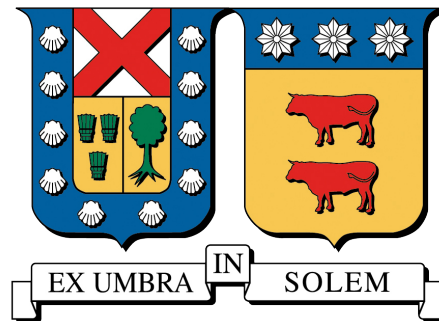


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA
VALPARAISO - CHILE



**"SIMULACIÓN SIMIT DE UN PROCESO DE MOLIENDA MINERA
PARA EVALUAR ESTRATEGIAS DE CONTROL SIL CON PCS7".**

BETSABÉ ELGUETA STUARDO

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL EN ELECTRÓNICA**

PROFESOR GUÍA : MANUEL OLIVARES
CORREFERENTE : INNOMOTICS S.A.

MARZO 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Simulación SIMIT de un proceso de molienda minera para evaluar estrategias de control SIL con PCS7.

Nombre del candidato(a): Betsabé Andrea del Carmen Elgueta Stuardo

Carrera / Grado: Ingeniería civil electrónica / Ingeniera civil electrónica

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Manuel Olivares Salinas

Yo, _____, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

En los anexos hay información privada de la empresa Innomotics S.A.

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha:

; Firma:

Manuel Olivares S.

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 08/08/2025 ; Firma:

[Firma manuscrita]

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

A mi familia

Por estar siempre presente y darme las herramientas para seguir avanzando.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi profesor guía por su paciencia, consejos y ayuda en la estructuración de esta memoria. A la empresa correferente, Innomotics, por brindarme la oportunidad de trabajar con ellos y acceder a programas especializados que han sido clave en mi formación como ingeniera.

En particular, quiero expresar mi gratitud a Marcos Correia por responder todas mis dudas y ayudarme a cumplir los objetivos establecidos en este trabajo. A Carlos Herмосilla, por su constante preocupación y apoyo en la coordinación de reuniones y el establecimiento de contacto con personas clave para el avance del proyecto. Y a Marcos Tarifeño, por su labor como correferente evaluador.

A mis padres, por hacer todo lo posible para brindarme oportunidades y enseñarme que en la vida los sueños están al alcance de nuestras decisiones. A mis hermanos, Eduardo Hernani y Eduardo Andrés, por ser un apoyo incondicional y llenar mi vida de alegría.

A mis amigos Mireya, Ignacio, Matías, Britney, Sebastián y Diego, por haber sido mi grupo de apoyo durante estos siete años. Mireya, por ser la primera amiga que el destino puso en mi camino el primer día de la JIM, incluso antes de que comenzaran las clases, y que hoy es una de mis amigas más cercanas. Ignacio, por las risas compartidas y las largas ventanas tomando tecito y galletas. Matías y Britney, por su constante apoyo en los ramos y su disposición para organizar viajes en cinco minutos. Sebastián y Diego, por su compañía y amistad a lo largo de esta etapa.

A mis queridas amigas de la infancia, Fiorella y Camila, por su constante presencia en mi vida. Gracias por ser mi apoyo incondicional, por ayudarme a superar los momentos más difíciles y por compartir conmigo los momentos de mayor felicidad.

A mi querida mascota Arashi, por acompañar cada noche de estudio durante la pandemia. Gracias por tu presencia silenciosa y reconfortante, que transformaba las horas más intensas en momentos de calma. Por ser esa promesa de 10 años que, con su simple existencia, logra mejorar cada día, llenándolo de amor y ternura.

Finalmente, a mi yo de 17 años, que tomó la decisión de estudiar Ingeniería Civil Electrónica en la UTFSM. Porque, a pesar de las dificultades, logró construir una vida llena de aprendizajes y desafíos que hoy se reflejan en este logro. Gracias por confiar en tus sueños y perseverar, incluso cuando el futuro parecía incierto.

A todos los mencionados, y a quienes de alguna manera contribuyeron en este proceso, mi más sincero agradecimiento.

Glosario

- **SIMIT**: Herramienta de software desarrollada por Siemens para simular y probar sistemas de automatización industrial.
- **SIL**: Software-in-the-Loop, técnica de simulación en la que se ejecuta software de control en un entorno simulado para probar su funcionalidad y rendimiento.
- **HIL**: Hardware-in-the-Loop, técnica de simulación que conecta hardware real a un modelo simulado para pruebas y validación.
- **DCS**: Sistema de Control Distribuido, utilizado para gestionar y supervisar múltiples dispositivos y procesos en la industria.
- **PCS7**: Process Control System 7, sistema de automatización industrial desarrollado por Siemens para el control de procesos complejos.
- **Molino SAG**: Semi-Autogenous Grinding, tipo de molino utilizado en la minería.
- **Molino AG**: Molino Autógeno, tipo de molino utilizado en la minería que utiliza el propio mineral como medio de molienda, sin necesidad de bolas de acero u otros elementos.
- **SABC-A**: Acrónimo de Semi-Autogenous Ball mill Crusher - A configuration. Es un tipo de configuración de línea de molienda que incluye un molino SAG (semi-autógeno), un molino de bolas y un chancador (crusher) intermedio, dispuesto en un circuito cerrado. La letra ^A indica que el chancador se encuentra en la recirculación del producto grueso del molino SAG, antes de ser enviado nuevamente al molino SAG o al molino de bolas. Esta configuración se utiliza para mejorar la eficiencia de la molienda y el control del tamaño de partícula.
- **SIMIT CTE**: Component Type Editor, extensión de SIMIT que permite editar y crear componentes.
- **Harnero o Zaranda**: Equipo utilizado para separar materiales por tamaño, compuesto por una superficie con aberturas que permite el paso de partículas más pequeñas y retiene las más grandes.
- **WinCC**: Plataforma de visualización y supervisión (HMI/SCADA) de Siemens que permite monitorear y controlar procesos industriales en tiempo real
- **HMI**: Human Machine Interface, proporciona una interfaz gráfica para monitorear y controlar procesos industriales.
- **Single Station ES/OS**: Sistema de ingeniería y operación que combina las funciones de configuración y supervisión en una sola estación.
- **SIMOCODE**: Sistema de gestión y protección de motores desarrollado por Siemens. Proporciona funciones como protección contra sobrecarga, control de motores y monitoreo de parámetros eléctricos.
- **SIPROTEC**: Familia de dispositivos de protección y control para sistemas eléctricos, desarrollados por Siemens. Se utilizan en subestaciones y redes eléctricas para garantizar la seguridad y estabilidad del sistema.

-
- **SINAMICS:** Familia de convertidores de frecuencia y sistemas de accionamiento desarrollados por Siemens. Se utilizan para controlar la velocidad y el par de motores eléctricos en aplicaciones industriales.
 - **ROBICON:** Marca de sistemas de accionamiento y control de motores, conocida por sus soluciones de alta potencia y aplicaciones especializadas en la industria.
 - **TCP/IP:** Transmission Control Protocol/Internet Protocol, conjunto de protocolos de comunicación utilizados para la transmisión de datos en redes. Es la base de la comunicación en Internet y en redes industriales.
 - **CAT:** Computer-Aided Testing, uso de software y herramientas computacionales para realizar pruebas y validaciones en sistemas industriales o de ingeniería.
 - **Virtual Commissioning:** Comisionamiento Virtual, técnica que utiliza modelos digitales para simular y validar sistemas de automatización antes de su implementación física.
 - **Feeders:** Alimentadores, dispositivos utilizados para transportar y dosificar materiales en procesos industriales, como en la minería.
 - **I/O:** Input/Output, término utilizado para describir los dispositivos o señales que permiten la comunicación entre un sistema de control y el mundo exterior.
 - **OPC:** Open Platform Communications, estándar de comunicación industrial que permite la interoperabilidad entre dispositivos y sistemas de diferentes fabricantes.
 - **APC:** Advanced Process Control, conjunto de técnicas y algoritmos utilizados para simular y controlar procesos industriales complejos.
 - **PID:** Proportional-Integral-Derivative, controlador utilizado en sistemas de automatización para mantener una variable de proceso (como temperatura, presión o flujo) en un valor deseado.
 - **Interventor:** Dispositivo o sistema que monitorea y controla procesos industriales, asegurando que operen dentro de los parámetros establecidos.
 - **CFC:** Continuous Function Chart, lenguaje gráfico de programación utilizado en sistemas de automatización para diseñar lógicas de control.
 - **SFC:** Sequential Function Chart, lenguaje gráfico de programación utilizado para definir secuencias de operación en sistemas de control.
 - **SHM:** Memoria Compartida, técnica de comunicación entre procesos o sistemas en la que se utiliza una región de memoria común para intercambiar datos.

Resumen

El presente trabajo aborda el desarrollo de una simulación en **SIMIT** para un proceso de molienda en una planta concentradora, con el objetivo de evaluar estrategias de control en un entorno **Software-in-the-Loop (SIL)** utilizando **PCS7**. Actualmente, el modelo del molino SAG en la simulación de la planta es estático, lo que limita su capacidad de representar adecuadamente las interacciones dinámicas del proceso.

Para abordar esta limitación, se implementa un modelo dinámico basado en ecuaciones de balance de masa, validado a partir de datos experimentales y bibliografía especializada. Se integran submodelos de molienda, clasificación y transporte de masa para mejorar la precisión del sistema. Además, se configura la interconexión con el **DCS PCS7**, permitiendo la simulación en lazo cerrado para evaluar el desempeño del control aplicado. Los resultados demuestran que la integración de un modelo dinámico del molino SAG mejora la fidelidad de la simulación, proporcionando una herramienta robusta para la validación y optimización de estrategias de control antes de su implementación en planta.

En el primer capítulo se contextualiza el problema, resaltando la necesidad de desarrollar un modelo dinámico del molino SAG en la simulación de una planta concentradora, actualmente limitada a señales constantes. Se establecen los objetivos de la memoria, que incluyen la implementación de una simulación en SIMIT, su integración con la planta digital y la evaluación de estrategias de control en un entorno SIL con PCS7. Además, se revisa el estado del arte sobre procesos de molienda, técnicas de simulación y el uso de plataformas como SIMIT y PCS7 para el modelado y control de plantas mineras. Finalmente, se presenta el modelo dinámico propuesto, detallando su estructura y fundamentos teóricos.

En el segundo capítulo se desarrolla un modelo dinámico del molino SAG en **Simulink**, considerando entradas como el flujo de mineral, agua, diésel y lechada de cal. Se implementan ecuaciones de balance de masa junto con submodelos de molienda, clasificación, transporte de masa y consumo de potencia. Se obtienen parámetros claves como tasas de rechazo, coeficientes de molienda y parámetros de descarga a partir de datos experimentales. La simulación en **MATLAB & Simulink** permite validar el comportamiento del molino antes de su implementación en **SIMIT**.

En el tercer capítulo se describe la implementación del modelo dinámico del molino SAG en **SIMIT**, integrando los submodelos desarrollados en **Simulink**. Se explica la estructura del entorno de simulación, la creación de componentes en **SIMIT CTE** y la configuración de variables para representar el proceso de molienda. También se detalla la integración con la simulación existente de la planta concentradora, permitiendo evaluar el impacto de la mejora en el control del proceso.

En el cuarto capítulo se aborda la interconexión del modelo de molienda con el sistema de control **PCS7**, configurando un esquema **SIL** para la simulación en lazo cerrado. Se establecen las conexiones entre **SIMIT** y **PCS7**, permitiendo la interacción entre los modelos y las señales de control. Se realizan pruebas individuales y en conjunto, evaluando la respuesta del sistema ante diferentes condiciones operativas.

En el último capítulo se presentan las conclusiones principales del trabajo y se sugieren líneas de trabajo futuro, incluyendo la optimización del modelo, la incorporación de más variables de proceso y la implementación de un control avanzado basado en los resultados obtenidos.

Abstract

This thesis focuses on the development of a simulation in **SIMIT** for a grinding process in a concentrator plant, aiming to evaluate control strategies in a **Software-in-the-Loop (SIL)** environment using **PCS7**. Currently, the SAG mill model used in the plant simulation is static, which limits its ability to accurately represent the dynamic interactions of the process.

To address this limitation, a dynamic model based on mass balance equations is implemented and validated using experimental data and specialized literature. Submodels for grinding, classification, and mass transport are integrated to enhance the accuracy of the system. Additionally, the model is connected to **DCS PCS7**, enabling closed-loop simulation to evaluate control performance. The results show that incorporating a dynamic SAG mill model improves simulation fidelity, providing a robust tool for validating and optimizing control strategies before their implementation in the plant.

The first chapter contextualizes the problem, emphasizing the need for a dynamic SAG mill model in the simulation of a concentrator plant, which is currently limited to constant signals. The objectives of this thesis are outlined, including the implementation of a simulation in **SIMIT**, its integration with the digital plant, and the evaluation of control strategies in an **SIL** environment with **PCS7**. Additionally, a literature review is conducted on grinding processes, simulation techniques, and the use of platforms such as **SIMIT** and **PCS7** for modeling and control in mining plants. Finally, the proposed dynamic model is introduced, detailing its structure and theoretical foundations.

The second chapter presents the development of a dynamic SAG mill model in **Simulink**, considering inputs such as ore flow, water, diesel, and lime slurry. Mass balance equations are implemented along with submodels for grinding, classification, mass transport, and power consumption. Key parameters such as rejection rates, grinding coefficients, and discharge characteristics are obtained from experimental data. The simulation in **MATLAB & Simulink** allows for model validation before its implementation in **SIMIT**.

The third chapter describes the implementation of the dynamic SAG mill model in **SIMIT**, integrating the submodels developed in **Simulink**. It explains the structure of the simulation environment, the creation of components in **SIMIT CTE**, and the configuration of variables to represent the grinding process. The integration with the existing concentrator plant simulation is also detailed, enabling an assessment of how this improvement enhances process control.

The fourth chapter focuses on the interconnection of the grinding model with the **PCS7** control system, setting up an **SIL** configuration for closed-loop simulation. The necessary connections between **SIMIT** and **PCS7** are established, allowing interaction between the models and control signals. Individual and combined tests are conducted to evaluate the system's response under various operating conditions.

The final chapter presents the main conclusions of the study and suggests future research directions, including model optimization, the incorporation of additional process variables, and the implementation of advanced control strategies based on the obtained results.

Índice general

1. Introducción	15
1.1. Problema a resolver y objetivos	15
1.2. Requerimientos funcionales	15
1.3. Estado del arte	16
1.3.1. Esquemas de simulación de procesos HIL, SIL	19
1.3.2. Aplicaciones SIL de la herramienta de simulación SIMIT	20
1.3.3. Descripción de la simulación SIMIT de la planta concentradora	22
1.3.4. Modelo dinámico del proceso de molienda SAG	26
1.3.5. Submodelos de molienda	28
1.3.6. Balance dinámico	31
1.3.7. Filosofía de control DCS PCS7 de la planta concentradora	31
2. Simulación Matlab & Simulink del proceso de molienda SAG	38
2.1. Diagrama de bloques del modelo dinámico del Molino SAG	38
2.1.1. Entradas del modelo	39
2.1.2. Salidas del modelo	40
2.1.3. Consideraciones adicionales	40
2.2. Obtención de parámetros del modelo a partir de datos experimentales	40
2.2.1. Determinar parámetros k y A	43
2.2.2. Determinar tasas específicas de molienda k^E y tasas de rechazo c	43
2.2.3. Determinar parámetro Ψ de la descarga de mineral	48
2.2.4. Determinar los parámetros α_o y λ_l de la descarga del agua	48
2.2.5. Disminuir tamaño del sistema	48
2.3. Respuestas por Simulación del modelo dinámico del molino SAG	49
3. Simulación de procesos en SIMIT	56
3.1. Estructura y Componentes SIMIT	56
3.1.1. Simulación SIMIT de un estanque	62
3.2. Simulación SIMIT del modelo dinámico del molino SAG	65
3.3. Integración de la simulación SIMIT con la simulación de la planta concentradora	67
3.3.1. Conexión de SIMIT con Matlab&Simulink usando SHM y SyncSiMa	68
3.3.2. SIMIT CTE para creación de componentes en lenguaje de texto	78
4. Configuración de un Esquema SIL SIMIT – DCS PCS7	84
4.1. Interconexión de modelos SIMIT con variables DCS PCS7	84
4.1.1. Conexión estanque a las señales PCS7	84

4.1.2. Conexión molino SAG a las señales PCS7	86
4.1.3. Control PID en PCS7 del nivel del estanque simulado en SIMIT	90
4.2. Interconexión de la planta concentradora actualizada con variables DCS PCS7	91
4.2.1. Aplicación de la filosofía de control	92
4.3. Pruebas realizadas	92
4.3.1. Pruebas realizadas en el estanque	92
4.3.2. Pruebas del modelo del molino aislado en Simulink en lazo abierto	93
4.3.3. Pruebas del modelo del molino aislado conectado a SIMIT usando SHM	105
4.3.4. Pruebas del molino conectado a las señales de la planta en lazo cerrado	110
5. Análisis de resultados y conclusiones	134
5.1. Análisis de resultados	134
5.1.1. Conexión SyncSiMa para sincronizar SHM con Matlab&Simulink	135
5.1.2. Comparación de modelos aislados de molino SAG	135
5.1.3. Conexión del molino a la planta	136
5.2. Conclusiones	137
5.3. Trabajo futuro	138
6. Anexos	139
6.1. Diagrama de control de alimentación y descarga del molino SAG de la empresa	139
6.2. Código de programación del Molino SAG en Simulink de 12 granulometrías	142
6.3. Código de programación del Molino SAG en Simulink de 3 granulometrías	144
6.4. Código de Cyclic Calculation del Molino SAG en SIMIT CTE	146
6.5. Código para graficar datos .csv de PCS7 en MATLAB del molino SAG	149

Índice de tablas

2.1. Definición de intervalos de tamaños de partículas y tamaño representativo . . .	41
2.2. Puntos establecidos en los gráficos para realizar una linealización por tramos . .	45
2.3. Distribución granulométrica	46
3.1. Parámetros utilizados en el modelo del estanque	65
4.1. Señales utilizadas en el modelo del estanque.	85
4.2. Señales utilizadas en la conexión del modelo SAG a PCS7	87
5.1. Comparación de señales en las tres pruebas realizadas	136

Índice de figuras

1.1. Esquemas de simulación de procesos HIL y SIL en SIMIT. Fuente: Siemens S.A, “Simulación con SIMIT del Virtual Commissioning a los OTS”, 2020, pág:11.	20
1.2. Diagrama de arquitectura de conexión en simulación SIL de SIMIT.	21
1.3. Esquema de la planta concentradora simulada en SIMIT.	23
1.4. Línea 1 de Molienda en WinCC.	24
1.5. Foto de carpetas SIMIT.	24
1.6. Visualización de un transmisor de flujo en carpeta Molienda.	25
1.7. Plant view de PCS7 planta concentradora.	25
1.8. Diagrama de bloques del molino SAG.	27
1.9. Esquema lazo de control de entrada.	32
1.10. Esquema lazo de control de salida.	33
1.11. Ventanas de Plant View y Component View en SIMATIC Manager.	35
1.12. Configuración de Hardware en SIMATIC Manager.	36
1.13. Ventana CFC.	36
2.1. Modelo molino SAG en Simulink.	39
2.2. Diagrama de flujo y balance Concentradora A2 Chuquicamata, Fuente: [1] R.P. Orellana Araya, “Modelo, control y simulador de planta de molienda semiautógena y molienda secundaria”, 2010, pág. 120.	42
2.3. Distribución granulométrica alimentación SAG 17.	44
2.4. Distribución granulométrica descarga SAG 17.	44
2.5. Comportamiento de la variable M_P en una hora.	50
2.6. Comportamiento de la variable J en una hora.	51
2.7. Comportamiento de la variable H_m en una hora.	51
2.8. Comportamiento de la variable W_A en una hora.	52
2.9. Comportamiento de la variable R en una hora.	52
2.10. Comportamiento de la variable P_ast en una hora.	53
2.11. Comportamiento de la variable P en una hora.	53
2.12. Comportamiento de la variable Peso en una hora.	54
3.1. New project.	56
3.2. Interfaz principal de SIMIT SP.	57
3.3. Compilación ventanas Task card.	59
3.4. Estructura del proyecto.	60
3.5. Ventana de componentes y gráficas utilizados.	61
3.6. Esquema del sistema de estanque simple.	62
3.7. Macro del modelo del estanque en SIMIT.	64

3.8. Modelo del estanque en SIMIT.	64
3.9. Macro Molino.	66
3.10. Molino simplificado para trabajar con bloques simples en SIMIT.	66
3.11. Fuente: Siemens AG, "SIMIT Shared Memory Coupling with MATLAB", Entry ID: 109761656, V1.0, 11/2018, pág. 5.	67
3.12. Configuración del modo síncrono en SIMIT.	68
3.13. Configuración del proyecto para habilitar SHM.	69
3.14. Definición de entradas y salidas en SHM.	69
3.15. Conexión de señales de entrada y salida a SHM.	70
3.16. Código SHM encabezado.	71
3.17. Entradas y salidas SHM.cpp	72
3.18. Funcionalidad SHM.	73
3.19. Configuración del bloque "Assertion" en Simulink.	74
3.20. Simulink SHM.	75
3.21. Interfaz de SyncSiMa en operación.	76
3.22. Modelo de molino SAG en Simulink usando SHM.	77
3.23. Ventana crear componente.	78
3.24. Interfaz principal SIMIT CTE.	79
3.25. Connectors SIMIT CTE.	81
3.26. Estados SIMIT CTE.	82
3.27. Inicialización de variables SIMIT CTE.	82
3.28. Basic symbol Molino SAG en SIMIT CTE.	83
4.1. Esquema de la conexión estanque a PCS7.	84
4.2. Conexión estanque a PCS7.	86
4.3. Esquema general de la conexión molino SAG a PCS7.	86
4.4. Harnero.	88
4.5. Señal molino.	88
4.6. Conexión del molino SAG a la planta mediante SHM.	89
4.7. Conexión del molino SAG a la planta.	90
4.8. Controlador PID 3210LIC600 en WinCC.	90
4.9. Bloque CFC del controlador del estanque.	91
4.10. Prueba nivel de estanque.	93
4.11. Comportamiento de la variable M_P con $F = 1750 t/h$.	94
4.12. Comportamiento de la variable M_P con $F = 250 t/h$.	94
4.13. Comportamiento de la variable J con $F = 1750 t/h$.	94
4.14. Comportamiento de la variable J con $F = 250 t/h$.	94
4.15. Comportamiento de la variable H_m con $F = 1750 t/h$.	94
4.16. Comportamiento de la variable H_m con $F = 250 t/h$.	94
4.17. Comportamiento de la variable R con $F = 1750 t/h$.	95
4.18. Comportamiento de la variable R con $F = 250 t/h$.	95
4.19. Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 1750 t/h$.	95
4.20. Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 250 t/h$.	95
4.21. Comportamiento de la variable P con $F = 1750 t/h$.	95
4.22. Comportamiento de la variable P con $F = 250 t/h$.	95
4.23. Comportamiento de la variable M_P a un aumento de $F = 1600$.	96
4.24. Comportamiento de la variable M_P a una disminución de $F = 1000$.	96
4.25. Comportamiento de la variable J a un aumento de $F=1600$.	96

4.26. Comportamiento de la variable J a una disminución de $F = 1000$.	96
4.27. Comportamiento de la variable H_m a un aumento de $F = 1600$.	97
4.28. Comportamiento de la variable H_m a una disminución de $F = 1000$.	97
4.29. Comportamiento de la variable R a un aumento de $F = 1600$.	97
4.30. Comportamiento de la variable R a una disminución de $F = 1000$.	97
4.31. Comportamiento de la variable $Peso$ a un aumento de $F = 1600$.	97
4.32. Comportamiento de la variable $Peso$ a una disminución de $F = 1000$.	97
4.33. Comportamiento de la variable P a un aumento de $F = 1600$.	98
4.34. Comportamiento de la variable P a una disminución de $F = 1000$.	98
4.35. Comportamiento de la variable M_P del modelo 3×3 .	98
4.36. Comportamiento de la variable M_P del modelo 12×12 .	98
4.37. Comportamiento de la variable J del modelo 3×3 .	99
4.38. Comportamiento de la variable J del modelo 12×12 .	99
4.39. Comportamiento de la variable H_m del modelo 3×3 .	99
4.40. Comportamiento de la variable H_m del modelo 12×12 .	99
4.41. Comportamiento de la variable R del modelo 3×3 .	99
4.42. Comportamiento de la variable R con del modelo 12×12 .	99
4.43. Comportamiento de la variable $Peso$ del modelo 3×3 .	100
4.44. Comportamiento de la variable $Peso$ del modelo 12×12 .	100
4.45. Comportamiento de la variable P del modelo 3×3 .	100
4.46. Comportamiento de la variable P del modelo 12×12 .	100
4.47. Comportamiento de la variable M_P con $F = 1750 t/h$.	101
4.48. Comportamiento de la variable M_P con $F = 250 t/h$.	101
4.49. Comportamiento de la variable J con $F = 1750 t/h$.	101
4.50. Comportamiento de la variable J con $F = 250 t/h$.	101
4.51. Comportamiento de la variable H_m con $F = 1750 t/h$.	101
4.52. Comportamiento de la variable H_m con $F = 250 t/h$.	101
4.53. Comportamiento de la variable R con $F = 1750 t/h$.	102
4.54. Comportamiento de la variable R con $F = 250 t/h$.	102
4.55. Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 1750 t/h$.	102
4.56. Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 250 t/h$.	102
4.57. Comportamiento de la variable P con $F = 1750 t/h$.	102
4.58. Comportamiento de la variable P con $F = 250 t/h$.	102
4.59. Comportamiento de la variable M_P a un aumento de F .	103
4.60. Comportamiento de la variable M_P a una disminución de F .	103
4.61. Comportamiento de la variable J a un aumento de F .	103
4.62. Comportamiento de la variable J a una disminución de F .	103
4.63. Comportamiento de la variable H_m a un aumento de F .	104
4.64. Comportamiento de la variable H_m a una disminución de F .	104
4.65. Comportamiento de la variable R a un aumento de F .	104
4.66. Comportamiento de la variable R a una disminución de F .	104
4.67. Comportamiento de la variable $Peso$ a un aumento de F .	104
4.68. Comportamiento de la variable $Peso$ a una disminución de F .	104
4.69. Comportamiento de la variable P a un aumento de F .	105
4.70. Comportamiento de la variable P a una disminución de F .	105
4.71. Comportamiento de la variable M_P del modelo 3×3 .	105
4.72. Comportamiento de la variable M_P del modelo 12×12 .	105
4.73. Comportamiento de la variable J del modelo 3×3 .	106

