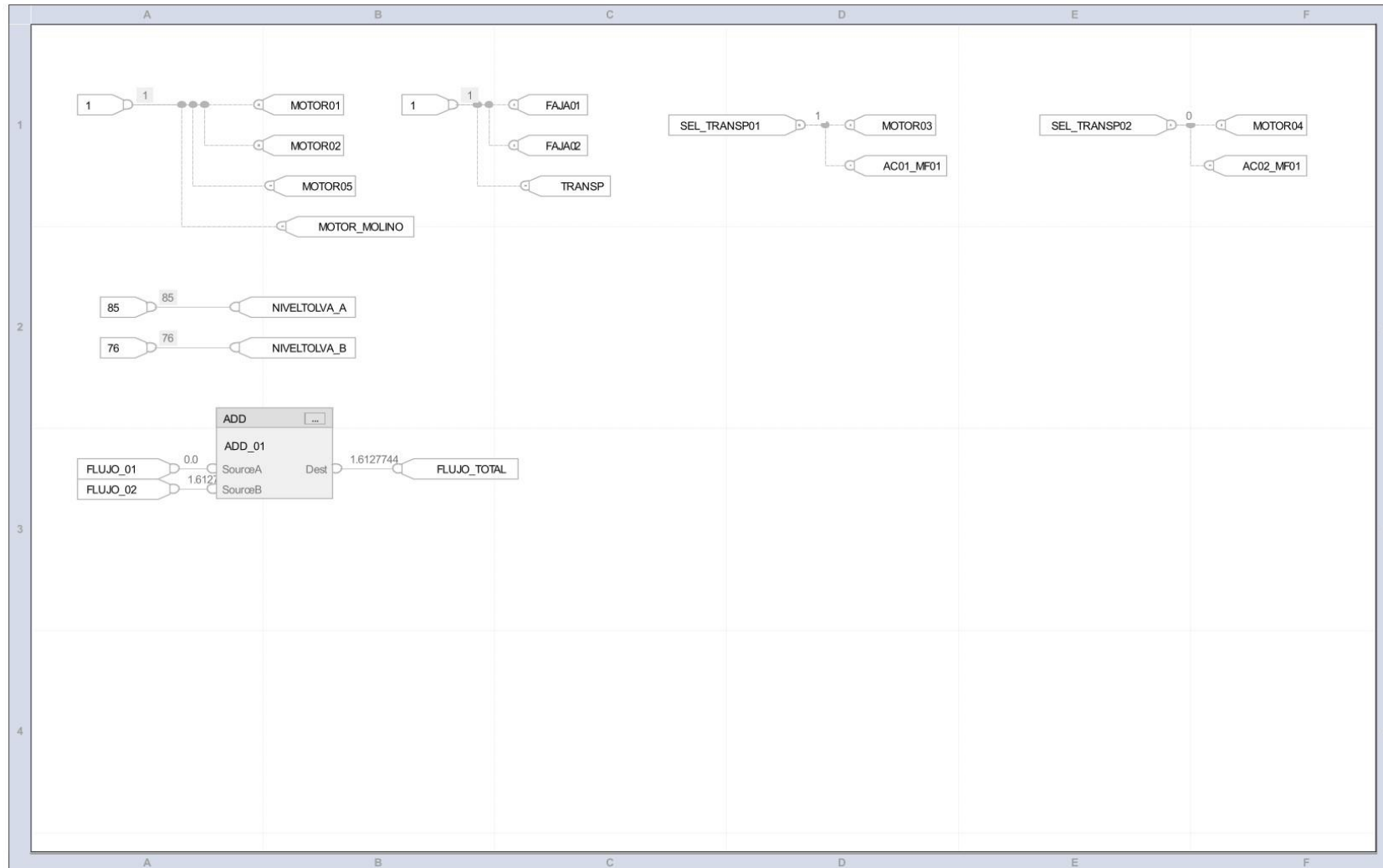
C01_Dosificador_de_Cabon_Rev01:MainTask:MainProgram

1 of 1 total sheets in routine

Page 11

10/14/2024 8:56:51 AM

C01_Dosificador_de_Cabon_MRAC_rev03.ACD



MainRoutine - Ladder Diagram

C01_Dosificador_de_Cabon_Rev01:MainTask:MainProgram

Total number of rungs in routine: 4

Page 12

10/14/2024 8:56:51 AM

C01_Dosificador_de_Cabon_MRAC_rev03.ACD