4.74. Comportamiento de la variable J del modelo 12×12 .	106
4.75. Comportamiento de la variable H_m del modelo 3×3 .	106
4.76. Comportamiento de la variable H_m del modelo 12×12 .	106
4.77. Comportamiento de la variable R del modelo 3×3 .	106
4.78. Comportamiento de la variable R con del modelo 12×12 .	106
4.79. Comportamiento de la variable $Peso$ del modelo 3×3 .	107
4.80. Comportamiento de la variable $Peso$ del modelo 12×12 .	107
4.81. Comportamiento de la variable P del modelo 3×3 .	107
4.82. Comportamiento de la variable P del modelo 12×12 .	107
4.83. Comportamiento de la variable DW del modelo 3×3 .	107
4.84. Comportamiento de la variable DW del modelo 12×12 .	107
4.85. Comportamiento de la variable M_P a un aumento de F .	108
4.86. Comportamiento de la variable M_P a una disminución de F .	108
4.87. Comportamiento de la variable J a un aumento de F .	108
4.88. Comportamiento de la variable J a una disminución de F .	108
4.89. Comportamiento de la variable H_m a un aumento de F .	109
4.90. Comportamiento de la variable H_m a una disminución de F .	109
4.91. Comportamiento de la variable R a un aumento de F .	109
4.92. Comportamiento de la variable R a una disminución de F .	109
4.93. Comportamiento de la variable $Peso$ a un aumento de F .	109
4.94. Comportamiento de la variable $Peso$ a una disminución de F .	109
4.95. Comportamiento de la variable P a una aumento de F .	110
4.96. Comportamiento de la variable P a una disminución de F .	110
4.97. Comportamiento de la variable DW a una aumento de F .	110
4.98. Comportamiento de la variable DW a una disminución de F .	110
4.99. Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.	112
4.100Comportamiento flujo Agua de proceso.	112
4.101Comportamiento flujo Lechada de cal.	113
4.102Comportamiento de la variable Nivel estanque.	113
4.103Comportamiento de la variable Densidad de pulpa de salida.	114
4.104Comportamiento de las Bombas de salida.	114
4.105Comportamiento de la variable $Peso$.	115
4.106Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.	116
4.107Comportamiento flujo Agua de proceso.	116
4.108Comportamiento flujo Lechada de cal.	117
4.109Comportamiento de la variable Nivel estanque.	117
4.110Comportamiento de la variable Densidad de pulpa de salida.	118
4.111Comportamiento de las Bombas de salida.	118
4.112Comportamiento de la variable $Peso$.	119
4.113Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.	120
4.114Comportamiento flujo Agua de proceso.	120
4.115Comportamiento flujo Lechada de cal.	121
4.116Comportamiento de la variable Nivel estanque.	121
4.117Comportamiento de la variable Densidad de salida.	122
4.118Comportamiento de las Bombas de salida.	122
4.119Comportamiento de la variable $Peso$.	123
4.120Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.	124
4.121Comportamiento flujo Agua de proceso.	124

4.122Comportamiento flujo Lechada de cal.	125
4.123Comportamiento de la variable Nivel estanque.	125
4.124Comportamiento de la variable Densidad de salida.	126
4.125Comportamiento de las Bombas de salida.	126
4.126Comportamiento de la variable <i>Peso</i> .	127
4.127Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.	128
4.128Comportamiento flujo Agua de proceso.	128
4.129Comportamiento flujo Lechada de cal.	129
4.130Comportamiento de la variable Nivel estanque.	129
4.131Comportamiento de la variable Densidad de salida.	130
4.132Comportamiento de las Bombas de salida.	130
4.133Comportamiento de la variable <i>Peso</i> .	131
4.134Comportamiento de las señales Setpoint feeders, Agua de proceso, Lechada de cal y <i>Peso</i> .	132
4.135Comportamiento de las señales Nivel de estanque, Densidad y Funcionamiento de las bombas.	133
6.1. Lazos de control de entrada	140
6.2. Lazos de control de salida	141

1 | Introducción

1.1. Problema a resolver y objetivos

El problema que busca resolver este trabajo de memoria es la ausencia de un modelo dinámico funcional del molino SAG en la simulación de la planta concentradora de la empresa Innomotics. Actualmente, el molino SAG simulado opera bajo la premisa de señales constantes enviadas al sistema de control distribuido (DCS). Esta simplificación limita la capacidad de la simulación para representar fielmente la interacción de los distintos flujos de entrada, como el mineral, bolas, pebbles, agua, lechada de cal y diésel, así como su impacto en el peso del molino y otras variables operacionales.

El objetivo de esta memoria es desarrollar una simulación SIMIT de un proceso de molienda, integrarla a la simulación de una planta concentradora previamente desarrollada por Innomotics, validar su funcionamiento individual e integrado, y su conexión con un DCS PCS-7 de Siemens. Las etapas son:

- Desarrollar una simulación dinámica del molino SAG de una planta minera en la plataforma SIMIT, para conocer el peso de este y el flujo de pebbles a partir de los flujos de entrada y salida.
- Validar la simulación aislada del molino, mediante pruebas y comparaciones con datos reales.
- Integrar la simulación del molino SAG a la planta concentradora digital.
- Configurar un esquema SIL con DCS – PCS7 para evaluar el funcionamiento en lazo cerrado aplicando la filosofía de control correspondiente, desarrollada por Innomotics.

1.2. Requerimientos funcionales

Se exige como requisito funcional que la simulación de molino SAG cuente con 4 señales de entradas: flujo de mineral, agua, diesel y lechada de cal. Las salidas deben considerar el peso del molino en unidades de toneladas t .

En cuanto al flujo de pebbles, este depende del harnero que lo selecciona, el cual ya se encuentra simulado por la empresa, por lo que se identificará la señal de retorno de pebbles. Vale destacar que se deberá obtener una señal de flujo de descarga del molino que se conecte al harnero para que este cumpla con su propósito.

1.3. Estado del arte

Procesos mineros

Es conocido que la industria minera chilena es muy amplia y tiene muchos procesos. En este proyecto se abordará el proceso de molienda, dado que el trabajo se enfoca en la simulación de un molino SAG. Se explicarán los procesos de chancado y molienda para dar un mejor entendimiento del contexto.

Chancado

Una vez que el material rocoso ha sido extraído, este se moviliza a la zona de chancado, cuyo objetivo principal es reducir su tamaño para facilitar el procesamiento posterior. Para lograrlo, el material debe pasar por una serie de procesos hasta obtener un producto final con rocas de tamaño similar, menor a una pulgada. El proceso comienza con un chancador que recibe el material por la parte superior y lo tritura mediante la aplicación de fuerzas mecánicas. Dependiendo del tipo de chancador (de mandíbula, giratorio, de cono, o de impacto), las rocas se comprimen, aplastan o fracturan hasta alcanzar la granulometría deseada. El material chancado se clasifica y se transporta para su procesamiento posterior, asegurando que el tamaño uniforme de las partículas optimice la eficiencia en etapas como la molienda.

Molienda

El proceso de molienda en la minería reduce el tamaño del mineral proveniente del chancado para alcanzar una granulometría máxima de 180 micrones, permitiendo la liberación de los minerales valiosos. La molienda se realiza en grandes equipos giratorios como molinos de barras y de bolas, donde el mineral se mezcla con agua y reactivos para formar una pulpa. En la molienda convencional, se usa primero un molino de barras y luego uno de bolas. El molino SAG (Semiautógeno) es una innovación que permite una molienda más eficiente, ya que el mineral se reduce por el impacto de las rocas y bolas de acero en su interior, este molino gira y hace caer en forma de cascada las bolas de acero y el material a moler, optimizando así el proceso de molienda.

El correcto funcionamiento del molino SAG depende de diversas variables que afectan su rendimiento y eficiencia. Estas variables incluyen, entre otras, la carga de mineral y bolas dentro del molino, la velocidad de giro del molino, la densidad de la pulpa en el interior del molino, y la granulometría del mineral de alimentación. La optimización de estas variables es crucial para asegurar una operación eficiente del molino y una molienda efectiva del mineral, preparándolo adecuadamente para la etapa de flotación.

Simulación

Las simulaciones juegan un papel fundamental en diversos campos, siendo especialmente útil en ingeniería, al permitir modelar escenarios y prever resultados antes de la implementación real. Esta herramienta brinda beneficios como la reducción de costos, el aumento de la eficiencia y la minimización de riesgos, al ofrecer un entorno seguro para experimentar y optimizar procesos.

En este contexto, el uso de plataformas especializadas como SIMIT se vuelve crucial. SIMIT es una herramienta de simulación especialmente diseñada para la industria, permitiendo la simulación completa de sistemas de automatización y control. Su integración con los sistemas

de control permite probar y validar el rendimiento de los procesos industriales de manera precisa y eficiente, lo que contribuye a la optimización del rendimiento y la calidad del producto final.

SIMIT

SIMIT es una plataforma de simulación integral utilizada por Innomotics para la simulación completa de sistemas de automatización y control. Permite probar y validar el rendimiento de los procesos industriales de manera precisa y eficiente. SIMIT se integra con los sistemas de control reales, lo que facilita la simulación de escenarios complejos y la optimización del rendimiento del sistema sin riesgos para la operación real.

Existen dos maneras de realizar una simulación en SIMIT:

- **Hardware in the Loop (HIL):** Se utilizan controladores físicos conectados a una simulación de la planta en SIMIT.
- **Software in the Loop (SIL):** Se utilizan controladores virtuales, como PLCSim o PCS7 conectados a una simulación de la planta en SIMIT.

La simulación cuenta con diferentes niveles:

1. **Simulación de AS:** Permite emular el PLC en el computador.
2. **Simulación de señales:** Implica importar la configuración del hardware y la tabla de símbolos, o configurar la SIMIT Unit, unidad necesaria para HIL.
3. **Simulación de equipos:** Se modela el funcionamiento de motores, sensores, transmisores, válvulas y otros dispositivos, incluyendo el comportamiento de la instrumentación ante fallas y alarmas.
4. **Simulación de procesos:** Se modela el comportamiento técnico del sistema, permitiendo programar y modelar variables físicas como flujo, presión, densidad, etc. Existe una simulación básica y una avanzada, basada en la simulación matemática de las variables.

Actualmente Innomotics cuenta con una licencia de SIMIT versión 10.2.

PCS7

PCS7 (Process Control System 7) de Siemens es un sistema de control distribuido (DCS) diseñado para la automatización y supervisión de procesos industriales complejos en diversos sectores como energía, minería e industria química. Reconocido por su capacidad para integrar y gestionar dispositivos de campo, PCS7 permite la recopilación y procesamiento eficiente de datos en tiempo real, así como la supervisión completa de operaciones de planta. Su interoperabilidad con herramientas como SIMIT amplía sus funcionalidades al facilitar la simulación avanzada y la optimización de sistemas industriales antes de su implementación física, reduciendo riesgos operativos y mejorando la toma de decisiones estratégicas.

PCS7 destaca por ofrecer robustez, escalabilidad y capacidades avanzadas que satisfacen las demandas de entornos industriales exigentes.

Actualmente Innomotics cuenta con una licencia de PCS7 versión 9.12.

WinCC

WinCC es una plataforma de visualización y supervisión (HMI/SCADA) de Siemens que permite monitorear y controlar procesos industriales en tiempo real. Integrado con PCS7, WinCC proporciona una interfaz gráfica que facilita la interacción con el sistema de control, permitiendo a los operadores visualizar el estado de los equipos, gestionar alarmas y realizar ajustes en los parámetros de operación.

WinCC cuenta con un conjunto completo de herramientas para el diseño de pantallas gráficas que representan visualmente los dispositivos y su estado dentro de la planta. Su sistema de alarmas permite detectar y notificar condiciones fuera de lo normal, mejorando la capacidad de respuesta y el diagnóstico en caso de fallas. Además, WinCC cuenta con un sistema de registro de datos, que permite almacenar información de proceso para análisis históricos, apoyando en la toma de decisiones y en la optimización continua del sistema.

Su integración con SIMIT permite a WinCC monitorear tanto datos reales provenientes de PCS7 como datos simulados, posibilitando pruebas de HMI y control en un entorno virtual antes de la puesta en marcha. Esto representa una ventaja significativa para la planificación y la seguridad de la operación, ya que permite ajustar la interfaz y el control de la planta en condiciones simuladas, reduciendo riesgos y optimizando el rendimiento desde las fases iniciales de un proyecto industrial.

Material Relacionado

Se realiza una revisión bibliográfica de distintos trabajos que modelan procesos mineros. “Modelo, control y simulador de planta de molienda semiautógena y molienda secundaria” [1] es un trabajo de título que describe el desarrollo de un modelo de una planta de molienda genérica capaz de simular en MATLAB&Simulink el comportamiento cualitativo de una planta real. El modelo abarca un circuito semi-autógeno (SAG) y un circuito de molienda secundaria con bolas, siguiendo una metodología estructurada que incluye la modelación de operaciones unitarias, la integración de modelos, el establecimiento de control de planta y su posterior simulación.

“Simulación y control de un circuito de molienda” [2] es un trabajo de tesis que se centra en la aplicación de técnicas avanzadas de simulación dinámica utilizando MATLAB&Simulink para mejorar el control y la comprensión de procesos en plantas de molienda, incluyendo los molinos SAG. Se desarrolla una biblioteca en Simulink utilizando modelos matemáticos validados, simulando un circuito de molienda basado en datos reales de la planta SAG de la División El Teniente de Codelco, ajustando parámetros para reflejar con precisión el comportamiento observado.

Estos trabajos basaron el modelo matemático del comportamiento del molino en trabajos relacionados de autores como Austin [3] y Amestica [4] primordialmente.

Siguiendo la misma línea de estudio, “Análisis dinámico de molino SAG” [5] se enfoca en la simulación dinámica de un molino SAG con motor de anillo utilizando la plataforma ANSYS. Se caracterizan los puntos críticos del equipo mediante análisis estructurales, modales y de colapso de entrehierro, estableciendo una metodología para el estudio de potenciales anomalías operacionales y fallas en estos equipos.

Además, se cuenta con el trabajo de título “Simulador en estado estacionario de circuitos de molienda SAG, para etapas tempranas de ingeniería” [6] en el cual se desarrolla un simulador en estado estacionario para circuitos de molienda SAG, enfocado en proporcionar estimaciones

precisas del rendimiento y requisitos de equipos en las primeras etapas de ingeniería de proyectos mineros. Utiliza modelos como el de Silva-Casali para la potencia mecánica y el de Starkey-Dobby para el consumo energético del molino SAG, junto con un modelo simplificado de balance poblacional, el simulador predice parámetros críticos como T80 y el porcentaje de pebbles. La metodología incluye validación mediante simulaciones en JKSimMet, ajustando los parámetros del modelo con datos de plantas en operación. Este estudio tiene una visión más metalúrgica que electrónica, pero ayuda en el entendimiento de las variables que afectan el funcionamiento de un molino SAG.

Amestica et al. [4] describe el modelo dinámico de un molino SAG, para ello separa el proceso en 4 submodelos; molienda, clasificación, transporte de masa y consumo de potencia. Interconecta las ecuaciones de cada submodelo para generar las ecuaciones de estado del balance dinámico del mineral y del agua.

Finalmente, “Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación” [3] es un libro que concentra los conocimientos del diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación. El texto se enfoca en la modelación matemática, técnicas de análisis experimental y simulación para el diseño y optimización de estos circuitos. Abarcando desde una introducción al proceso hasta el análisis detallado de la mecánica de fractura y métodos tradicionales de diseño de molinos. El texto avanza hacia el estudio de la cinética de la molienda y los ensayos de laboratorio para determinar parámetros empíricos clave. También abarca la molienda continua, métodos de escalamiento de resultados, clasificación y su aplicación en circuitos de molienda. Un estudio de casos integra estos conocimientos, culminando con un análisis detallado de la molienda SAG.

Para el estudio de SIMIT y PCS7 se consideran los textos “SIMIT Simulation V11.2 Getting Started” [7] y “SIMATICS PCS7 Process Control System” [8]. Estos manuales introducen y explican el funcionamiento general de las aplicaciones, proporcionando información técnica de los softwares y ejemplos de implementaciones sencillas para guiar el trabajo.

Adicionalmente, [9] y [10] ofrecen una descripción más profunda sobre el uso de SIMIT, complementados por [11], un informe técnico que aborda aspectos avanzados de la plataforma.

1.3.1. Esquemas de simulación de procesos HIL, SIL

Los procesos HIL (Hardware-in-the-Loop) y SIL (Software-in-the-Loop) son técnicas utilizadas para la simulación y validación de sistemas de control y automatización en entornos virtuales. A continuación, se describen ambos enfoques:

- SIL (Software-in-the-Loop): En este enfoque, la simulación se realiza completamente en software. El modelo del sistema, implementado en SIMIT, interactúa con el software de control sin necesidad de hardware real. La aplicación se ejecuta en un sistema de automatización virtual emulado, donde los datos del proyecto pueden importarse y reutilizarse sin requerir un controlador físico. Este método es útil en las primeras etapas del desarrollo, ya que permite verificar la funcionalidad del algoritmo de control y el modelo de proceso antes de su integración con hardware.
- HIL (Hardware-in-the-Loop): A diferencia del SIL, el proceso HIL incorpora hardware real en la simulación. Un sistema de automatización real, como un PLC, se conecta a la simulación para validar la interacción entre el software de control y los sistemas físicos. En

SIMIT, la integración con hardware se logra mediante SIMIT Unit, que permite conectar señales de entrada y salida (I/O) del controlador, así como dispositivos de campo como sensores y actuadores virtuales compatibles en protocolos de comunicación industrial (Profinet, Profibus, OPC, etc.). Los datos del proyecto pueden importarse y reutilizarse, lo que facilita la validación del sistema antes de su implementación en el entorno real.

1.3.1.1. Arquitectura de conexión de SIMIT

La plataforma SIMIT permite simular ambos modos, SIL y HIL, mediante la integración de sus modelos a través de una red de comunicación con los dispositivos de control. En el modo SIL, el modelo del proceso se ejecuta completamente dentro de SIMIT, y el control es gestionado por un controlador simulado, como un PLC o PCS7. Por otro lado, en el modo HIL, SIMIT se conecta a un SIMIT Unit, lo que permite la interacción con hardware real para llevar a cabo las pruebas y validaciones, garantizando una simulación más precisa de los sistemas físicos.

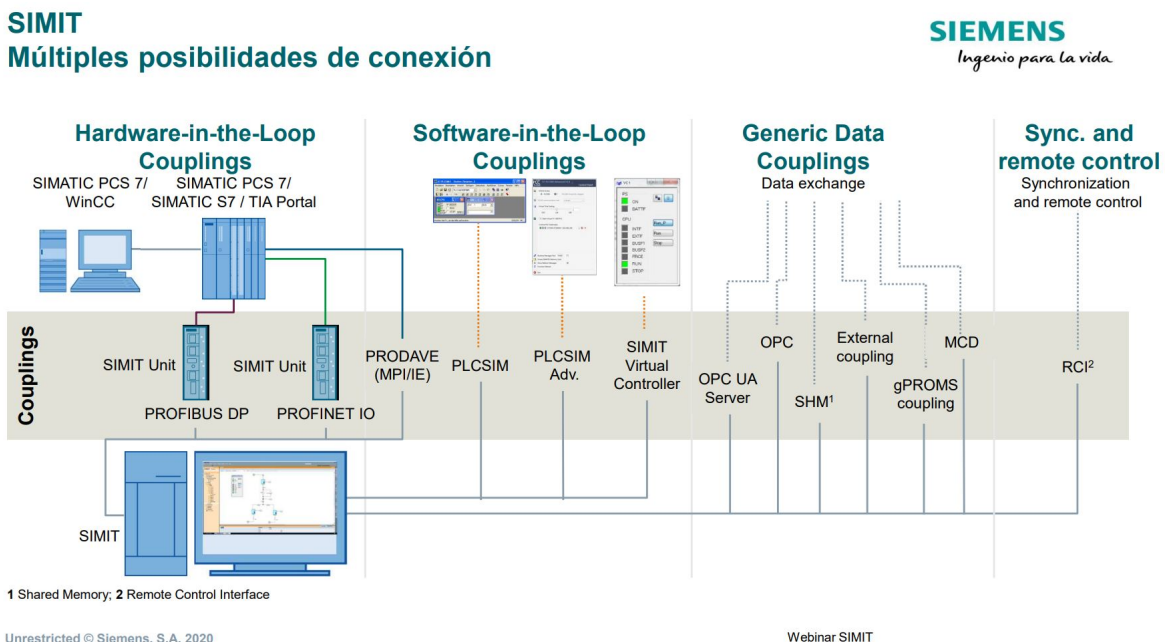


Figura 1.1: Esquemas de simulación de procesos HIL y SIL en SIMIT. Fuente: Siemens S.A, “Simulación con SIMIT del Virtual Commissioning a los OTS”, 2020, pág:11.

1.3.2. Aplicaciones SIL de la herramienta de simulación SIMIT

El modo SIL de SIMIT permite la simulación de procesos industriales completos sin necesidad de hardware físico, facilitando la validación y optimización de estrategias de control antes de su implementación en la planta real. Esta funcionalidad es clave para realizar pruebas seguras y eficientes en sistemas como el control de un molino SAG, minimizando errores y optimizando la puesta en marcha.

En una arquitectura de simulación SIL con SIMIT, se definen dos redes principales:

- **Terminal Bus:** Contiene todos los servidores y máquinas virtuales.

- **Plant Bus:** Permite la comunicación con los controladores del sistema.

SIMIT tiene acceso a ambas redes y en el caso de este trabajo, ejecuta dos *Virtual Controllers*, los cuales permiten la simulación del sistema de control. Adicionalmente, *Single Station* se comunica con los controladores a través del *Plant Bus*. En este esquema, toda la infraestructura bajo el *Plant Bus* es virtualizada por SIMIT.

En el caso de la línea de molienda 1, la comunicación de los controladores sigue la siguiente estructura:

- El controlador del SAG 1 (3210_001) se conecta a *FieldBus*.
- El controlador del proceso de molienda 1 (3210_101) se comunica con *FieldBus IO* y *FieldBus MCC*.

Estos buses de comunicación transmiten información entre PCS7 y los dispositivos de campo, como SIMOCODES, SIPROTECT, SINAMICS y ROBICON, que gestionan el monitoreo y control de motores y protecciones.

En este esquema, los controladores 3210_001 (SAG1) y 3210_101 (Molienda1) se comunican con SIMIT a través de TCP/IP, procesando las señales simuladas de forma similar a las señales del sistema físico real. Esta integración permite validar el control de los procesos industriales.

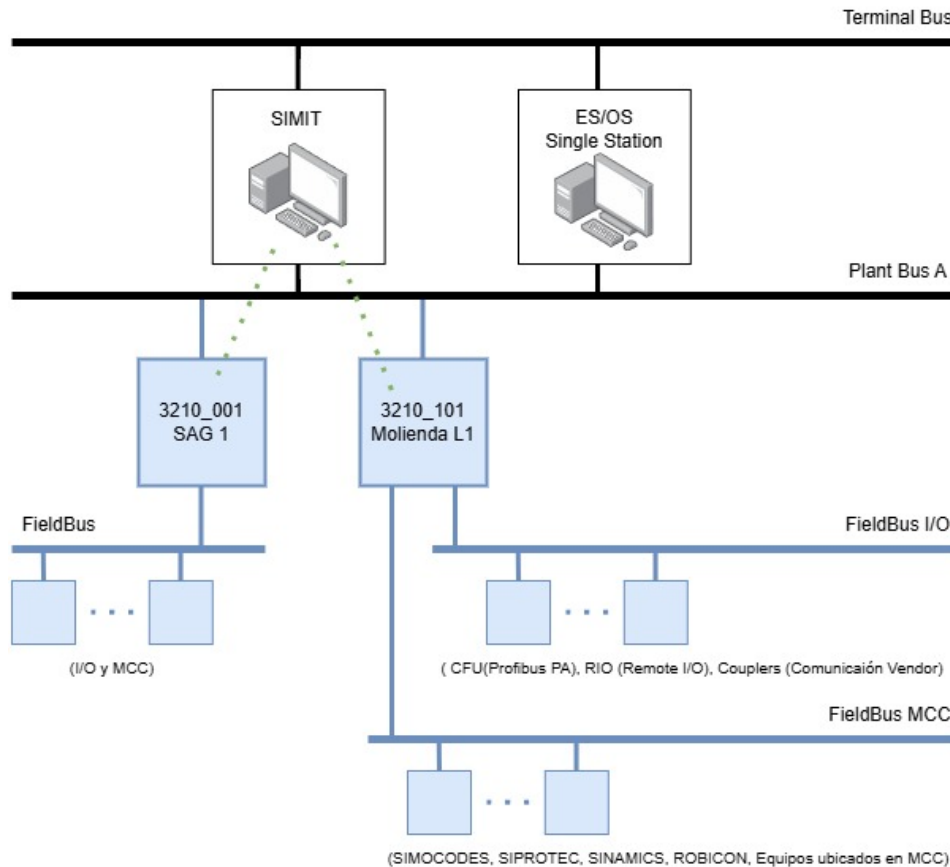


Figura 1.2: Diagrama de arquitectura de conexión en simulación SIL de SIMIT.

1.3.2.1. Flujo de comunicación

El flujo de comunicación inicia cuando SIMIT envía señales simuladas a los controladores PCS7 mediante TCP/IP. Luego, PCS7 procesa esta información y la distribuye a los buses de campo. A través de *FieldBus IO* y *FieldBus MCC*, los datos llegan a los dispositivos de campo, como actuadores y sensores, permitiendo una simulación completa del proceso industrial.

La integración de SIMIT con PCS7 ofrece múltiples ventajas, como la posibilidad de probar y ajustar la lógica de control sin afectar la operación real. Esto resulta fundamental para mejorar la eficiencia del proceso, reducir costos y minimizar el tiempo de puesta en marcha de nuevos sistemas o modificaciones.

1.3.3. Descripción de la simulación SIMIT de la planta concentradora

Actualmente, la empresa cuenta con una Simulación Básica de Proceso (BPS) en SIMIT de una planta concentradora de cobre, la cual modela su comportamiento y se conecta a un DCS simulado llamado PCS7 conectado mediante TCP/IP. La visualización de la simulación se realiza en WinCC.

La simulación pasó exitosamente las pruebas CAT; sin embargo, durante el Virtual Commissioning presentó complicaciones debido a la simplicidad del modelo del molino SAG. Como resultado, se ajustaron los parámetros de la simulación en función de los datos operativos de la planta real.

La planta concentradora simulada cuenta con una pila que acumula el material proveniente del proceso de chancado. Este material es dosificado mediante cuatro alimentadores (feeders), de los cuales solo dos operan simultáneamente según la demanda requerida por el molino SAG. El material que ingresa al molino SAG está compuesto por mineral chancado, bolas añadidas de manera controlada y “pebbles” o material recirculante. Aunque esta última variable está presente en la simulación, no se utiliza debido a que la sección de “pebbles” no está operativa. Estos componentes son transportados por una faja transportadora hasta el chute de alimentación del molino SAG, donde se incorpora agua de proceso, lechada de cal y diésel a la mezcla. Es importante destacar que la faja transportadora cuenta con un pesómetro, el cual informa el peso total del material que alimenta al molino SAG, el flujo másico es proporcional al peso*volumen de la correa.

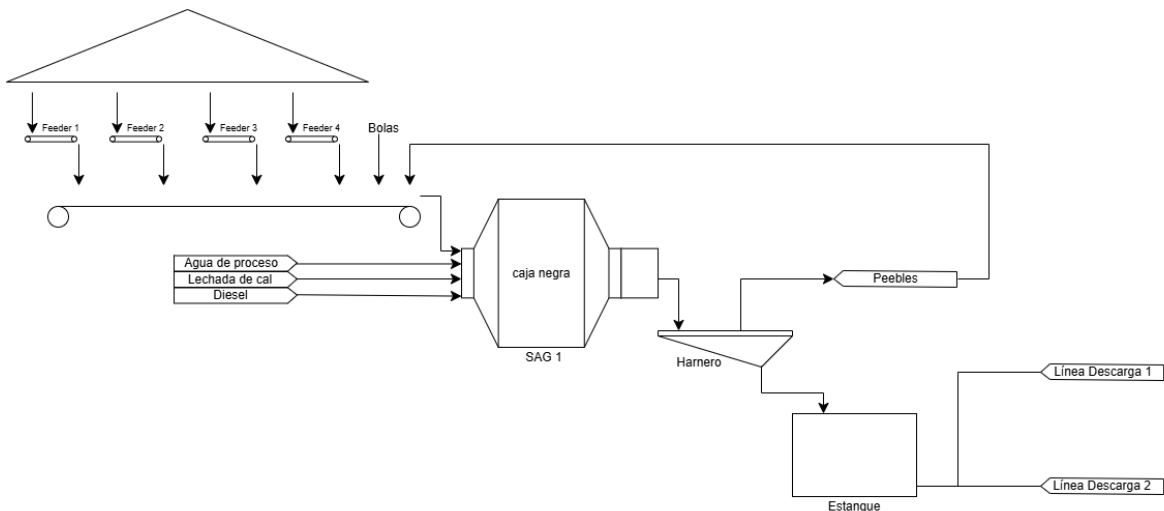


Figura 1.3: Esquema de la planta concentradora simulada en SIMIT.

Actualmente, el modelo del molino SAG no presenta un diseño funcional adecuado, ya que se basa en señales constantes escaladas según la velocidad del molino, las cuales se envían al DCS de la planta para permitir la simulación. El circuito simulado de la molienda SAG sigue la topología SABC-A, en la que el molino SAG descarga el material a un harnero que clasifica las partículas según su tamaño. El material de mayor tamaño es enviado a un chancador de pebbles para ser recirculado a la alimentación del molino SAG, específicamente a la faja transportadora. Mientras que el material más fino se dirige a un cajón de descarga, desde donde es impulsado por dos bombas hacia dos nidos de hidrociclones, cada uno conectado a un molino de bolas.

El material grueso separado por los hidrociclones se dirige al molino de bolas para ser procesado nuevamente y luego recirculado al cajón de descarga del molino SAG. El material más fino, por su parte, continúa hacia la siguiente etapa del proceso: flotación.

Como se muestra en la figura [1.3](#), la simulación en PCS7 se limita al control de carga y descarga del molino SAG. Por lo tanto, se incluye el proceso desde la dosificación de los feeders hasta las bombas ubicadas después del estanque de descarga del molino SAG. No se modelan el chancado de pebbles ni los hidrociclones asociados al molino de bolas.

A continuación, se presenta la HMI en WinCC del proceso de molienda, donde se visualizan los códigos de los componentes, como transmisores de flujo y controladores. En el harnero 3210SN001, se identifica la señal que se dirige hacia el chancado de pebbles 3220WIT018S1.

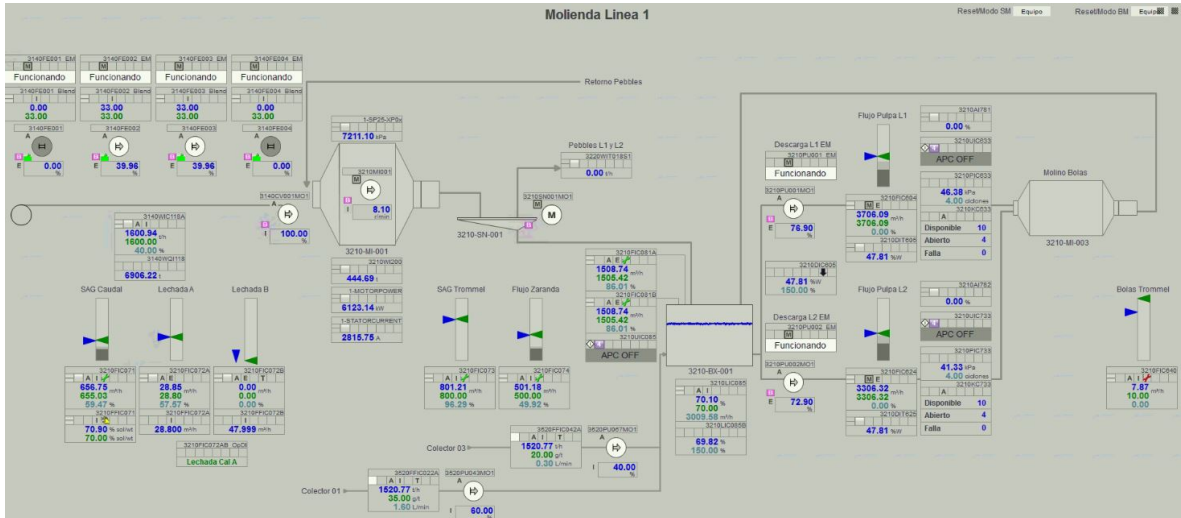


Figura 1.4: Línea 1 de Molienda en WinCC.

En cuanto al estado actual de la simulación en SIMIT, el proyecto cuenta con 7 carpetas y dos controladores virtuales. 3210_001 corresponde al controlador del molino SAG, y se encarga exclusivamente de gestionar las variables asociadas a este equipo, como la velocidad del molino, la potencia, el peso interno, y otros elementos relacionados con su operación directa. Por otro lado, el controlador 3210_101 corresponde al controlador del proceso de la línea de molienda, y está encargado de controlar el resto de las operaciones asociadas al área, incluyendo flujos de entrada y salida, instrumentación periférica, y la lógica de coordinación entre unidades del proceso. A continuación se muestra una figura con la información de las carpetas del proyecto en SIMIT.

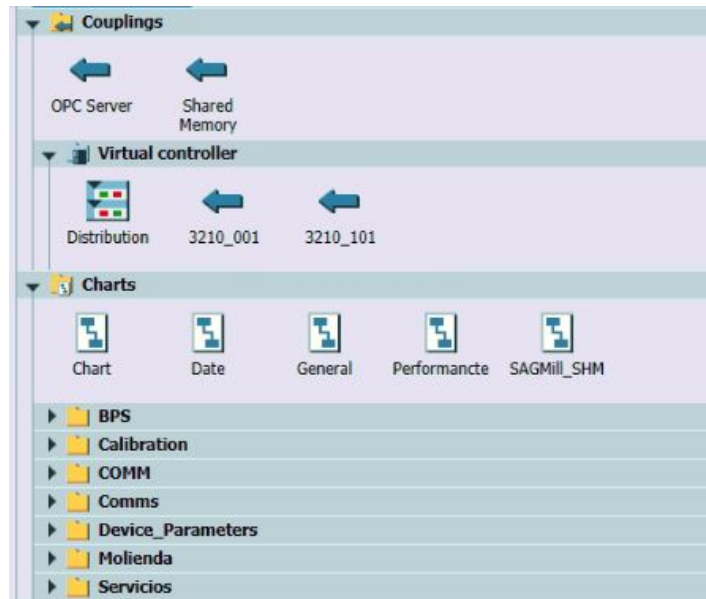


Figura 1.5: Foto de carpetas SIMIT.

Cada carpeta contiene información específica relacionada a su nombre. En BPS se desarrolla la

simulación del modelo de la planta, mientras que en otras carpetas, como Molienda, se agrupan los componentes e instrumentos a incorporar desde PCS7, junto con sus respectivas señales de comunicación.

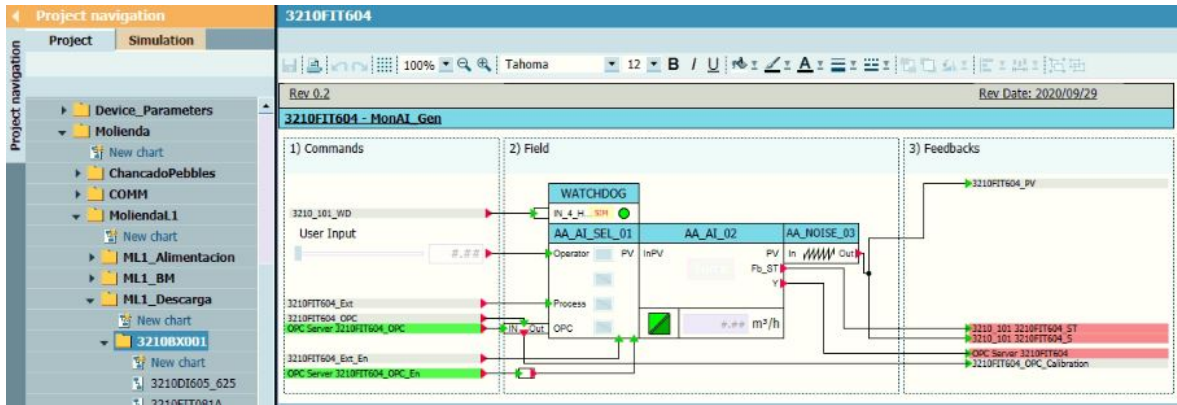


Figura 1.6: Visualización de un transmisor de flujo en carpeta Molienda.

La figura muestra un transmisor de flujo importado a SIMIT desde PCS7, junto con sus señales I/O de comunicación. Este componente puede operar con datos definidos por el operador (*Operator*), con señales del proceso (*Process*) en una simulación básica o con señales *OPC* en una simulación avanzada. Además, en la imagen se puede visualizar a la derecha una sección del instrumento dedicada a agregar ruido a las variables.

El proyecto en PCS7 cuenta con la siguiente representación de los componentes y sus controladores, de manera similar a SIMIT también se observan los 2 controladores mencionados y algunas carpetas en común.

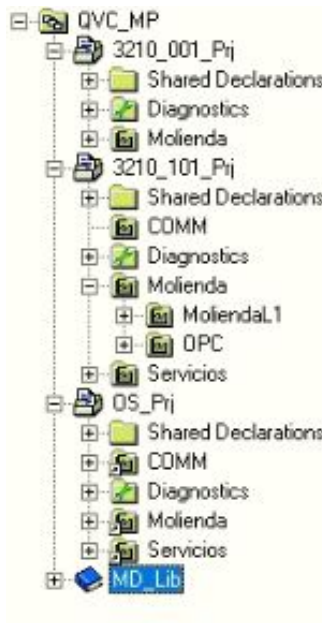


Figura 1.7: Plant view de PCS7 planta concentradora.

Se puede observar que el proyecto cuenta con tres secciones principales, los dos controladores y una sección dedicada a la estación de servicios OS_Prj. Cada carpeta cuenta con una subsección dedicada a Shared Declarations y Diagnostics

1.3.4. Modelo dinámico del proceso de molienda SAG

Existen diferentes tipos de molinos para realizar el proceso de molienda minera, entre ellos destacan tres tipos más utilizados, cada uno con un funcionamiento particular.

- Molino Autógeno (AG)
- Molino Semiautógeno (SAG)
- Molino de bolas o barras

Los molinos autógenos funcionan bajo el principio de solo utilizar el material ingresado en la alimentación para realizar la conminución. El proceso de molienda SAG se caracteriza por utilizar las propias colpas de mineral contenidas en la alimentación fresca para llevar a cabo la conminución, es decir, la reducción del tamaño de las partículas a través del impacto entre ellas. A diferencia de los molinos autógenos, en los molinos SAG se incorporan bolas de acero que complementan este proceso de molienda. Por otro lado, en los molinos de bolas o de barras, son exclusivamente estos elementos los que realizan la conminución del material.

El molino SAG está constituido por un cuerpo cilíndrico cónico con mayor diámetro que largo, puesto en forma horizontal y con un sistema de rotación en torno a su eje horizontal.

La alimentación fresca está constituida por el material que ingresa por primera vez al molino para ser procesado, la cual considera mineral de diferentes tamaños y agua agregada. Es por esto que más adelante se verá que la descarga de agua del molino depende del contenido de sólidos dentro de este.

Diferentes autores como [3], [4] y [12] han desarrollado modelos dinámicos del molino SAG, los cuales presentan una similitud en la identificación del sistema. En general, estos modelos describen un flujo de entrada hacia una cámara de molienda, conectada a una cámara de clasificación del material, la cual genera tanto el flujo de salida del molino como un flujo recirculante. Este último corresponde al material de mayor tamaño que no ha alcanzado la granulometría deseada y continúa circulando en el molino. La principal diferencia entre estos modelos corresponde a la representación de la potencia del molino.

En este trabajo se utilizará el modelo dinámico del molino SAG implementado por Amestica [4] considerando la ecuación de potencia de molino de Austin en 1990 [13]. Vale destacar que el sistema de Amestica considera únicamente dos entradas: el flujo de alimentación de sólidos, distribuido por intervalos de tamaño, y un flujo constante de agua. Sin embargo, el modelo a desarrollar deberá incluir dos entradas adicionales: diésel y lechada de cal, por lo que se evaluará la mejor forma de integrarlas.

Para entender el funcionamiento general de los flujos másicos a trabajar en el modelo se define el siguiente diagrama de bloques, mencionado anteriormente, el cual muestra los fenómenos o etapas principales que intervienen en el modelado. Específicamente se ilustra el flujo de material dentro del molino y las diferentes interacciones que se tienen en el proceso de molienda.

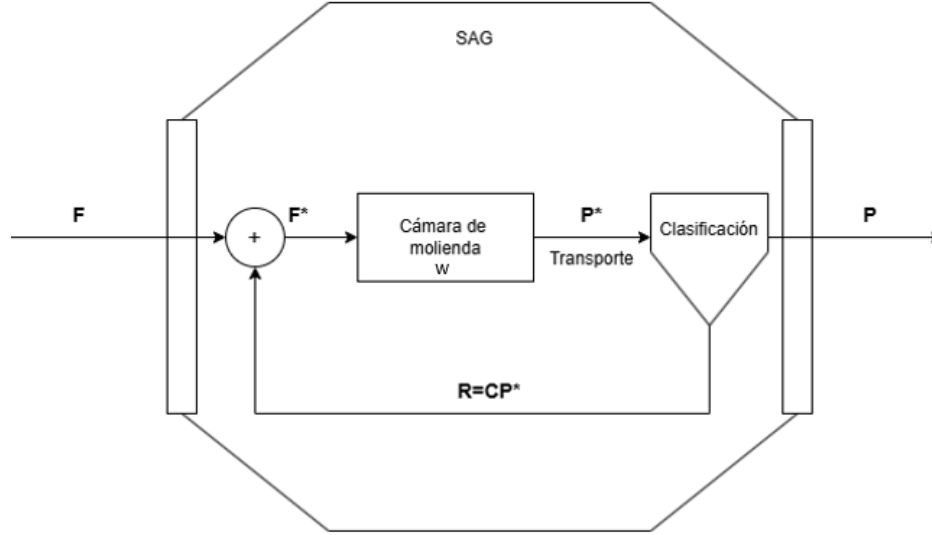


Figura 1.8: Diagrama de bloques del molino SAG.

- $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, representa el contenido de mineral dentro del molino por intervalos de tamaños.
- $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$, representa el flujo de alimentación de sólidos por intervalos de tamaños al molino.
- $f^* = (f_1^*, f_2^*, \dots, f_n^*)^T$, representa el flujo de alimentación de sólidos por intervalos de tamaños a la cámara de molienda.
- $p^* = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_n^*)^T$, representa el flujo de descarga de sólidos por intervalos de tamaños de la cámara de molienda.
- $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)^T$, representa el flujo de descarga de sólidos por intervalos de tamaños del molino.

Como se puede observar el diagrama solo representa el comportamiento de los sólidos.

1.3.4.1. Balance de masa

A continuación se detallan los flujos totales del sistema.

$$F = \sum_{i=1}^n f_i, \quad F^* = \sum_{i=1}^n f_i^*, \quad P = \sum_{i=1}^n p_i, \quad P^* = \sum_{i=1}^n p_i^*, \quad H_m = \sum_{i=1}^n w_i \quad (1.1)$$

$$R = \sum_{i=1}^n C \cdot P^* \quad (1.2)$$

Donde F representa el flujo total de alimentación de sólidos al molino. F^* representa el flujo total de alimentación a la cámara de molienda y de manera similar P^* representa la descarga total de esta. H_m representa el contenido de mineral dentro del molino en el tiempo, conocido

como Hold-up. P representa la descarga total del molino y R el total de material recirculante dentro del molino, no confundir con pebbles.

1.3.5. Submodelos de molienda

Améstica et al. (1996) [4] propone un modelo dinámico para molinos SAG basado en cuatro submodelos principales:

- Submodelo de molienda
- Submodelo de clasificación
- Submodelo de transporte de masa
- Submodelo de consumo de potencia

1.3.5.1. Submodelo de molienda

El submodelo de molienda describe el proceso de reducción de tamaño del mineral dentro de la cámara de molienda. Este proceso se modela matemáticamente mediante una matriz triangular inferior que relaciona la potencia consumida por el molino con la tasa de producción de finos. La expresión matemática que define este submodelo es:

$$Grinding = \frac{M_p}{H_m} \cdot R^{-1} \cdot K^E \cdot R \quad (1.3)$$

Donde:

- M_p representa el consumo de potencia del molino en kW.
- K^E es una matriz diagonal con las tasas específicas de molienda para cada intervalo de tamaño.
- R es una matriz triangular inferior conformada por unos.

Austin [3] establece una relación entre el hold-up del molino, las tasas de molienda y la potencia consumida, representada por la ecuación:

$$H_m \cdot k^A = M_p \cdot k^E \quad (1.4)$$

Siendo k^E un vector conformado por las tasas específicas de molienda y k^A las tasas de molienda acumuladas. Despejando k^E , se obtiene:

$$k^E = \frac{H_m}{M_p} \cdot k^A \quad (1.5)$$

Finalmente, $K^E = diag(k^E)$.

1.3.5.2. Submodelo de clasificación

El submodelo de clasificación describe el proceso mediante el cual el material que sale de la cámara de molienda es separado según su tamaño antes de ser descargado. Se modela a través de una matriz diagonal C , que contiene los coeficientes de rechazo para cada intervalo de tamaño i , de manera que $C = \text{diag}(c_1, c_2, \dots, c_i)$.

$$p = (I - C) \cdot p^* \quad (1.6)$$

Donde, p es el flujo de descarga de mineral del molino, p^* es el flujo de descarga de la cámara de molienda.

Esta ecuación se deriva de la relación $p_i = (1 - c_i) \cdot p^*$, donde cada piedra tiene una probabilidad de ser clasificada según su tamaño.

Además, permite modelar el material recirculante como,

$$r = C \cdot p^* \quad (1.7)$$

Este submodelo permite predecir cómo el material es clasificado y cuánto es retenido o descargado del molino.

1.3.5.3. Submodelo de transporte de masa

El submodelo de transporte de masa describe el balance dinámico de material dentro del molino. Se basa en la diferencia entre el flujo de entrada y el flujo de salida de la cámara de molienda para obtener el contenido de mineral H_m dentro de esta.

$$\frac{dH_m}{dt} = F^* - P^* \quad (1.8)$$

Amestica [14] asume una representación del flujo de descarga de la cámara de molienda en función del hold-up.

$$P^* = \Psi \cdot \sqrt{H_m} \quad (1.9)$$

Además, en estudios previos encuentra que para ciertos molinos pilotos la descarga acumulada de la cámara de molienda se puede modelar como $P^* = 29\sqrt{H_m}$, lo que refleja un comportamiento similar al de la descarga de líquidos.

En Améstica et al. 1993a se define el flujo de descarga de salida de la cámara de molienda para cada intervalo de tamaño como,

$$p^* = \frac{P^*}{H_m} \cdot w \quad (1.10)$$

Esto considerando que se asume una mezcla perfecta.

En cuanto a el contenido de agua dentro del molino, desde [14] se encontró por medio de datos experimentales que el flujo de descarga de agua del molino depende del Hold-up del mineral y se puede expresar como,

$$P_A = \left(\alpha_o + \frac{\lambda_l}{H_m^4} \right) \cdot W_A \quad (1.11)$$

Donde, α_o y λ_l corresponden a parámetros específicos de la descarga de agua del molino.

1.3.5.4. Submodelo de consumo de potencia

El submodelo de consumo de potencia describe la relación entre la potencia consumida por el molino y las variables operativas, como el tamaño del molino, la carga de mineral y la velocidad crítica de operación. Este submodelo se basa en la ecuación propuesta por Austin (1990) [13].

$$M_p = k \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (1 - A \cdot J) \cdot \frac{W}{V} \cdot (\phi_c) \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2^{9-10 \cdot \phi_c}} \right) \quad (1.12)$$

con,

$$\frac{W}{V} = [(1 - \varepsilon_b) \cdot (\rho_s/w_c) \cdot J + 0,6 \cdot J_b \cdot (\rho_b - \rho_s/w_c)] \quad (1.13)$$

donde:

- M_p es la potencia consumida por el molino en kW.
- D y L son el diámetro y la longitud del molino en metros.
- J es el porcentaje de volumen ocupado por el material en el molino.
- ϕ_c es la fracción de velocidad crítica del molino.
- k y A son parámetros experimentales del modelo.
- ε_b es la porosidad de la carga interna del molino.
- ρ_s es la densidad del mineral en t/m^3 .
- w_c es la relación masa agua/mineral del molino.
- J_B es el porcentaje de bolas de acero.
- ρ_b es la densidad de las bolas de acero en t/m^3 .

Este submodelo permite estimar la potencia requerida para operar el molino en función de las condiciones de carga y las dimensiones del equipo.

Vale destacar que la ecuación [1.12] difiere de la presentada en el texto de Amestica [4], ya que el cálculo de $\frac{W}{V}$ se expresa en función de los pesos estimados de las entradas, sin detallar el significado de $f(\phi)$. Esto sugiere que el autor ha realizado una adaptación de la ecuación de Austin (1990), pero no proporciona información adicional sobre los parámetros o datos utilizados para dicha adaptación.

1.3.6. Balance dinámico

El modelo dinámico del molino SAG se basa en un balance de masa para el mineral y el agua dentro del molino.

1.3.6.1. Balance dinámico de agua

El balance dinámico del hold up del agua corresponde a la diferencia del flujo de entrada con el flujo de salida.

$$\frac{dW_a}{dt} = F_A - P_A \quad (1.14)$$

donde F_A es el flujo de agua de entrada y P_A es el flujo de agua de salida representado en la ecuación [1.11](#).

1.3.6.2. Balance dinámico del mineral

El balance dinámico del mineral dentro de la cámara de molienda corresponde a la diferencia entre los flujos de entrada y salida de esta, considerando el efecto *Grinding* del submodelo de molienda.

$$\frac{dw}{dt} = f^* - p^* - Grinding \cdot w \quad (1.15)$$

Con $f^* = f + r$,

$$\frac{dw}{dt} = f + r - p^* - Grinding \cdot w \quad (1.16)$$

1.3.7. Filosofía de control DCS PCS7 de la planta concentradora

Actualmente, la estrategia de control de la planta está dividida en dos partes: la alimentación del molino y la descarga del molino.

1.3.7.1. Control de alimentación del Molino SAG

La alimentación del molino SAG se gestiona mediante un lazo de control que regula la dosificación de los feeders y la velocidad de la faja transportadora, asegurando un flujo estable de material. Además, existen lazos de control para las entradas de líquidos: agua de proceso, lechada de cal y diésel.

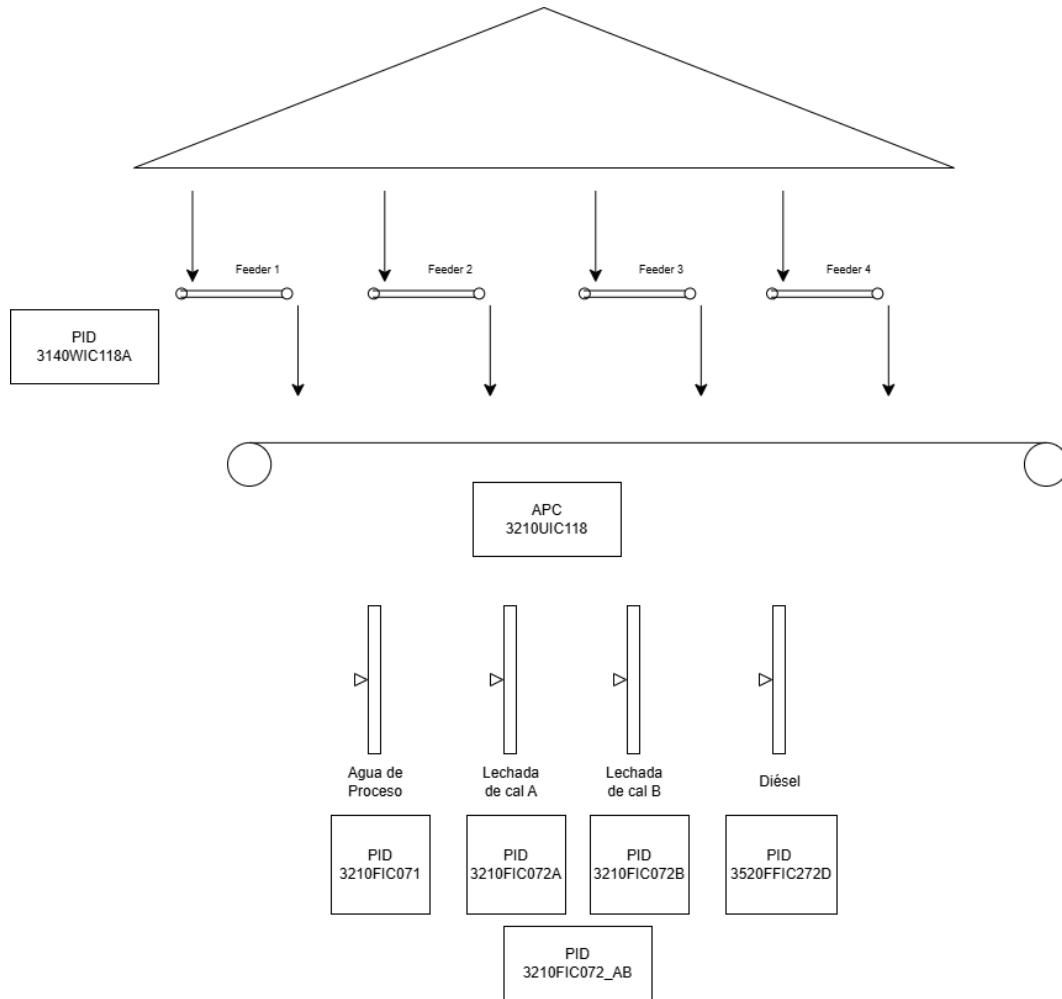


Figura 1.9: Esquema lazo de control de entrada.

Este esquema es una simplificación del esquema de control de alimentación del molino [6.1](#) anexo.

El flujo de alimentación es regulado por un controlador PID (3140WIC118A), que ajusta la tasa de alimentación de carga fresca al molino en función del setpoint definido. Este setpoint puede ser determinado internamente o ajustado por un control avanzado de procesos (APC, Advanced Process Control), identificado como 3210UIC118. El APC optimiza la operación ajustando dinámicamente los setpoints según las condiciones de carga del molino y las variables del proceso.

El APC gestiona dos tipos de variables:

- **Control Variables (CV):** Son las variables que se envían al control avanzado para su procesamiento. En este caso, incluyen:
 - Peso del Molino SAG 1.
 - Monitoreo de Potencia Activa del Molino SAG 1.
 - Flujo a Planta Pebbles SAG 1.

- Corriente del Estator del Molino SAG 1.
- Corriente del Harnero.
- **Manipulated Variables (MV):** Son las variables que el control avanzado ajusta para optimizar la operación. En este caso, incluyen:
 - Controlador de Alimentación de Carga Fresca al Molino SAG 1.
 - Agua de Procesos al Trommel del Molino SAG 1.
 - Velocidad del Molino SAG 1.

Cuando el APC está activo, este define los setpoints de los PID. En caso de falla del APC o de pérdida de datos clave, un modo interventor entra en operación, permitiendo que los PID funcionen con la última referencia válida registrada, asegurando la continuidad de la operación.

El control de las entradas de líquidos se gestiona mediante lazos PID dedicados:

- **Agua de proceso:** Controlada por el PID 3210FIC071.
- **Lechada de cal:** Regulada por los PID 3120FIC072A y 3210FIC072B, además de un controlador selector 3210FIC072_AB, que determina cuál de las dos dosificaciones está activa, solo se permite una a la vez.
- **Diésel:** Su dosificación es regulada por el PID 3520FFIC272D.

1.3.7.2. Control de Descarga del Molino SAG

En la descarga del molino, se implementa un lazo de control para el nivel del estanque de salida y otro para la densidad de la pulpa que se dirige a los hidrociclones, asegurando condiciones óptimas para la posterior clasificación del material. El nivel del estanque se mantiene con un setpoint del 70 % de llenado, mientras que la densidad de la pulpa se regula dentro del rango de [56-60] %.

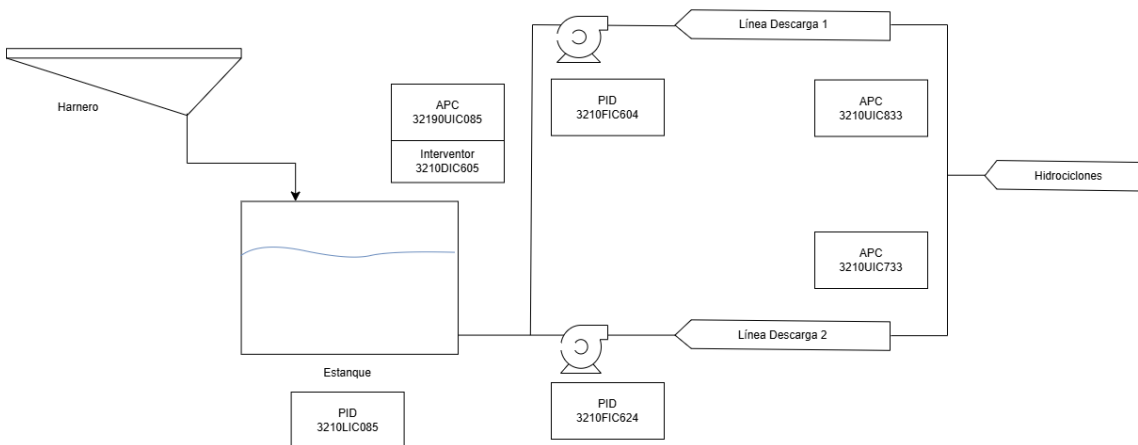


Figura 1.10: Esquema lazo de control de salida.

Este esquema es una simplificación del esquema de control de descarga del molino [6.2](#) anexo.

El controlador APC 3210UIC833 y 3210UIC733 regula la apertura de las válvulas de los hidrociclones en función de la presión del sistema. Si la presión aumenta, las válvulas se abren para reducirla; en caso contrario, se cierran. Sin embargo, en este estudio, este controlador no se considera, ya que el lazo cerrado de control evaluado se centra en la regulación de la densidad de la pulpa.

Por otro lado, el controlador APC 3219UIC085 gestiona la descarga del cajón del molino y controla las siguientes variables clave:

- Agua de proceso A al cajón de descarga del molino SAG #1.
- Agua de proceso B al cajón de descarga del molino SAG #1.
- Flujo de alimentación a los hidrociclones #1.
- Bomba de alimentación a los hidrociclones #1.
- Flujo de alimentación a los hidrociclones #2.
- Bomba de alimentación a los hidrociclones #2.

El control del nivel del estanque de descarga se realiza mediante el PID 3210LIC085, mientras que la regulación de la densidad en las líneas de descarga 1 y 2 está a cargo de los PID 3210FIC604 y 3210FIC624, respectivamente. Además, las bombas del sistema incorporan sensores para monitorear su desempeño en tiempo real. El interventor 3210DIC605 actúa como respaldo en caso de fallas del APC.

Cuando el APC está en funcionamiento, los interventores y los PID críticos permanecen en modo *tracking*, es decir, replicando la salida del controlador activo sin intervenir directamente. Esta condición permite una transferencia suave (*balanceless*) en caso de falla del APC, ya que los controladores base pueden asumir el control inmediatamente con la misma señal, evitando discontinuidades en la operación. En ese escenario, los interventores utilizan el último setpoint válido registrado, garantizando la continuidad del proceso sin afectaciones transitorias.

Actualmente, la empresa no cuenta con un control avanzado específico para el molino SAG, ya que su implementación requiere información clave como el peso del molino, su velocidad, porcentaje de carga y potencia consumida. Esto motiva el objetivo de este trabajo: desarrollar la señal de peso del molino para evaluar el desempeño de la planta en lazo cerrado y, en el futuro, servir como base para el diseño de un controlador que permita realizar pruebas de *Virtual Commissioning*.

1.3.7.3. PCS7

El sistema PCS7 de Siemens se gestiona mediante el software SIMATIC Manager, que combina las funcionalidades de STEP 7 y WinCC para integrar el control y monitoreo en una sola plataforma.

PCS7 cuenta con dos vistas principales en SIMATIC Manager: Component View y Plant View.

- **Component View:** Representa el hardware, permitiendo la configuración detallada de cada dispositivo y su ubicación en la estructura física de la planta.
- **Plant View:** Facilita la organización jerárquica de los componentes y la creación de la lógica de control para el funcionamiento de la planta.

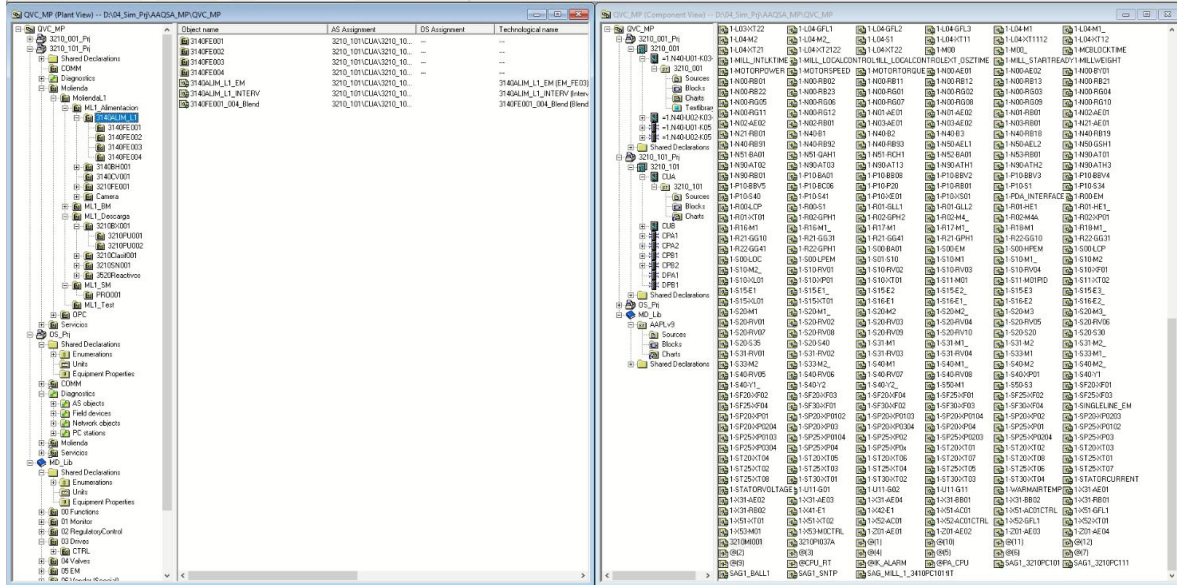


Figura 1.11: Ventanas de Plant View y Component View en SIMATIC Manager.

1.3.7.4. Configuración de Componentes

Para comenzar, se deben configurar todos los componentes en el Component View y establecer las conexiones necesarias. Al hacer doble click en la sección de hardware del controlador, se pueden configurar las conexiones de comunicación, como Ethernet, Profibus, o Profinet.

1.3.7.5. Agregar Hardware al Proyecto

En la Configuración de Hardware, se puede arrastrar y soltar dispositivos desde una lista de componentes hacia el área de trabajo, configurando así las conexiones deseadas. Es fundamental que cada dispositivo tenga un nombre único dentro de su jerarquía, evitando conflictos de nombres en el resto de la planta.

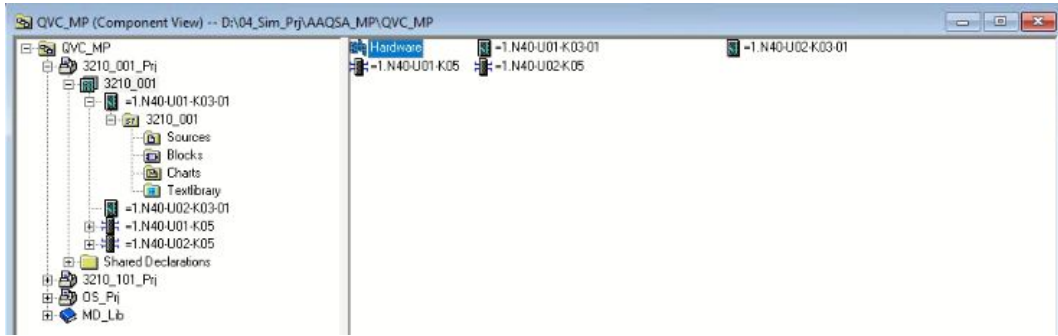


Figura 1.12: Configuración de Hardware en SIMATIC Manager.

1.3.7.6. Programación de la Lógica de Control

La lógica de funcionamiento de los dispositivos se implementa a través de la parametrización de sus propiedades en el Continuous Function Chart (CFC). CFC permite programar la lógica de control de la planta de manera gráfica, utilizando bloques funcionales para la gestión secuencial o continua de los procesos. Esta técnica es similar al uso de Sequential Function Chart (SFC), pero en CFC se enfocan en bloques que permiten el control continuo.

En Plant View se puede acceder al componente a programar, al hacer doble click se abrirá la ventana de CFC.

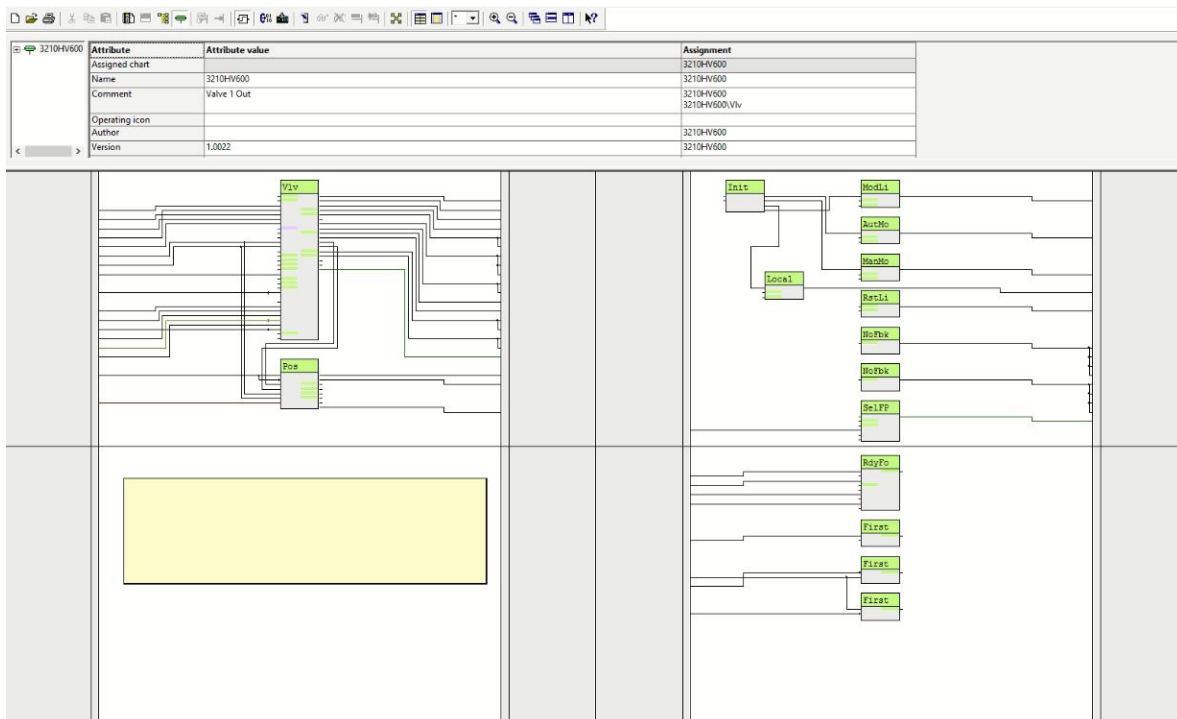


Figura 1.13: Ventana CFC.

1.3.7.7. Visualización en WinCC

Una vez configurados los componentes y la lógica de control, se procede a representar el sistema en WinCC. Esta plataforma actúa como HMI (Interfaz Hombre-Máquina) de la planta, proporcionando una representación gráfica en tiempo real de los dispositivos y sus estados, así como alarmas y fallas del sistema.

WinCC permite al usuario operar dispositivos en modo manual o automático, y al hacer doble clic en ellos, se pueden observar opciones de Start/Stop y modos de funcionamiento.

2 | Simulación Matlab & Simulink del proceso de molienda SAG

En este capítulo se aborda la implementación de un modelo dinámico del molino SAG utilizando Matlab y Simulink. En la primera sección, se describe el diagrama de bloques del modelo, que incluye cinco entradas y once salidas. El modelo se valida con datos históricos del molino SAG 17 de Chuquicamata, asegurando su precisión en condiciones reales.

En la segunda sección, se detalla la obtención de parámetros del modelo a partir de datos experimentales, como las tasas de molienda y rechazo, utilizando información granulométrica del mineral. Finalmente, en la tercera sección, se presentan los resultados de la simulación, mostrando el comportamiento de variables clave como la potencia, el nivel de llenado y el hold-up de mineral, confirmando que el modelo reproduce adecuadamente la operación del molino SAG.

2.1. Diagrama de bloques del modelo dinámico del Molino SAG

Para la implementación del modelo del molino SAG, se utiliza el bloque de Simulink **Matlab Function**, el cual considera cinco entradas y once salidas, como se muestra a continuación.

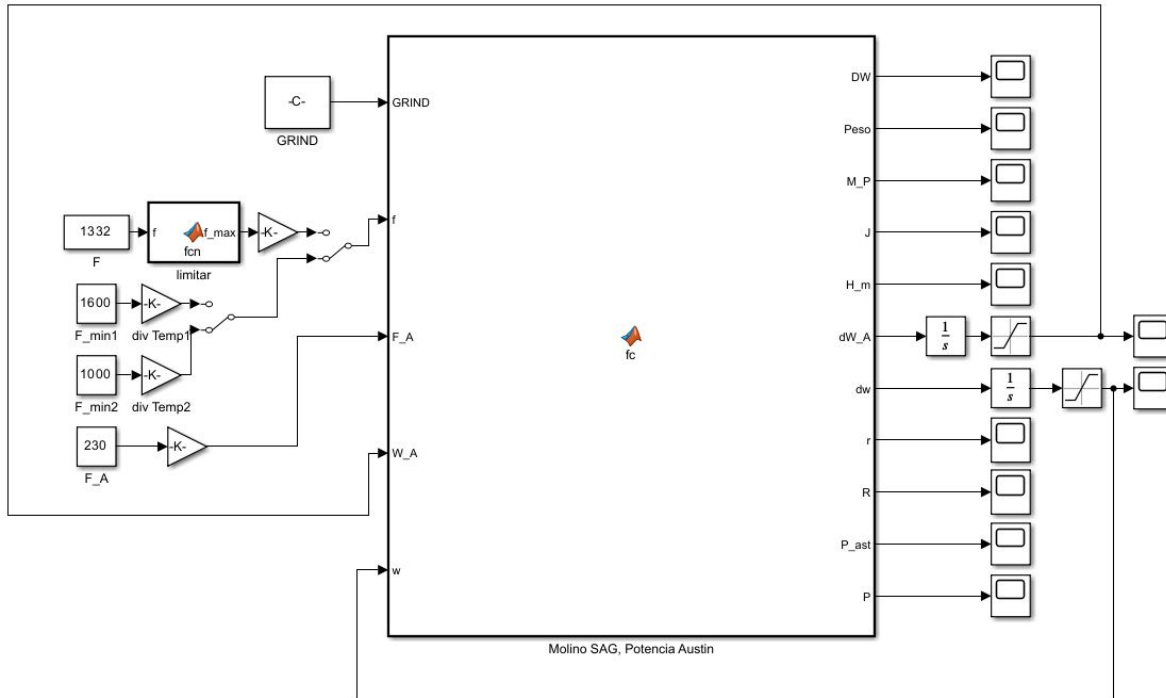


Figura 2.1: Modelo molino SAG en Simulink.

El contenido de este bloque corresponde al código [6.2](#) de la sección de Anexos.

2.1.1. Entradas del modelo

Las señales de entrada del modelo son las siguientes:

- **GRIND**: Matriz $R^{-1} \cdot K^E \cdot R$ utilizada en la ecuación de molienda (grinding), que describe el proceso de reducción del material.
- **f**: Flujo de entrada del mineral en t/h. Este valor se multiplica por un vector de 12×1 , que representa la distribución granulométrica de las rocas, y se divide por un factor de 3600 para garantizar que la simulación en SIMIT se ejecute en tiempo real con las unidades temporales correctas.
- **F_A**: Flujo de líquidos entrantes, que también se ajusta dividiendo por 3600 para representar el tiempo de simulación.
- **W_A**: Peso de los líquidos en el molino.
- **w**: Vector de 12×1 que contiene los pesos del mineral según su tamaño i .

Además, a la izquierda de la figura [2.1](#) se puede apreciar un bloque de “Matlab Function” el cual corresponde a un condicional if para limitar la señal f superiormente en la cantidad máxima de mineral que el modelo es capaz de procesar, 1750 t/h.

2.1.2. Salidas del modelo

Las señales de salida corresponden a variables de interés para validar el funcionamiento del molino. Estas variables se basan en datos obtenidos del molino SAG 17 de la Concentradora A2 de Chuquicamata, registrados el 30 de junio de 1996. Estos datos fueron extraídos del trabajo de memoria de Roberto Orellana titulado “Modelo, Control y Simulador de Planta de Molienda Semiautógena y Molienda Secundaria” [1].

Las salidas evaluadas incluyen:

- **DW**: Descarga total del molino, descarga de sólidos más descarga de líquidos en t/h.
- **Peso**: Peso total del material en el molino en t.
- **M_P**: Potencia consumida del molino SAG en kW.
- **J**: Nivel de llenado del molino.
- **H_m**: Hold-up del material dentro del molino.
- **dW_A**: Variación del peso de los líquidos en t.
- **dw**: Variación del peso del mineral en t.
- **r**: Material recirculante por tamaño en t/seg.
- **R**: Material recirculante total en t/h.
- **P_ast**: Flujo descarga de mineral de la cámara de molienda en t/h.
- **P**: Flujo descarga de mineral del molino en t/h.

Estas salidas permiten confirmar el correcto funcionamiento del molino en su punto de operación, el cual se ajusta a los datos históricos obtenidos.

2.1.3. Consideraciones adicionales

Un aspecto importante del código es el uso de la función `min()`, que evita divisiones por cero al usar **H_m** y limita inferiormente el valor de **J** para prevenir que el sistema se indefina. El resto del código sigue la estructura de los submodelos descritos previamente.

2.2. Obtención de parámetros del modelo a partir de datos experimentales

Se parametriza el molino SAG en base a los datos de la planta de molienda de A2 de Chuquicamata, obtenidos del trabajo título [1]. En donde se consideran flujos máscicos de mineral distribuidos en doce intervalos de tamaño de partículas. Para cada uno de estos intervalos se define un tamaño representativo (X_1 a X_{12}), el cual corresponde a la medida geométrica del intervalo, con dos excepciones:

- Para el tamaño mayor X_1 , se asume un valor de 8"(203.2 mm).
- Para el tamaño menor X_{12} , se utiliza la media aritmética del intervalo correspondiente.

En la Tabla 2.1 se presentan los intervalos de tamaño de partículas junto con sus respectivos valores representativos:

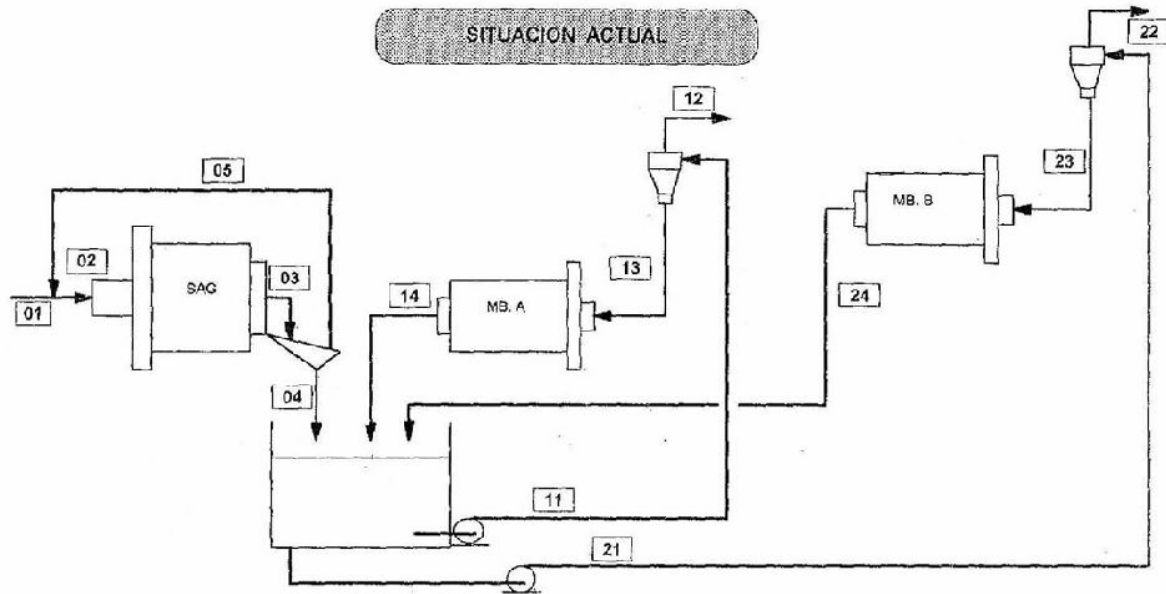
Tamaño	Intervalo	Intervalo en [mm]	Tamaño Rep X_i [mm]
X_1	+6"	>152.4	203.2
X_2	-6" , +4"	(101.6, 152.4]	124.4341
X_3	-4" , +2.1"	(53.3, 101.6]	73.5886
X_4	-2.1" , +3/4"	(19.1, 53.3]	31.9066
X_5	-3/4" , +1/2"	(12.7, 19.1]	15.5747
X_6	-1/2" , +6#	(3.35, 12.7]	6.5227
X_7	-6# , +10#	(1.7, 3.35]	2.3864
X_8	-10# , +20#	(0.85, 1.7]	1.2021
X_9	-20# , +35#	(0.425, 0.85]	0.6010
X_{10}	-35# , +65#	(0.212, 0.425]	0.3002
X_{11}	-65# , +150#	(0.106, 0.212]	0.1499
X_{12}	-150#	(0, 0.106]	0.053

Tabla 2.1: Definición de intervalos de tamaños de partículas y tamaño representativo

La correcta definición de estos tamaños representativos es fundamental para describir la evolución de la granulometría dentro del molino, permitiendo estimar las tasas de molienda y rechazo de material en cada intervalo. Estos valores se emplean posteriormente en el ajuste de parámetros del modelo dinámico.

Las dimensiones del molino SAG corresponden a un diámetro $D = 9,75 \text{ m}$ (32'), largo $L = 5,18 \text{ m}$ (17') y un volumen interno $V = 359 \text{ m}^3$.

El punto de operación considerando un estado de equilibrio se obtiene de la figura a continuación y corresponde a $F = 1332 \text{ t/h}$.



PARAMÉTRICOS	% Pebbles				PSA	CCA	FSB	CCB					
	0.11	0.5	3	0.5	3	0.5	3						
Corriente	01	02	03	04	05	11	12	13	14	21	22	23	24
	ALIM.CTO	ALIM.SAG	PRCD.SAG	BAIC.HRK	SD39.HRN	ALIM.CLA	ALIM.FLA	ALIM.FSA	PRCD.MEA	ALIM.CLB	ALIM.FLB	ALIM.MB.B	PRCD.MEB
Tonelaje	1200	1332	1332	1200	132	2400	600	1800	1800	2400	600	1800	1800
T _{sh}													
P ₅₀ [*]													
Micrones	113130	50460	4020	2909	30002	1117	346	1434	074	597	331	1419	1158

* Se utilizaron valores de muestreo a circuito de molino SAG 17, de las corrientes 01 a 05 del día 19/06/96 y el resto de las corrientes del día 30/06/96

FIGURA: 2.2.- DIAGRAMA DE FLUJO Y BALANCE SITUACION ACTUAL

Figura 2.2: Diagrama de flujo y balance Concentradora A2 Chuquicamata, Fuente: [1] R.P. Orellana Araya, “Modelo, control y simulador de planta de molienda semiautógena y molienda secundaria”, 2010, pág. 120.

Además, se consideran valores típicos esperados para el punto de operación.

- $\rho_s = 2,7 t/m^3$
- $\rho_b = 7,1 t/m^3$
- $\epsilon_b = 0,4$
- $\phi_c = 0,75$
- $w_c = 0,8$

En particular los datos a continuación fueron obtenidos de A. Casali [15].

- $M_P = 6500 \text{ kW}$
- $J = 40 \%$
- $J_B = 8 \%$
- $W_A = 60 t$

Con esta primera información identificada se pueden obtener los parámetros:

- Ψ : Parámetro que determina la descarga de sólidos de la cámara de molienda.
- k y A : Parámetros experimentales de la ecuación de consumo de potencia del molino.
- c : Vector de coeficientes de rechazo del molino.
- k^E : Vector conformado por las tasas específicas de molienda.
- α_o y λ_l : Parámetros de la tasa de descarga del agua.

2.2.1. Determinar parámetros k y A

Al analizar la ecuación [1.12](#), que describe la potencia consumida por el molino, se deduce que el valor mínimo que puede tomar dicha ecuación es cero. Por lo tanto, se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$M_p = k \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (1 - A \cdot J) \cdot \frac{W}{V} \cdot \phi_c \cdot \left(1 - \frac{0,1}{29-10 \cdot \phi_c}\right) \geq 0 \quad (2.1)$$

De esta expresión, se desprende que:

$$(1 - A \cdot J) \geq 0 \quad \Rightarrow \quad A \leq \frac{1}{J}$$

$$A \leq 2,50$$

Con esta condición y tomando en cuenta la recomendación de Austin [\[13\]](#), quien sugiere un valor de $A = 1,1$, se determina que el parámetro k tiene un valor de 10,5523.

2.2.2. Determinar tasas específicas de molienda k^E y tasas de rechazo c

Para determinar las tasas de molienda y las de rechazo se consideran la distribución granulométrica de la alimentación y descarga del molino SAG 17 de Chuquicamata realizada el 19 de Junio de 1996.

Lo primero es realizar un análisis gráfico a los gráficos presentados en [\[1\]](#):

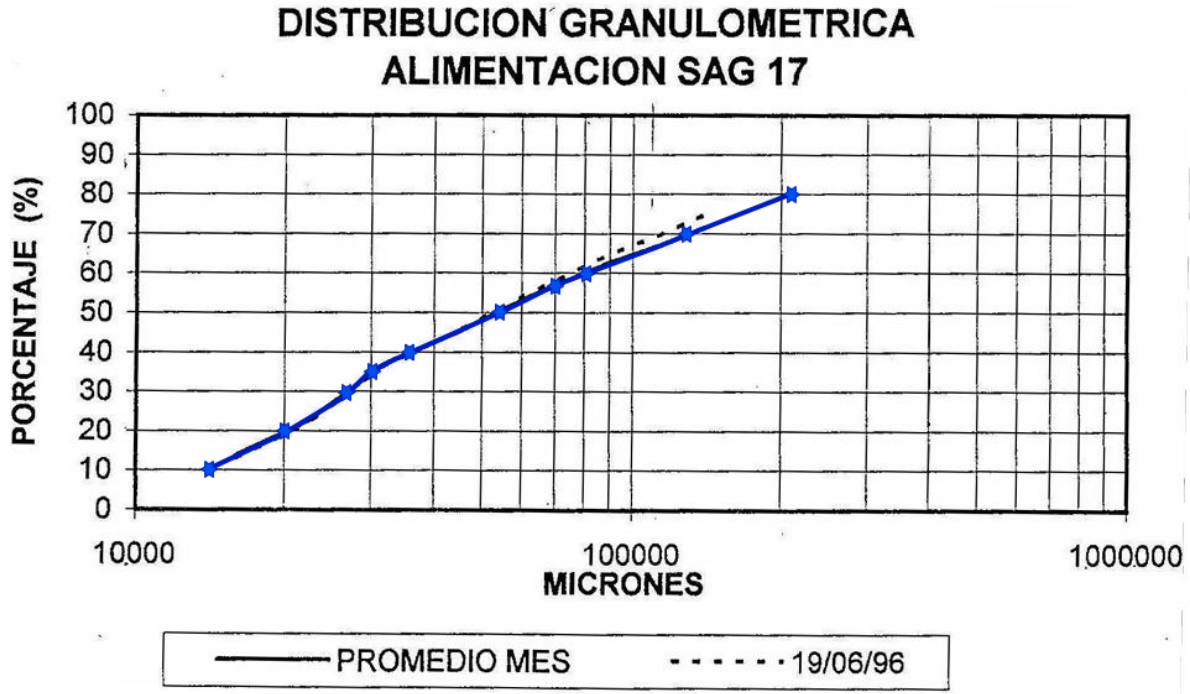


Figura 2.3: Distribución granulométrica alimentación SAG 17.

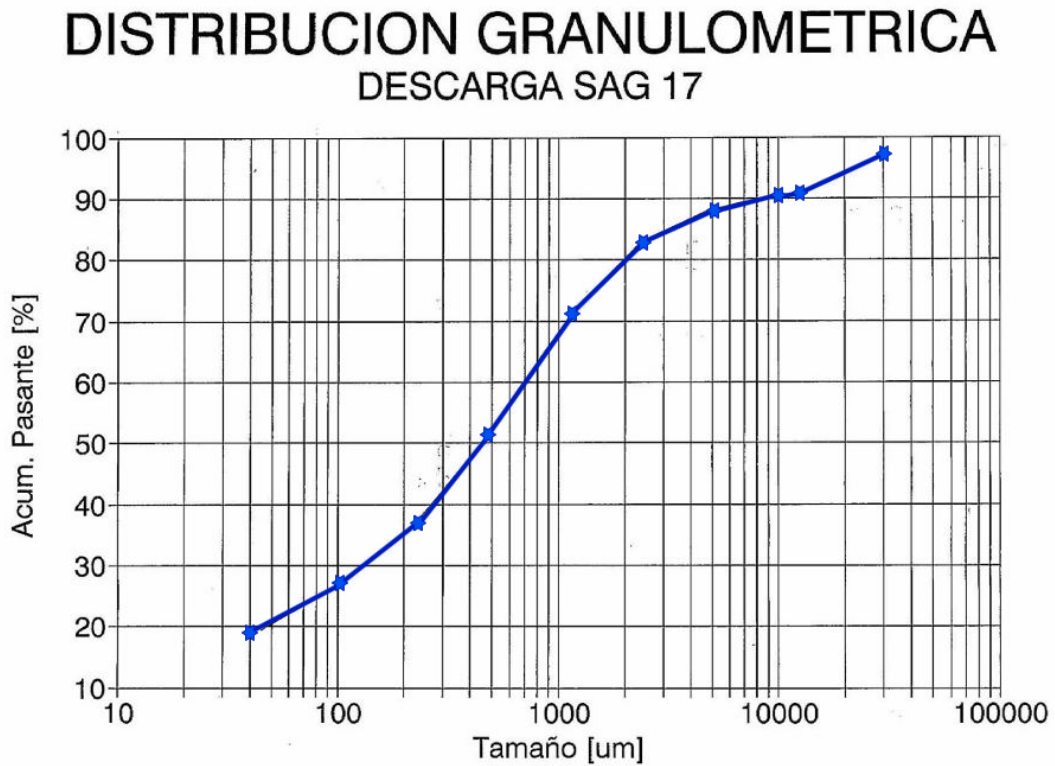


Figura 2.4: Distribución granulométrica descarga SAG 17.

Para ello se marcan 10 puntos en las gráficas alimentación y descarga para hacer una aproximación por tramos lineales.

Alimentación		Descarga	
Tamaño	%	Tamaño	%
13600	10 %	45	19 %
20000	20 %	109	27 %
27000	30 %	235	37 %
30000	35 %	480	51 %
36000	40 %	1170	71 %
53000	50 %	2440	83 %
70000	57 %	5000	88 %
80000	60 %	10000	91 %
130000	70 %	13000	91 %
210000	80 %	30000	98 %

Tabla 2.2: Puntos establecidos en los gráficos para realizar una linealización por tramos

Los gráficos de granulometría analizados presentan la distribución del material en términos de porcentaje acumulado pasante, es decir, para un tamaño X_i , el valor indicado incluye todas las partículas de tamaño menor o igual a X_i . Sin embargo, para la correcta implementación en el modelo, es necesario obtener los valores correspondientes a cada intervalo de tamaño representativo y su respectivo acumulado retenido por malla, que considera el material de tamaño X_i y mayores.

A partir de los datos experimentales, se construye una tabla que relaciona los tamaños representativos de cada intervalo con su distribución granulométrica en términos de acumulado pasante y retenido. El procedimiento seguido para su determinación es el siguiente:

1. **Selección de puntos representativos:** Se identifican los puntos clave en la curva de distribución granulométrica del gráfico original, priorizando aquellos donde se observan cambios significativos en la pendiente. Esto permite aproximar la curva mediante una interpolación por tramos lineales.
2. **Cálculo del porcentaje de material en cada intervalo:** Se obtiene la fracción de material correspondiente a cada tamaño representativo restando los valores consecutivos del porcentaje acumulado pasante.
3. **Cálculo del acumulado retenido por malla:** Se determina como el complemento del porcentaje acumulado pasante, representando la cantidad de material mayor a cada tamaño de partícula.

Tamaño X_i		Acumulado pasante		Valor para tamaño X_i		Acumulado por malla	
Descripción	$[\mu\text{m}]$	Alimentación	Descarga	Alimentación	Descarga	Alimentación	Descarga
X_1	203.200	100 %	100 %	31.1 %	0 %	31.1 %	0 %
X_2	124.434	68.9 %	100 %	11.3 %	0 %	42.4 %	0 %
X_3	73.616	57.6 %	100 %	21.1 %	0 %	63.4 %	0 %
X_4	31.877	36.6 %	100 %	23.5 %	8 %	86.9 %	8 %
X_5	15.575	13.1 %	92 %	8.3 %	2.9 %	95.2 %	10.9 %
X_6	6.523	4.8 %	89.1 %	3 %	6.6 %	98.2 %	17.5 %
X_7	2.386	1.8 %	82.5 %	0.9 %	11.2 %	99.1 %	28.7 %
X_8	1.202	0.9 %	71.3 %	0.4 %	16.9 %	99.6 %	45.6 %
X_9	601	0.4 %	54.4 %	0.2 %	13.9 %	99.8 %	59.4 %
X_{10}	300	0.2 %	40.6 %	0.1 %	10.4 %	99.9 %	69.8 %
X_{11}	150	0.1 %	30.2 %	0.1 %	10.2 %	100 %	80 %
X_{12}	53	0 %	20 %	0 %	20 %	100 %	100 %

Tabla 2.3: Distribución granulométrica

En esta tabla se puede observar que, para los tamaños X_1 , X_2 y X_3 no hay descarga de mineral, lo que indica que se rechazan en un 100 %. Siguiendo la misma lógica, para el tamaño X_{12} , el 100 % es descargado del molino, lo que indica una tasa de rechazo de 0. Estos datos permiten definir cualitativamente el comportamiento del sistema logran definir cualitativamente el comportamiento del sistema.

La columna de valor para tamaño X_i de la alimentación representa la distribución granulométrica porcentual del flujo de mineral tanto entrante como saliente del molino. Con base en estos datos, se pueden definir los siguientes vectores:

$$weights = [0.31, 0.113, 0.211, 0.235, 0.083, 0.03, 0.009, 0.004, 0.002, 0.001, 0.001, 0.0004]$$

$$f = [414.4, 149.9, 280.7, 312.7, 110.4, 40.5, 11.6, 5.9, 2.9, 1.5, 0.9, 0.5], t/h$$

$$p = [0.0, 0.0, 0.0, 106.8, 38.9, 87.5, 149.1, 224.8, 184.8, 138.1, 135.6, 266.4], t/h$$

Para las tasas de rechazo intermedias, se utilizan los valores comúnmente esperados:

$$c = [1.00, 1.00, 1.00, 0.90, 0.40, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.01, 0.00]$$

Ahora se pueden definir los vectores de material entrante y saliente a la cámara de molienda utilizando el submodelo de clasificación. De la ecuación [2.2](#), se despeja el valor p^* :

$$p = (1 - c) \cdot p^* \Rightarrow p^* = \frac{p}{1 - c} \quad (2.2)$$

Para calcular el material recirculante que entra a la cámara de molienda, se considera la ecuación [2.2](#) y la relación $f^* = f + r$. Como se mencionó anteriormente, los primeros tres tamaños granulométricos tienen una tasa de rechazo de 1, por lo que no se pueden determinar sus valores de descarga, ya que se indefine la ecuación [2.2](#). Por lo tanto, se asume que en estos casos el flujo entrante a la cámara de molienda es del 300 %. Es decir:

$$f^* = 3f$$

$$p^* = f^* - f \Rightarrow p^* = 3f - f = 2f$$

$$r = 2f$$

Finalmente, los flujos de la cámara de molienda son:

$$f^* = [1243.3, 449.6, 842.0, 1273.6, 136.4, 87.6, 75.5, 80.8, 49.2, 25.8, 2.3, 0.5] t/h$$

$$p^* = [828.9, 299.7, 561.3, 1067.7, 64.9, 134.6, 212.9, 299.7, 231.0, 162.5, 137.0, 266.4], t/h$$

Ahora es posible definir los valores del Hold-up según el tamaño del mineral. Austin [3] propone la siguiente ecuación para estimar el hold up total del mineral,

$$H_m = V \cdot [(1 - \epsilon_b) \cdot J \cdot \rho_s - (1 - 0,4) \cdot J_b \cdot \rho_s] \quad (2.3)$$

Al evaluar esta ecuación, se obtiene $H_m = 186,1056 t$. A partir de esto, se puede utilizar la relación que establece que la descarga unitaria de la cámara de molienda es directamente proporcional al hold-up unitario del molino, lo que se expresa como:

$$\frac{1}{P^*} \cdot p^* = \frac{1}{H_m} \cdot w^*$$

Despejando w , se obtiene:

$$w = \frac{H_m}{P^*} \cdot p^*$$

Lo que da como resultado:

$$w = [36.2, 13.1, 24.5, 46.6, 2.8, 5.9, 9.3, 13.1, 10.1, 7.1, 6.0, 11.6]t$$

Posteriormente, se determinan las tasas específicas de molienda utilizando la ecuación de balance dinámico del mineral en su versión acumulada, considerando que cada tamaño acumula los tamaños menores previos:

$$\frac{dw^A}{dt} = f^{*A} - p^{*A} - Grinding^A \cdot w^A$$

Al evaluar el punto de equilibrio, la diferencia entre las entradas y salidas de mineral es cero, por lo que la ecuación se reduce a:

$$Grinding^A = \frac{M_P}{H_m} \cdot R^{-1} \cdot K^E \cdot R = \frac{f^{*A} - p^{*A}}{w^A}$$

Dado que $K^E = diag(k^E)$, se obtiene:

$$\Rightarrow k^E = \frac{H_m}{M_P} \cdot \frac{f^{*A} - p^{*A}}{w^A}$$

El cálculo de las tasas específicas de molienda requiere los siguientes pasos:

- Calcular las entradas y salidas acumuladas de la cámara de molienda f^{*A} y p^{*A} .
- Calcular la masa acumulada de mineral en el molino w^A .
- Calcular el vector k^E con las tasas de molienda específicas.
- Redimensionar la matriz K^E en función del anterior resultado obtenido.
- Calcular la matriz $GRIND = R^{-1} \cdot K^E \cdot R$

2.2.3. Determinar parámetro Ψ de la descarga de mineral

El parámetro Ψ se obtiene a partir de la ecuación de descarga de mineral [1.9](#):

$$P^* = \Psi \cdot \sqrt{H_m} \Rightarrow \Psi = \frac{P^*}{\sqrt{H_m}}$$

Al evaluar los datos previamente calculados, se obtiene $\Psi = 312,72$.

2.2.4. Determinar los parámetros α_o y λ_l de la descarga del agua

Dado que no se dispone de información específica sobre la descarga de agua, se adoptan los valores recomendados por [1](#): $\alpha_o = 3,77$ y $\lambda_l = 0,71$.

2.2.5. Disminuir tamaño del sistema

Los cálculos anteriores se basan en 12 elementos para los flujos de entrada y salida. Sin embargo, más adelante se requerirá un modelo más compacto para reducir el costo computacional. Por ello, los valores de los vectores $weights$, f , p , f^* y p^* se agrupan en tres conjuntos de cuatro elementos cada uno, reduciendo así las 12 granulometrías a tres categorías: grueso, intermedio y fino.

$$\left[\begin{array}{c} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \end{array} \right] \left. \vphantom{\begin{array}{c} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \\ X_7 \\ X_8 \\ X_9 \\ X_{10} \\ X_{11} \\ X_{12} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \mathbf{X}_1 \\ \\ \mathbf{X}_2 \\ \\ \mathbf{X}_3 \end{array}$$

Los nuevos valores de los vectores resultan en:

$$weights = [0.869, 0.126, 0.0044]$$

$$\begin{aligned}f &= [1157.7, 168.4, 5.8] t/h \\p &= [106.8, 500.3, 724.9] t/h \\f^* &= [3808.5, 380.3, 77.8] t/h \\p^* &= [2757.6, 712.1, 796.9] t/h \\w &= [120.4, 31.1, 34.8] t\end{aligned}$$

Para determinar las nuevas tasas de rechazo y molienda, se utiliza la ecuación (2.2) para despejar la tasa de rechazo:

$$p = (1 - c) \cdot p^* \Rightarrow c = 1 - \frac{p}{p^*}$$

Lo que da como resultado lo que da como resultado:

$$c = [0.96, 0.297, 0.09]$$

En el modelo con 12 elementos, los primeros tres componentes del material recirculante corresponden al 200 % del flujo de material que ingresa al molino. Para estimar correctamente el material recirculante en el modelo reducido, se considera que el primer elemento se calcula como:

$$\begin{aligned}R &= r_1 + r_2 + r_3 = r_1 + c_2 * p_2^* + c_3 * p_3^* \\2947,3 &= r_1 + 211,8 + 72 \Rightarrow r_1 = 2662,9\end{aligned}\tag{2.4}$$

Luego, se calcula la relación entre este valor y f_1 para encontrar el factor:

$$r_1 = x \cdot f_1 \Rightarrow x = \frac{r_1}{f_1} \Rightarrow x = 2,29$$

2.3. Respuestas por Simulación del modelo dinámico del molino SAG

Se evalúa el molino en su punto de operación, con estímulos de entradas flujos constantes de alimentación de mineral $F = 1332 t/h$ y líquidos $F_A = 230 t/h$. Se busca obtener los siguientes valores en las señales de salida:

- Potencia del molino $M_P = 6500 \text{ kW}$
- Porcentaje de llenado $J = 0,4$
- Hold up del mineral $H_m = 186 \text{ t}$
- Material total recirculante $R = 2935 \text{ t/h}$
- Mineral total descargado de la cámara de molienda $P_{ast} = 4267 \text{ t/h}$
- Material total descargado del molino $P = 1332 \text{ t/h}$

- Peso del molino $Peso = 246 \text{ t/h}$

A continuación, se presentan las gráficas de las variables simuladas durante un período de una hora (3600 segundos):

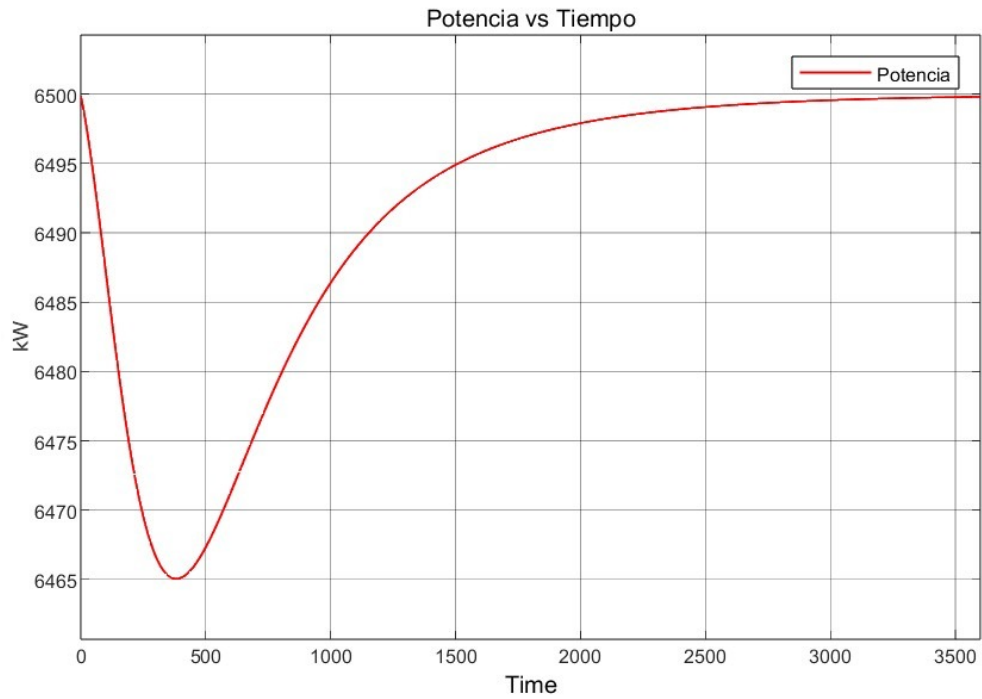


Figura 2.5: Comportamiento de la variable M_P en una hora.

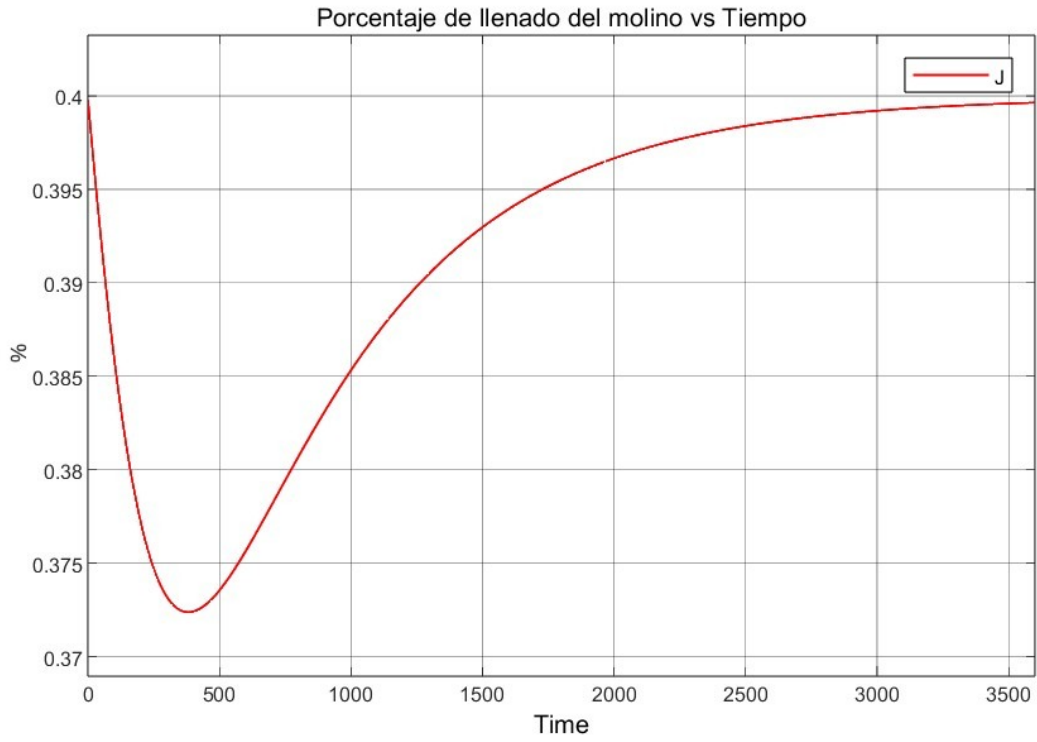


Figura 2.6: Comportamiento de la variable J en una hora.

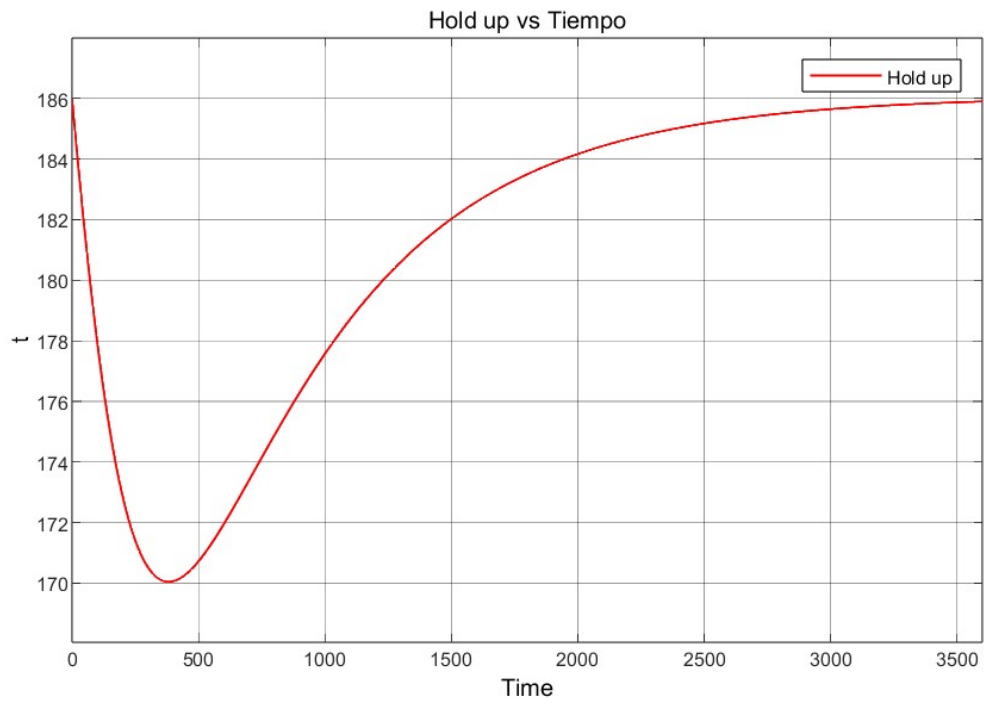


Figura 2.7: Comportamiento de la variable H_m en una hora.

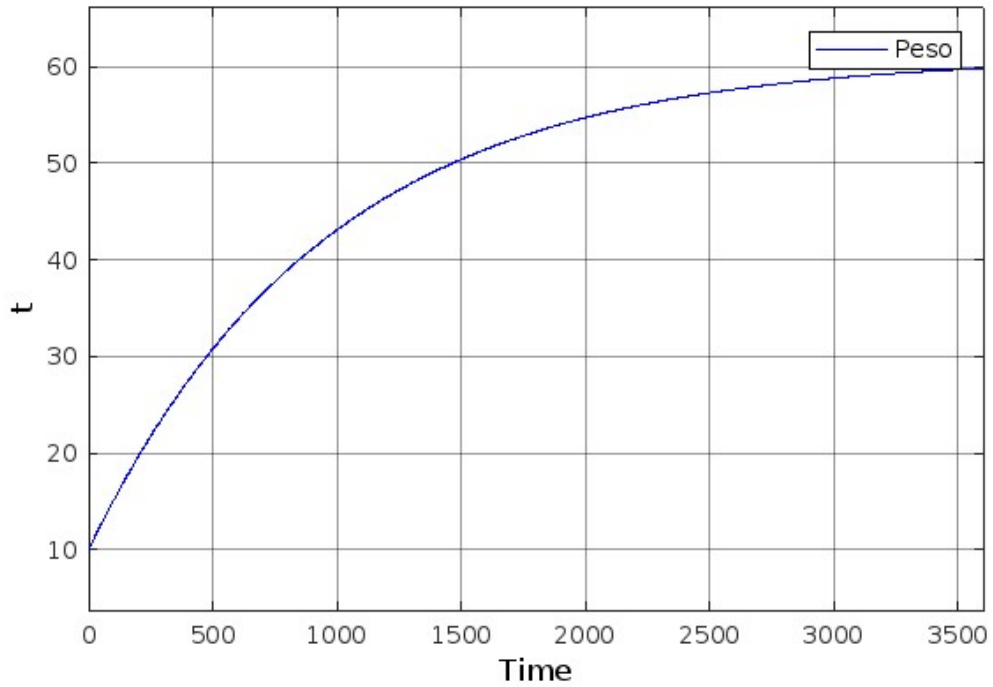


Figura 2.8: Comportamiento de la variable W_A en una hora.

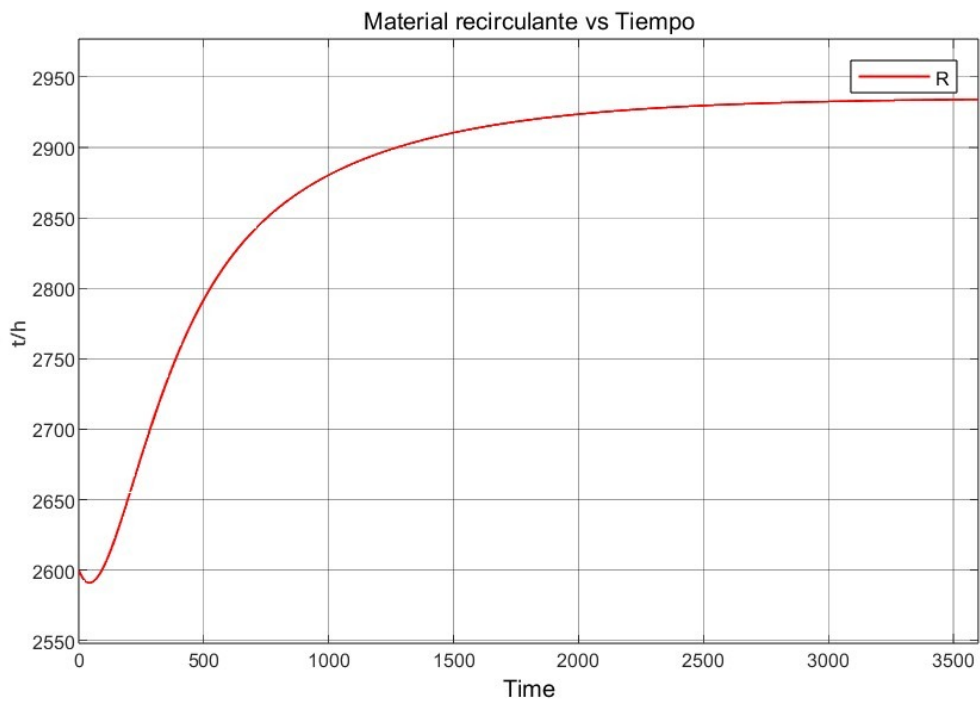


Figura 2.9: Comportamiento de la variable R en una hora.

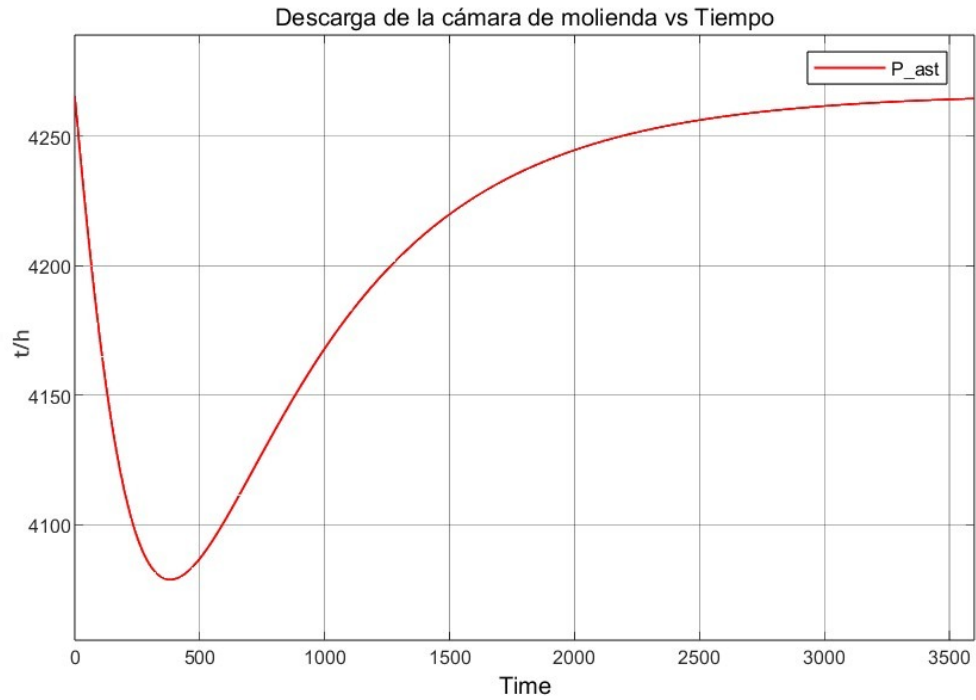


Figura 2.10: Comportamiento de la variable P_{ast} en una hora.

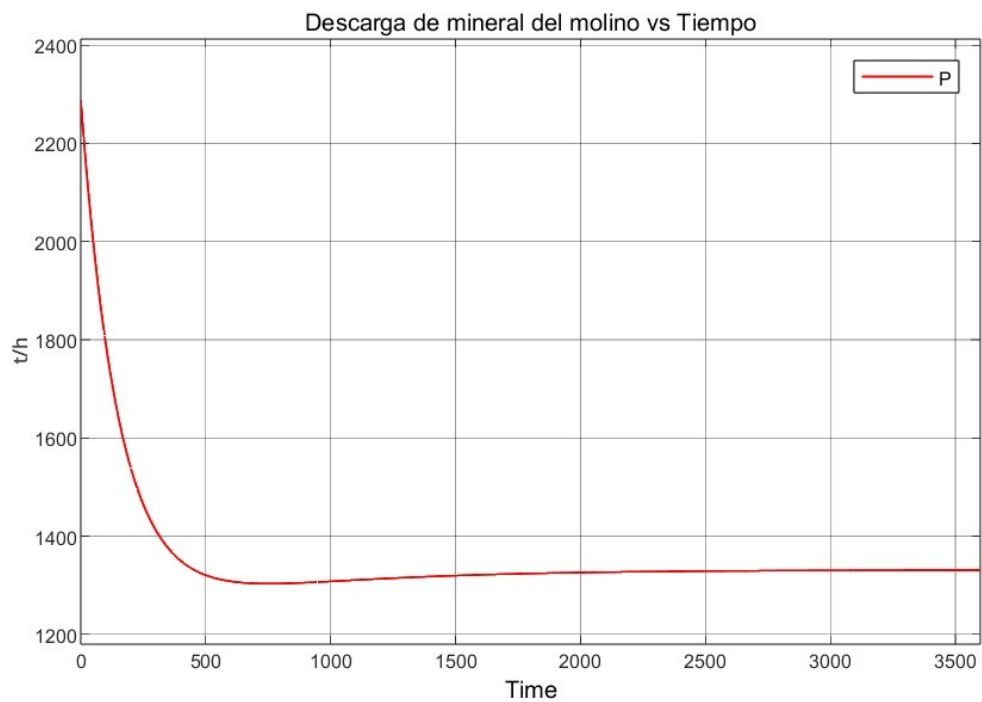


Figura 2.11: Comportamiento de la variable P en una hora.

Además, se evalúa la variable Peso, definida como la suma del Hold-up del material en el molino y el peso del agua W_A a lo largo del tiempo. Esta variable es la señal de salida objetivo de

este trabajo.

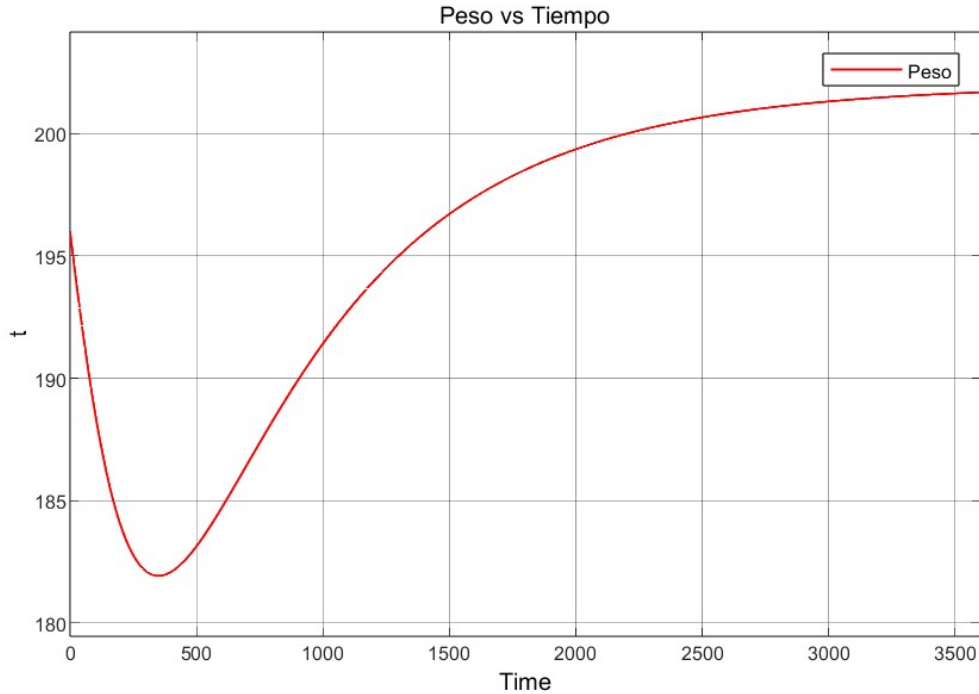


Figura 2.12: Comportamiento de la variable Peso en una hora.

Después de un transitorio, se observa que la descarga del molino disminuye respecto a su valor inicial, mientras que el peso total del molino aumenta. A pesar de ello, el *hold-up* de mineral (H_m) y el porcentaje de llenado (J) tienden a estabilizarse en un valor estacionario.

Esta dinámica se explica porque, al inicio, no todo el material que ingresa al molino logra salir de inmediato; parte de él comienza a recircular y acumularse en el interior. En particular, se considera en los cálculos que las primeras tres tasas de rechazo de mineral son del 100 %, lo que indica que las tres primeras granulometrías se recirculan completamente. Esta acumulación transitoria genera un aumento progresivo en H_m , lo cual también eleva temporalmente el peso del molino.

En los primeros segundos, el *hold-up* presenta una leve caída inicial, producto de una alta tasa de descarga (2500 t/h) respecto a la entrada efectiva de mineral. Sin embargo, con el aumento del flujo recirculante en el tiempo (modelado como $f^* = 3f$), el *hold-up* comienza a incrementarse nuevamente a partir de los 500 segundos. A medida que se incrementa la recirculación, el flujo efectivo de entrada al molino aumenta y genera una acumulación progresiva del mineral en la cámara de molienda. Como resultado, la descarga disminuye progresivamente hasta estabilizarse en 1332 t/h, cuando el sistema alcanza un equilibrio entre entrada y salida.

A medida que avanza la simulación, el sistema alcanza un equilibrio dinámico en el cual la cantidad de mineral que ingresa es igual a la que se descarga. En ese punto, H_m y J se estabilizan, reflejando que el molino ha llegado a una condición estacionaria. El peso total, sin embargo, puede seguir variando si hay acumulación o pérdida de agua, ya que este incluye tanto el mineral como el agua retenida en el sistema:

$$\text{Peso} = H_m + W_A$$

Donde W_A representa el peso del agua en el interior del molino. Por lo tanto, aunque el contenido de mineral se estabilice, el peso del molino aumentará si hay acumulación de agua.

Por otro lado, el porcentaje de llenado J se define como la fracción del volumen útil ocupado por el material sólido, y no considera directamente el agua. Por tanto, mientras el volumen de mineral no cambie, J permanecerá constante, aunque el peso total aumente por acumulación de agua.

3 | Simulación de procesos en SIMIT

Este capítulo aborda de manera general la estructura y componentes de SIMIT. Se describe su interfaz, que permite crear, gestionar y ejecutar proyectos, así como integrarse con sistemas externos como MATLAB&Simulink mediante memoria compartida (SHM). También se presenta un ejemplo práctico de simulación de un estanque, aplicando principios de balance de masas y ecuaciones diferenciales.

Además, se exploran herramientas avanzadas como SIMIT CTE para crear componentes personalizados y la integración con MATLAB&Simulink, esencial para proyectos complejos como la simulación de un molino SAG en una planta concentradora.

3.1. Estructura y Componentes SIMIT

Al abrir la aplicación SIMIT SP, se presentan tres opciones: Open Project, New Project y Retrieve Project. Al seleccionar Open Project, se muestra un explorador con una lista de los proyectos recientes junto con un navegador de archivos. Por otro lado, la opción Retrieve Project permite recuperar un proyecto previamente archivado, para lo cual se despliega una ventana donde se debe ingresar el nombre del proyecto y la ubicación de la nueva carpeta de destino. Finalmente, al elegir New Project, se despliega la ventana [3.1](#) en la que se solicita ingresar el nombre del proyecto, la carpeta de almacenamiento, el autor, comentarios, el engineering server y el engineering project.



Figura 3.1: New project.

Luego de seleccionar una de esas opciones, se visualiza la interfaz principal.

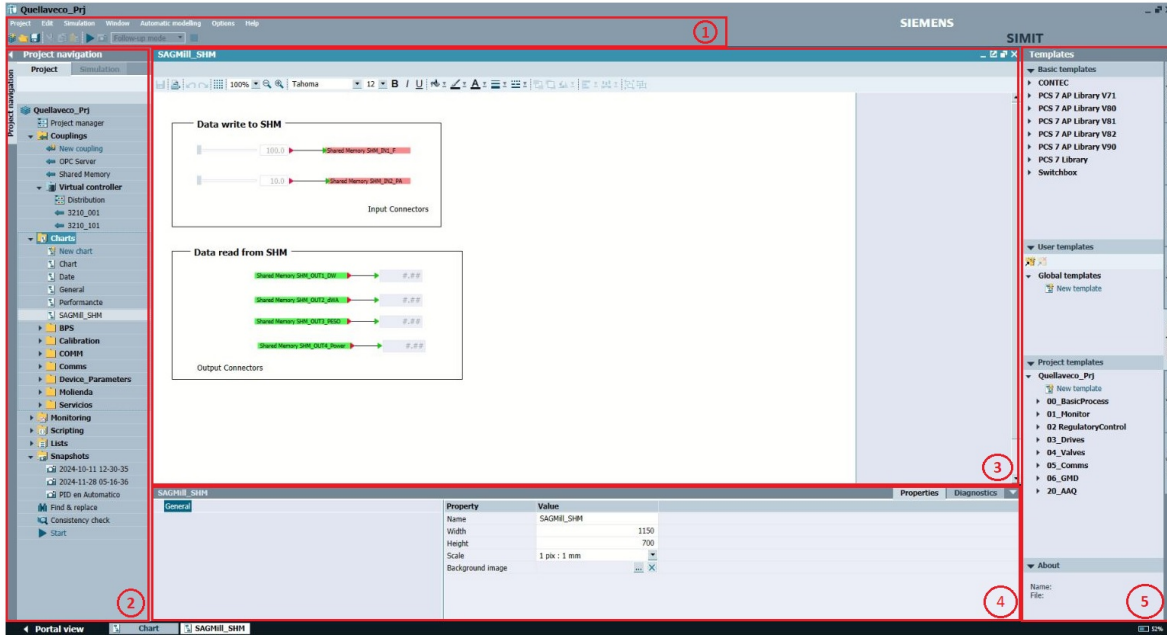


Figura 3.2: Interfaz principal de SIMIT SP.

1. **Barra de menú y barra de herramientas**, permiten abrir, archivar y guardar el proyecto, así como cortar, copiar y pegar elementos seleccionados. Además, los últimos cuatro comandos permiten iniciar o pausar la simulación, capturar un snapshot, ajustar la velocidad de simulación (lenta, en tiempo real o acelerada) y detener la simulación.
2. **Project navigation**, se organiza en cuatro secciones principales:
 - Project manager, proporciona una vista alternativa del project navigation.
 - Couplings, en esta carpeta se almacenan, crean y gestionan los couplings del proyecto. Un coupling es una interfaz que conecta SIMIT con un sistema externo, como un sistema de automatización. Sus funciones principales incluyen:
 - Intercambio de señales entre SIMIT y el sistema asociado (input/output signals).
 - Coordinación de dicho intercambio de señales.
 - Charts, en esta carpeta se define la estructura del proyecto mediante la organización en subcarpetas. Cada chart permite realizar la simulación de modelos dentro del proyecto.
 - Monitoring, esta carpeta contiene tres secciones principales: Messages, Archive y New trend. Messages, permite generar mensajes para eventos en la simulación. Archive, permite almacenar señales de una simulación en ejecución. New trend, permite graficar señales.
 - Scripting, facilita la gestión de scripts dentro del proyecto. Permite la creación y almacenamiento de scripts existentes, los cuales son útiles para automatizar tareas específicas o realizar ajustes controlados sobre la simulación. Esto resulta clave

para personalizar el comportamiento de la simulación según los requerimientos del usuario.

- Lists,: permite la creación y gestión de listas de materiales, siempre que la biblioteca CONTEC esté instalada. Su función principal es organizar y administrar elementos vinculados a sistemas de manejo de materiales, proporcionando soporte adicional para proyectos con modelado avanzado.
 - Snapshots, almacena estados guardados de la simulación en momentos específicos. Esto resulta útil para registrar estados iniciales o intermedios de la simulación con fines de análisis o recuperación. Además, mientras la simulación está en ejecución, se pueden crear nuevos snapshots para asegurar la conservación del progreso y configuraciones importantes.
3. **Espacio de trabajo**, esta área permite la edición de la simulación, donde se pueden arrastrar y organizar componentes, controles, señales, entre otros elementos. Además, dispone de una barra de herramientas propia para modificar el aspecto y configuración de los elementos a trabajar.
 4. **Vista de propiedades y diagnosticos**, al seleccionar un elemento en el espacio de trabajo, es posible ajustar sus propiedades, como valores, posición y tamaño. Durante la ejecución de la simulación, la ventana de Diagnostics muestra errores y advertencias (warnings) detectados en el sistema.
 5. **Task cards**, en esta sección se tiene acceso a una librería que incluye:
 - Components, disponibles en versiones básicas y de pago; en este proyecto se utilizan las librerías de componentes básicos.
 - Controls, dispone de elementos para observar señales (Displays) y componentes para accionar o modificar valores de señales de entradas (Input). En **Project components** es posible visualizar los componentes editados, así como crear o modificar componentes mediante la extensión SIMIT CTE (Component Type Editor).
 - Macros, dispone de una librería de macros básicas y da la opción de crear nuevas. Una macro corresponde a un conjunto de componentes interconectados para modelar una ecuación o sistema deseado que se encapsula o enmascara, si se compara con Simulink, para crear un bloque o componente con entradas y salidas definidas.
 - Graphic, incluye herramientas simples para crear gráficas y escribir textos en el área de trabajo.
 - Signals, proporciona un buscador de las señales existentes en la simulación.

A continuación se presenta una imagen que compila las ventanas **Task cards** recién mencionadas,

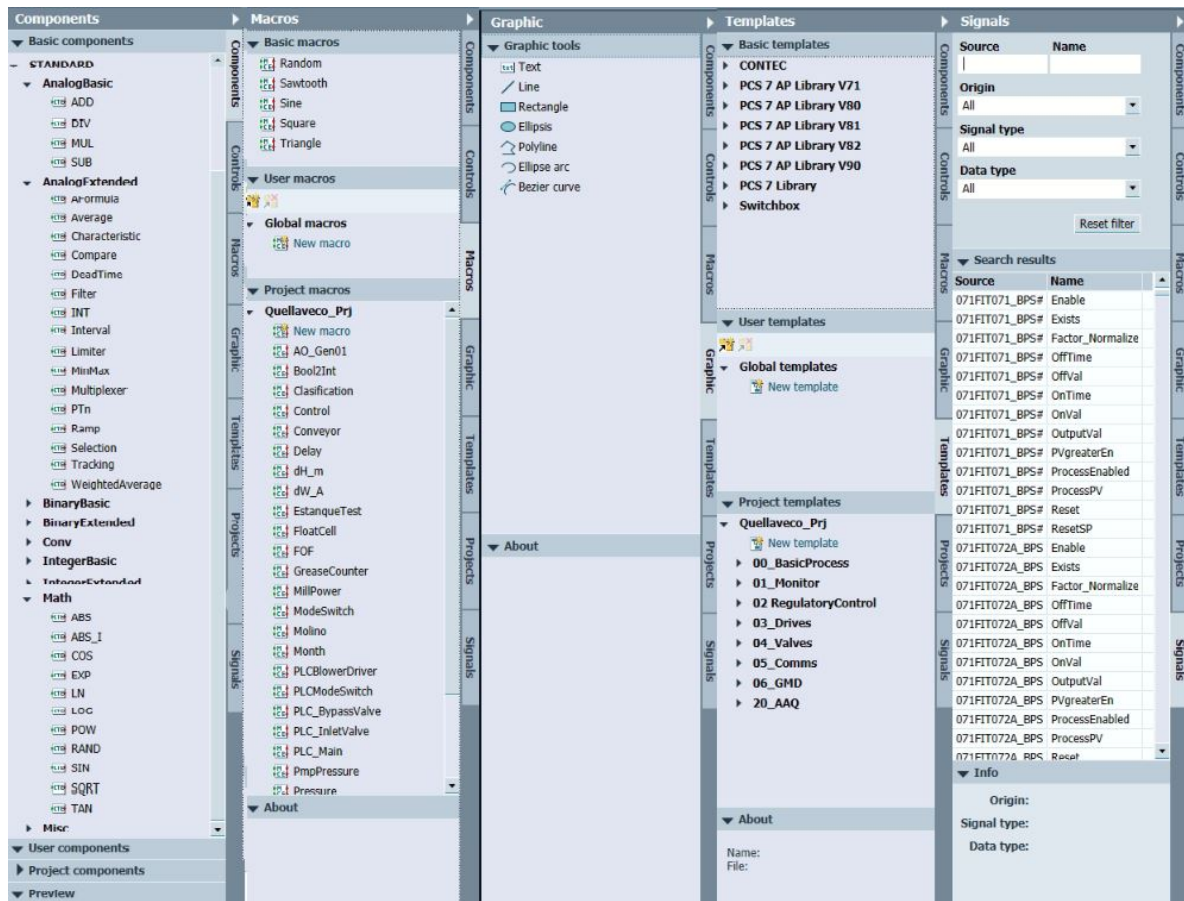


Figura 3.3: Compilación ventanas Task card.

En particular, en este trabajo de memoria se abre el proyecto Quellaveco_Prj, el cual cuenta con el siguiente árbol de organización como estructura.



Figura 3.4: Estructura del proyecto.

En la figura [3.4](#) se pueden identificar tres secciones de couplings:

- OPC Server, permite establecer la conexión con las señales de entrada y salida de PCS7 en una simulación avanzada de proceso (APS).
- Shared Memory, permite la conexión entre MATLAB&Simulink y SIMIT.
- Virtual Controller, cuenta con dos PLC's: 3210_001 y 3210_101. Los cuales forman parte del PCS7 para controlar el molino SAG y el proceso.

En la siguiente figura se muestran algunos de los componentes de la sección Task card a utilizar en la simulación del molino SAG.

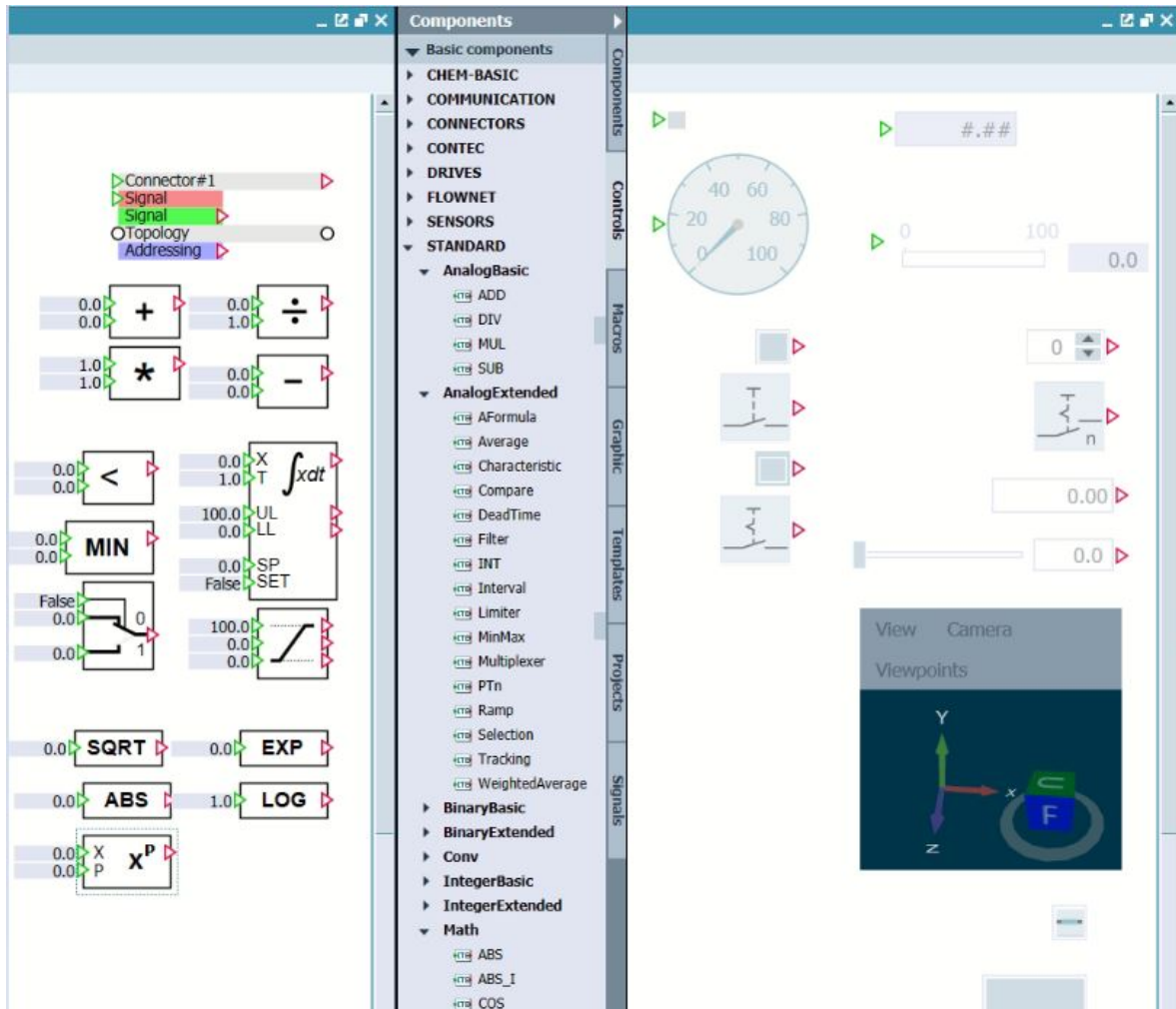


Figura 3.5: Ventana de componentes y gráficas utilizados.

En la zona blanca de la figura 3.5 se muestran objetos de las secciones correspondientes. En los componentes se utilizaron objetos del área de Connectors y Standard. En la primera se observan cinco tipos de conectores; Conector, Input, Output, Topology y Unit. Luego se muestran los 4 bloques análogos que permiten las 4 funciones matemáticas básicas; suma, resta, multiplicación y división. De la sección AnalogExtended se observan los componentes Compare, MinMax, Selection, INT y Limiter. En la sección Math, se tienen componentes para acceder a funciones matemáticas más específicas como SQRT (raíz cuadrada), ABS (valor absoluto), POW (potencia), EXP (exponencial) y LOG (logaritmo). Vale destacar que estos componentes se deben arrastrar al espacio de trabajo para utilizarlos, al seleccionarlos se permite cambiar sus propiedades y valores en la ventana Properties. Además, se pueden conectar a las señales requeridas de dos maneras. La primera es usar un objeto de la librería Connectors y en la ventana Properties seleccionar la señal a utilizar. La segunda requiere buscar directamente el nombre de la señal en la ventana Signals.

A la derecha de la figura 3.5 se observan diferentes componentes de la sección Controls para visualizar valores o accionar inputs como displays analógicos y digitales, switches, botones, etc.

3.1.1. Simulación SIMIT de un estanque

En esta sección se presenta una simulación básica de un estanque utilizando SIMIT, con el objetivo de demostrar el funcionamiento de la aplicación. El sistema incluye una válvula controlada de entrada con un flujo constante de $10 \text{ m}^3/\text{min}$ y un flujo de salida de $5 \text{ m}^3/\text{min}$. El orificio de salida tiene un área de 0.014 m^2 (radio de 6.68 cm) y está conectado a una válvula de salida tipo (abierto/cerrado). Posteriormente, se conecta un transmisor de flujo de salida. Además, el estanque incorpora un sensor de nivel tipo HL, que indica niveles altos (H) y bajos (L). Esta información se representa con sus códigos correspondientes en la siguiente figura.

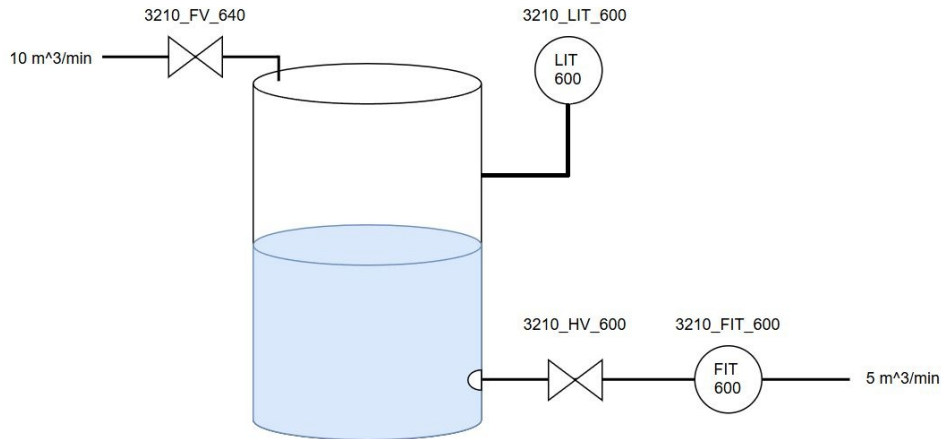


Figura 3.6: Esquema del sistema de estanque simple.

3.1.1.1. Modelo de un estanque simple

Para simular el comportamiento dinámico del estanque se debe aplicar el principio de balance de masas entre los flujos de entrada y salida del sistema. Este principio nace del concepto de conservación de masas, “la masa no se crea ni se destruye, solo se transforma” por lo que las entradas deben ser iguales a las salidas, y, si el material se acumula dentro de un sistema se tiene que la variación del volumen será igual a la diferencia entre entradas y salidas. Aplicándolo al sistema de estanque:

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (3.1)$$

Donde:

- $V(t)$: volumen de agua dentro del estanque en función del tiempo
- $Q_{in}(t)$: flujo de entrada de agua al estanque
- $Q_{out}(t)$: flujo de salida de agua del estanque

El volumen en función del tiempo de un estanque con un área de superficie constante A se relaciona al nivel de altura del agua mediante,

$$V(t) = A \cdot h(t) \quad (3.2)$$

Derivando la ecuación anterior y sustituyéndola en la ecuación de balance de masas [3.1](#), se obtiene:

$$A \cdot \frac{dh(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \quad (3.3)$$

Despejando,

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{Q_{in}(t) - Q_{out}(t)}{A} \quad (3.4)$$

Se obtiene la ecuación diferencial [3.4](#) que describe el cambio del nivel de agua en el estanque en el tiempo. Mientras el flujo de entrada (Q_{in}) se considera constante, el flujo de salida (Q_{out}) se modela utilizando la ecuación de Torricelli:

$$Q_{out}(t) = C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h(t)} \quad (3.5)$$

Donde,

- C_d : coeficiente de descarga
- A_o : área del orificio de salida del estanque
- g : gravedad
- $h(t)$: nivel de agua en el estanque en el tiempo

Finalmente, el control de la válvula de entrada se activa en función del nivel de agua en el estanque.

3.1.1.2. Desarrollo en SIMIT

Se utiliza el controlador 3210_101 ya existente en la planta original. El primer paso para generar el estanque es agregar los instrumentos en PCS7, para que se agreguen las carpetas con los componentes configurados con sus entradas y salidas correspondientes en SIMIT.

Con el fin de implementar el modelo descrito en SIMIT, se crea una macro llamada “Estanque-Test”.

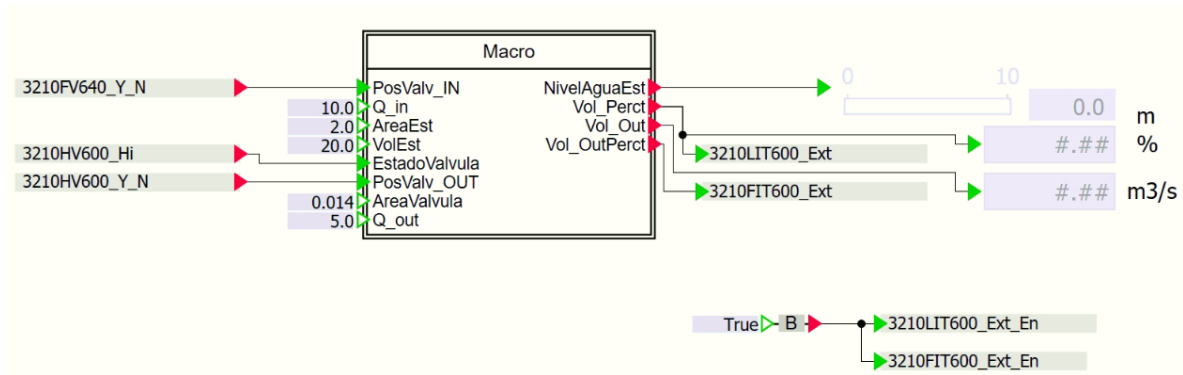


Figura 3.7: Macro del modelo del estanque en SIMIT.

Esta macro considera como entradas la posición de la válvula controlada de entrada (PosValv_IN), el flujo máximo de entrada (Q_{in}) de $10 \text{ m}^3/\text{min}$, el área del estanque (AreaEst) de 2 m^2 , el volumen del estanque (VolEst) de 20 m^3 , el área del orificio de salida (AreaValvula) de $0,014 \text{ m}^2$ y el flujo de salida máximo de $5 \text{ m}^3/\text{min}$.

Las salidas corresponden al nivel de agua del estanque (NivelAguaEst), el volumen en porcentaje del llenado del estanque (Vol_Perct), el flujo de salida del estanque (Vol_Out) y al flujo porcentual de salida del estanque (Vol_Out_Perct).

A continuación se presenta el contenido de la macro 3.7, la cual define las ecuaciones del modelo del estanque para el nivel 3.4 y el caudal de salida 3.5, utilizando bloques simples de SIMIT.

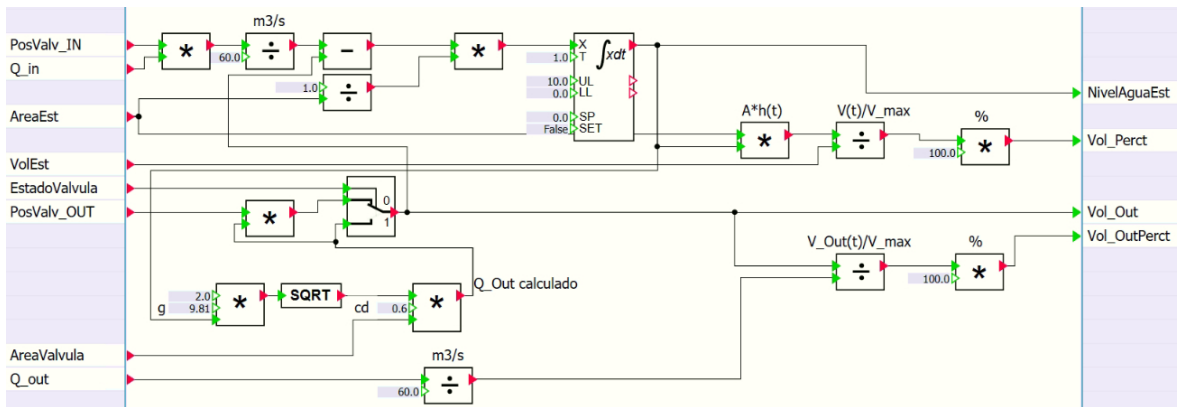


Figura 3.8: Modelo del estanque en SIMIT.

El modelo está diseñado para ajustar las unidades de tiempo, dado que el flujo de entrada se define en m^3/min , mientras que la ecuación de descarga utiliza m/s^2 para la gravedad. Para corregir este desajuste, se propone dividir las entradas de flujos por 60, con el fin de convertir la unidad temporal de minutos a segundos. Es importante señalar que, si se desea mostrar la salida en m^3/min , las salidas también deben multiplicarse por 60 para regresar a las unidades originales. Sin embargo, en esta simulación no se realiza esta conversión, ya que el modelo opera en segundos.

El flujo de salida, **Vol_Out**, depende del estado de la válvula (**EstadoValvula**), una señal

booleana que indica si la válvula está abierta (1) o cerrada (0). Este estado se utiliza en un selector condicional para que el modelo dinámico contemple ambas situaciones.

Cuando **EstadoValvula** es 0, se emplea la señal **PosValv_OUT**, proporcionada por *SIMIT*, para ajustar el flujo de salida según la posición real de la válvula, solo si esta señal es 0 el modelo representa que la válvula está cerrada. Esta consideración permite representar válvulas de apertura proporcional o con transientes más lentos que un cambio instantáneo. Cuando **EstadoValvula** es 1, el modelo aplica directamente la ecuación de Torricelli, asumiendo apertura total.

La misma lógica se aplica a la válvula de entrada, utilizando la señal **PosValv_IN** para modificar el flujo de entrada **Q_in** en función de su apertura.

En la figura [3.7](#) se puede observar que las señales 3210LIT600_Ext y 3210FIT600_Ext se conectan a una señal True, esto se realiza para que se activen los transmisores al momento de iniciar la simulación.

Finalmente se presenta una tabla con los valores de los parámetros del sistema .

Parámetro	Símbolo	Valor
Flujo máximo de entrada	Q_{in}	$10 m^3/min$
Área del estanque	$AreaEst$	$2m^2$
Volumen máximo del estanque	$VolEst$	$20m^3$
Estado de apertura de válvula	$EstadoValvula$	0/1
Área del orificio de salida del estanque	$AreaValvula$	$0,014m^2$
Flujo máximo de salida	Q_{out}	$5m^3/min$
Gravedad	g	$9,81m/s^2$
Coefficiente de descarga	C_d	0,6

Tabla 3.1: Parámetros utilizados en el modelo del estanque

Los resultados de las pruebas realizadas al estanque se muestran en la sección [4.3.1](#)

3.2. Simulación SIMIT del modelo dinámico del molino SAG

El trabajo del modelo en SIMIT utilizando bloques simples implica una simplificación muy alta del modelo, ya que no se permite el trabajo con matrices ni vectores en este tipo de implementación, lo que afecta directamente a la matriz de molienda GRIND y a los coeficientes de rechazo C.

Para demostrarlo se crea la macro Molino.

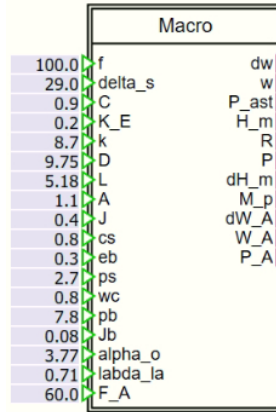


Figura 3.9: Macro Molino.

La cual internamente tiene el siguiente conexionado,

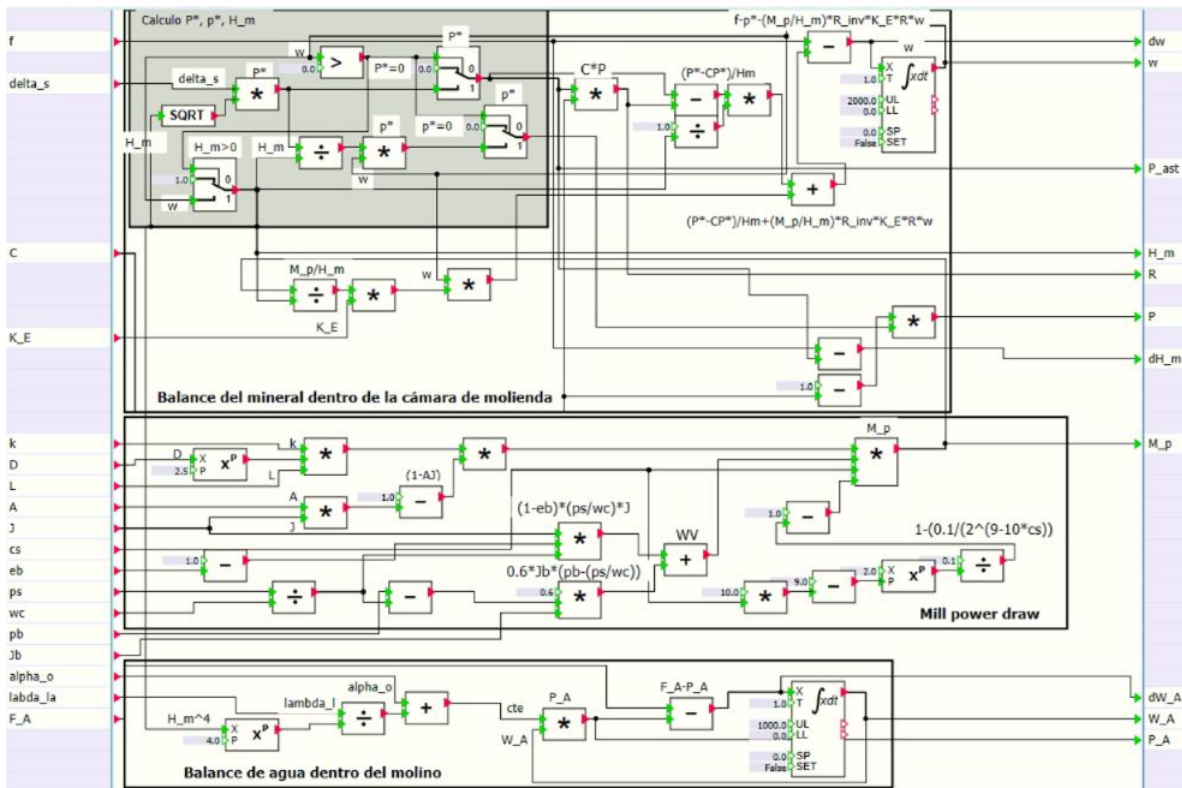


Figura 3.10: Molino simplificado para trabajar con bloques simples en SIMIT.

En este caso, el flujo de entrada es constante y no se distribuye en función de su tamaño, lo que invalida los balances de masa totales. Como consecuencia, el submodelo de molienda deja de representarse como una matriz de 12×12 , limitándose a una única tasa específica de molienda. Asimismo, el submodelo de clasificación se reduce a considerar únicamente un coeficiente de rechazo.

De esta manera, la implementación de un sistema dinámico basado en el tamaño de las rocas

en SIMIT, utilizando bloques simples, se torna altamente complejo, lo que motiva la búsqueda de alternativas.

Una de estas alternativas es aprovechar la integración de SIMIT con MATLAB&Simulink a través de memoria compartida (Shared Memory Coupling, SHM). Esta herramienta, integrada en la plataforma SIMIT, permite el intercambio de datos entre la plataforma y aplicaciones externas mediante una región de memoria reservada en el sistema host, accesible simultáneamente por ambas aplicaciones. Este método facilita una comunicación eficiente y, en este modelo específico, ofrece una solución efectiva para trabajar con vectores y matrices.

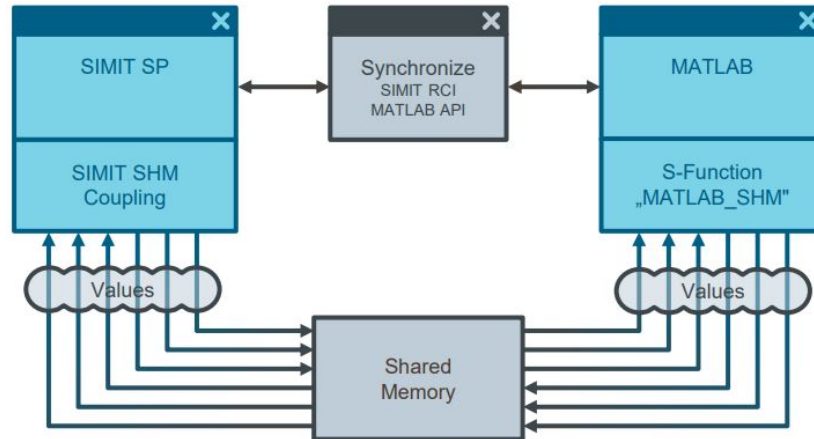


Figura 3.11: Fuente: Siemens AG, "SIMIT Shared Memory Coupling with MATLAB", Entry ID: 109761656, V1.0, 11/2018, pág. 5.

Otra opción es el uso de SIMIT CTE (Component Type Editor), una extensión de SIMIT que permite editar componentes existentes o crear bloques personalizados para propósitos específicos. SIMIT CTE utiliza un lenguaje similar a C#, permitiendo trabajar con arreglos de datos de manera interna. Lo que permite una implementación de vectores y matrices mediante arreglos. Esta implementación claramente no es la más sencilla y requiere múltiples iteraciones para verificar que el trabajo de operaciones matemáticas con las matrices deseadas se lleven a cabo y así confirmar el correcto funcionamiento de los cálculos. Por lo que no es una solución intuitiva, pero permitiría la posibilidad de contar con un bloque en SIMIT que simule el modelo de molino SAG planteado.

3.3. Integración de la simulación SIMIT con la simulación de la planta concentradora

Dado que el lenguaje gráfico de SIMIT solo permite simular sistemas escalares, en esta sección se evaluarán dos opciones para trabajar el modelo del molino en SIMIT y se describirá el proceso de ambas para encontrar la mejor opción.

3.3.1. Conexión de SIMIT con Matlab&Simulink usando SHM y SyncSi-Ma

Siguiendo el procedimiento descrito en el manual [16], se establece la conexión entre SIMIT y MATLAB/Simulink mediante el uso de memoria compartida (“Shared Memory Coupling” o SHM). A continuación, se detallan los pasos necesarios para configurar y sincronizar ambas simulaciones.

3.3.1.1. Configuración de SIMIT para SHM Coupling

El primer paso es configurar el modo de operación en SIMIT. Para ello, en el Project Manager, se debe acceder a Properties y establecer el Operation Mode en Synchronous.

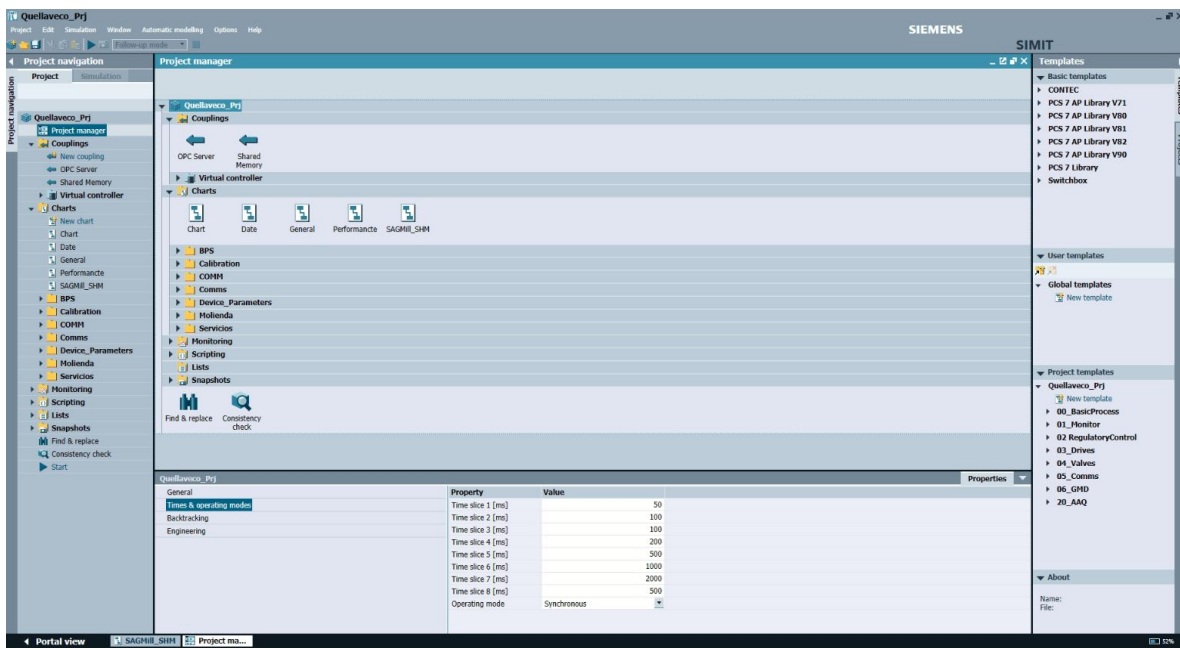


Figura 3.12: Configuración del modo síncrono en SIMIT.

Luego, se debe crear el acoplamiento de memoria compartida en SIMIT. Para esto, en la sección Couplings, seleccionar **New Coupling** y elegir la opción **Shared Memory**. Este acoplamiento permite la transferencia de datos entre SIMIT y MATLAB/Simulink a través de un área de memoria reservada en el sistema.

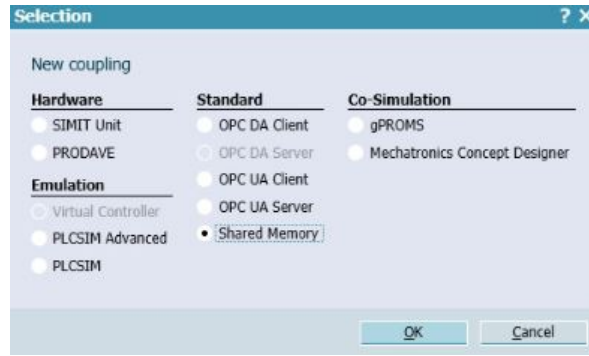


Figura 3.13: Configuración del proyecto para habilitar SHM.

A continuación, se procede a la configuración de los parámetros de memoria compartida, definiendo las señales de entrada y salida que se intercambiarán con Simulink. Es importante asegurar que las señales estén correctamente configuradas y que el tamaño de la memoria compartida sea suficiente para almacenar los datos. Además, el nombre de la memoria compartida se setea a “SIMITSHM” en el área de propiedades.

El tamaño de la memoria compartida (SHM) se calcula sumando el área de cabecera y el área de datos. En este caso, el área de cabecera ocupa 8 bytes, y el área de datos depende del número y tipo de señales. Para 2 señales de entrada y 4 de salida, todas de tipo **REAL** (4 bytes cada una), el área de datos ocupa 24 bytes. Así, el tamaño total de la SHM es de 32 bytes. Sin embargo, SIMIT reserva un mínimo de 2048 bytes, por lo que la SHM tendrá ese tamaño, asegurando que otras aplicaciones accedan a la misma cantidad de memoria.

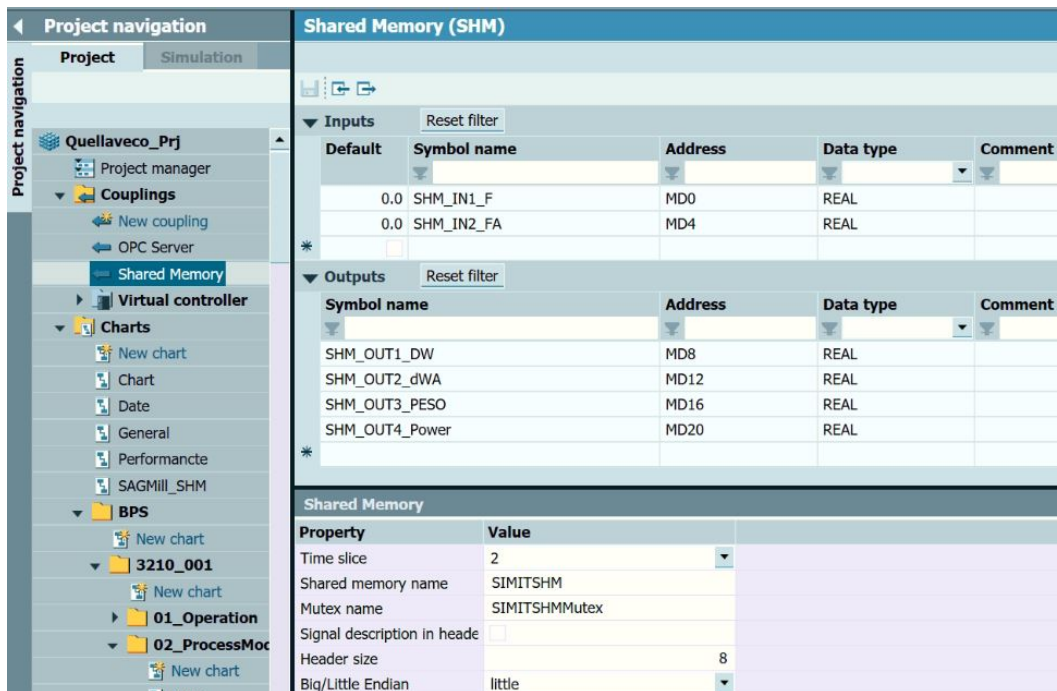


Figura 3.14: Definición de entradas y salidas en SHM.

Ahora se debe crear un nuevo **Chart** con el mismo nombre del proyecto a crear en Simulink, en este caso, “SAGMill_SHM”. Luego, en el Task card **Signals**, se seleccionan las señales correspondientes y se arrastran al área de trabajo. Estas señales se conectan a sliders o displays digitales para permitir la modificación de las entradas y la visualización de las salidas, lo que facilita la realización de pruebas antes de conectar las señales a la planta.

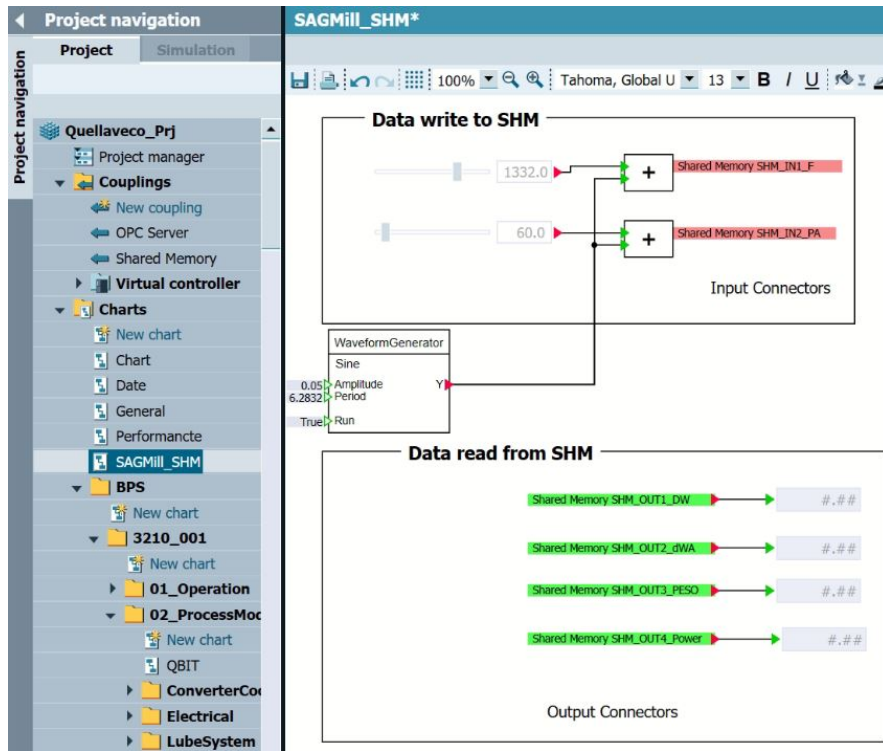


Figura 3.15: Conexión de señales de entrada y salida a SHM.

3.3.1.2. Configuración en MATLAB/Simulink

Para permitir la comunicación con SIMIT, es necesario adaptar el modelo base en C++ (SHM.cpp) que configura un bloque “S-Function” en Matlab para usar en Simulink. Este bloque permite acceder a la memoria compartida desde MATLAB/Simulink.

3.3.1.3. Modificación del archivo SHM.cpp

El archivo SHM.cpp proporcionado en el manual debe ser modificado para adaptarlo a las necesidades del proyecto. En particular, se deben ajustar los siguientes parámetros:

- **Nombre de la memoria compartida:** El nombre de la memoria compartida en Simulink debe coincidir con el nombre configurado en SIMIT. Por defecto, el nombre es “SIMITSHM”, pero puede modificarse en la línea `define SHM_NAME "SIMITSHM"`.

```

Editor - C:\Users\Administrator\Documents\MATLAB\SHM_MATLAB\SHM.cpp
SHM.cpp
1 // *****
2 // **** To build this mex function use: ****
3 // **** ****
4 // **** mex SHM.cpp -I'C:\Boost' -L'C:\Boost\stage\lib' ****
5 // **** ****
6 // **** The -I and -L parameter depends on the installation path ****
7 // **** of the boost library on your system !!! ****
8 // *****
9
10 //***** Shared-Memory-Header
11 #include <boost/interprocess/windows_shared_memory.hpp>
12 #include <boost/interprocess/mapped_region.hpp>
13 #include <mex.h>
14 //-----
15 // #include "sfun_cppcount_cpp.h" // Don't need anymore
16
17 #define S_FUNCTION_LEVEL 2
18 #define S_FUNCTION_NAME SHM
19
20 #define SHM_NAME "SIMITSHM"
21
22 //-----
23 // Need to include simstruc.h for the definition of the SimStruct and
24 // its associated macro definitions.
25 #include "simstruc.h"
26
27 // #define IS_PARAM_DOUBLE(pVal) (mxIsNumeric(pVal) && !mxIsLogical(pVal) &&\
28 // !mxIsEmpty(pVal) && !mxIsSparse(pVal) && !mxIsComplex(pVal) && mxIsDouble(pVal))
29

```

Figura 3.16: Código SHM encabezado.

- **Número de entradas y salidas:** Dado que en SIMIT se configuraron 2 entradas y 4 salidas, el bloque S-Function en Simulink debe tener el mismo número de conexiones. Esto se define en la función `mdlInitializeSizes(SimStruct *S)` del archivo `SHM.cpp`.

```

34 static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
35 {
36     // No expected parameters
37     ssSetNumSFcnParams(S, 0);
38     // Parameter mismatch will be reported by Simulink
39     if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
40         return;
41     }
42     // Specify I/O
43     // Puertos salida simit
44     if (!ssSetNumInputPorts(S, 4)) return;
45     ssSetInputPortWidth(S, 0, DYNAMICALLY_SIZED); // Entrada SHM_DW
46     ssSetInputPortWidth(S, 1, DYNAMICALLY_SIZED); // Entrada SHM_dWA
47     ssSetInputPortWidth(S, 2, DYNAMICALLY_SIZED); // Entrada SHM_PESO
48     ssSetInputPortWidth(S, 3, DYNAMICALLY_SIZED); // Entrada SHM_POWER
49     ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
50     ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 1, 1);
51     ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 2, 1);
52     ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 3, 1);
53
54     // puertos entrada simit
55     if (!ssSetNumOutputPorts(S, 2)) return;
56     ssSetOutputPortWidth(S, 0, DYNAMICALLY_SIZED); // Salida SHM_F
57     ssSetOutputPortWidth(S, 1, DYNAMICALLY_SIZED); // Salida SHM_PA
58
59
60     ssSetNumSampleTimes(S, 1);
61
62     // Reserve place for C++ object
63     ssSetNumPWork(S, 1);
64
65     ssSetSimStateCompliance(S, USE_CUSTOM_SIM_STATE);
66

```

Figura 3.17: Entradas y salidas SHM.cpp

Se observa que las entradas y salidas están invertidas con respecto a la SHM definida en SIMIT. Esto ocurre porque la S-función de Simulink escribe en la memoria compartida los valores que SIMIT interpreta como salidas y, a su vez, lee las salidas de SIMIT como entradas. A continuación, se presenta la sección donde se programa la asignación de las variables internas y la llamada para leer y escribir en la SHM, como se muestra en la Figura [3.18](#).

Esto ocurre en la función `static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)` y se divide en tres etapas principales:

1. Lectura de las entradas de Simulink: Se utiliza la función


```
InputRealPtrsType u1 = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S, 0); // Entrada 1.
```
2. LLamar a la función de memoria compartida desde la librería boost: Se utiliza la función


```
windows_shared_memory SHMEM(open_or_create, SHM_NAME, read_write, 2048); .
```
3. Escritura en la memoria compartida: Se utiliza la función


```
SHM_Data[i] = (float)*u1[0]; // Escribe el valor de la entrada 1 en la SHM.
```

```

99 // block.
100 static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
101 { // Retrieve C++ object from the pointers vector
102 // Get data addresses of I/O
103 // Leer entradas desde Simulink
104 InputRealPtrsType u1 = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S, 0); //
105 InputRealPtrsType u2 = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S, 1); //
106 InputRealPtrsType u3 = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S, 2); //
107 InputRealPtrsType u4 = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S, 3); //
108 // Leer resultados desde memoria compartida
109 real_T* y1 = ssGetOutputPortRealSignal(S, 0); //
110 real_T* y2 = ssGetOutputPortRealSignal(S, 1); //
111
112
113 using namespace boost::interprocess; //***** Shared-Memory
114 windows_shared_memory SHDMEM(
115     open_or_create,
116     SHM_NAME,
117     read_write,
118     2048 // Allocated memory in the RAM
119 );
120 mapped_region region(
121     SHDMEM,
122     read_write
123 );
124 float* const SHM_Data = static_cast<float*>( region.get_address() );
125 SHM_Data [0] = (long) 48; //***** size of used SHM
126 SHM_Data [1] = (long) 8; //***** size of the SHM Header
127
128 y1[0] = SHM_Data [2]; //*** Write SHM values
129 y2[0] = SHM_Data [3]; //*** to SIMULINK block outputs
130 SHM_Data [4] = (float) *u1[0]; //*** Write SIMULINK block inputs
131 SHM_Data [5] = (float) *u2[0]; //*** to SHM values
132 SHM_Data [6] = (float) *u3[0]; //*** Write SIMULINK block inputs
133 SHM_Data [7] = (float) *u4[0]; //*** to SHM values
134 }

```

Figura 3.18: Funcionalidad SHM.

3.3.1.4. Compilación del código fuente en MATLAB

Es necesario instalar la biblioteca **Boost** y configurar un compilador compatible con MATLAB.

1. Instalar la biblioteca Boost en Windows, la cual se puede descargar desde <https://www.boost.org/>.
2. Instalar el compilador MinGW-w64 y el Add-On **MinGW Add-On** en MATLAB.
3. Compilar el archivo SHM.cpp utilizando el siguiente comando en MATLAB:

```
mex SHM.cpp -I"C:\Program Files\boost_1_82_0" -L"C:\Program Files\boost_1_82_0\stage\lib "
```

En el servidor, donde MATLAB versión **R2021b** está instalado, se usa:

```
mex SHM.cpp -I"C:\Program Files\boost\boost_1_82_0" -L"C:\
Program Files\boost\boost_1_82_0\stage\lib"
```

Donde:

- -I indica la ruta de los archivos de cabecera de Boost.
- -L especifica la ubicación de las bibliotecas compiladas de Boost.

3.3.1.5. Configuración de proyecto en Simulink

Con el proyecto “SAGMill_SHM” creado en la misma carpeta que el archivo “SHM.cpp”, el primer paso es configurar los parámetros de la simulación. Para ello, se accede a Simulation > Model Configuration Parameters y se establece el solver con el método **Runge-Kutta** de tipo Fixed-step, con un paso fijo de **0.1 s** y un tiempo de ejecución infinito. Esto garantiza la sincronización de la simulación en Simulink con SIMIT.

3.3.1.6. Uso del bloque “Assertion”

Para pausar la simulación en Simulink después de cada paso de tiempo, se utiliza un bloque “Assertion”. Este bloque ejecuta el comando de MATLAB:

```
set_param(bdroot,'SimulationCommand','pause')
```

Encargado de pausar la simulación cuando recibe un valor de 0 en su entrada. Esto permite que la simulación avance paso a paso, sincronizada con SIMIT.

Para ello se debe ajustar los parámetros del bloque habilitando la opción Enable assertion y escribiendo el código antes mencionado en el espacio establecido.

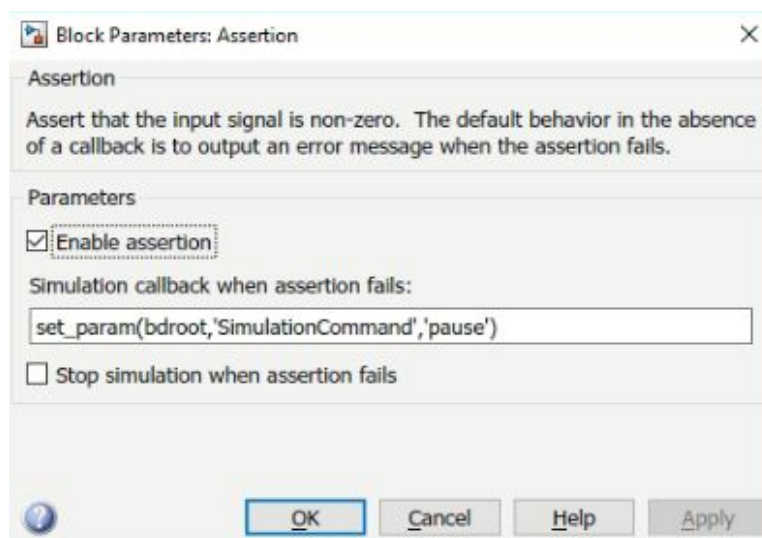


Figura 3.19: Configuración del bloque “Assertion” en Simulink.

Además, se debe conectar un bloque constante con valor 0 a la entrada del bloque “Assertion”.

3.3.1.7. Bloque S-Function

El paso final para configurar el proyecto en **Simulink** consiste en agregar el bloque **S-Function** (ubicado en *Simulink > User-Defined Functions*) y especificar en su configuración el nombre **SHM**, con el fin de invocar el código compilado en *MATLAB* desde el archivo **SHM.cpp**. Posteriormente, se debe ajustar el tamaño del bloque y realizar las conexiones correspondientes al modelo que se desea simular.

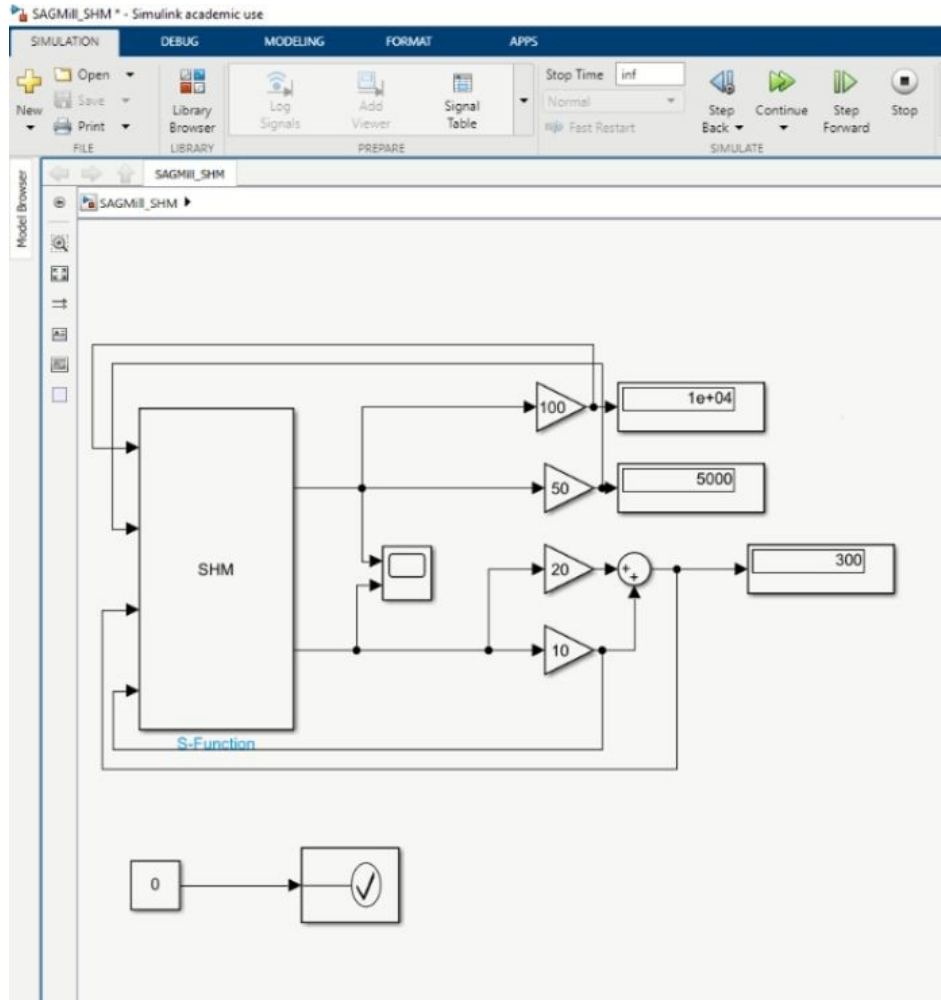


Figura 3.20: Simulink SHM.

En la Figura [3.20](#) se muestran las conexiones de la S-Function que enlaza las variables compartidas con SIMIT a bloques de ganancias y sumas utilizadas para verificar la comunicación entre ambos programas, la cual se confirma exitosamente. Cabe destacar que, en este modo de prueba, la simulación se detiene después de cada ciclo debido al funcionamiento del bloque Assertion. Para evitar esta interrupción y garantizar la sincronización entre SIMIT y MATLAB/Simulink, es necesario utilizar una tercera aplicación que reanude automáticamente la simulación en Simulink sin pérdida de información en SIMIT.

3.3.1.8. Sincronización con SyncSiMa

Para sincronizar el tiempo de ejecución entre SIMIT y MATLAB&Simulink, se utiliza la aplicación **SyncSiMa**, la cual gestiona la ejecución de ambos entornos en sincronía. SyncSiMa actúa como un intermediario que recibe una señal de SIMIT para avanzar un paso de tiempo y luego envía un comando a MATLAB&Simulink para continuar la simulación.

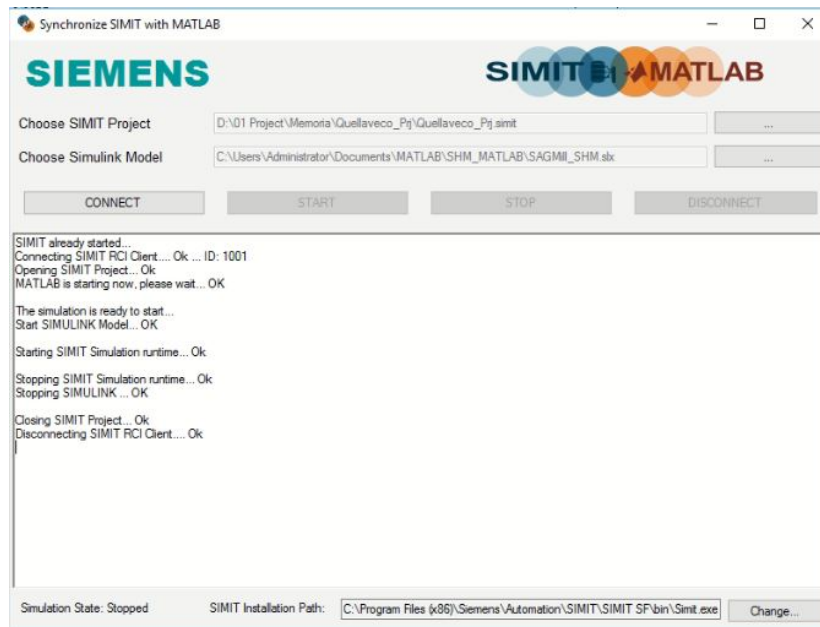


Figura 3.21: Interfaz de SyncSiMa en operación.

Los pasos para operar esta aplicación son:

1. Abrir SIMIT sin seleccionar ningún proyecto y asegurarse de que MATLAB&Simulink esté cerrado
2. Ejecutar SyncSiMa y seleccionar las rutas de los archivos correspondientes para SIMIT y Simulink.
3. Hacer click en el botón **CONNECT** en SyncSiMa, luego abrir el proyecto en SIMIT y esperar a que cargue completamente antes de presionar **OK** en la ventana emergente.
4. Confirmar la conexión presionando **OK** en la ventana emergente.
5. Iniciar la simulación presionando **START** en SyncSiMa y en SIMIT, luego esperar a que la simulación comience.
6. Confirmar el inicio de la simulación presionando **OK** en la ventana emergente.

Para desconectar la aplicación, se debe:

1. Presionar el botón **STOP** en SyncSiMa y esperar a que ambos programas se detengan
2. Hacer click en **DISCONNECT** y esperar a que los programas se cierren correctamente.

Seguir estos pasos garantiza una conexión estable con la memoria compartida (SHM) y evita problemas en la simulación.

3.3.1.9. Modelo de molino SAG

Con la verificación del bloque SHM y la sincronización entre SIMIT y Simulink completadas, solo resta integrar el modelo del molino SAG. Este modelo es el mismo desarrollado en la sección 2.1, y sus señales de entrada y salida se conectan directamente al bloque SHM como se observa a continuación.

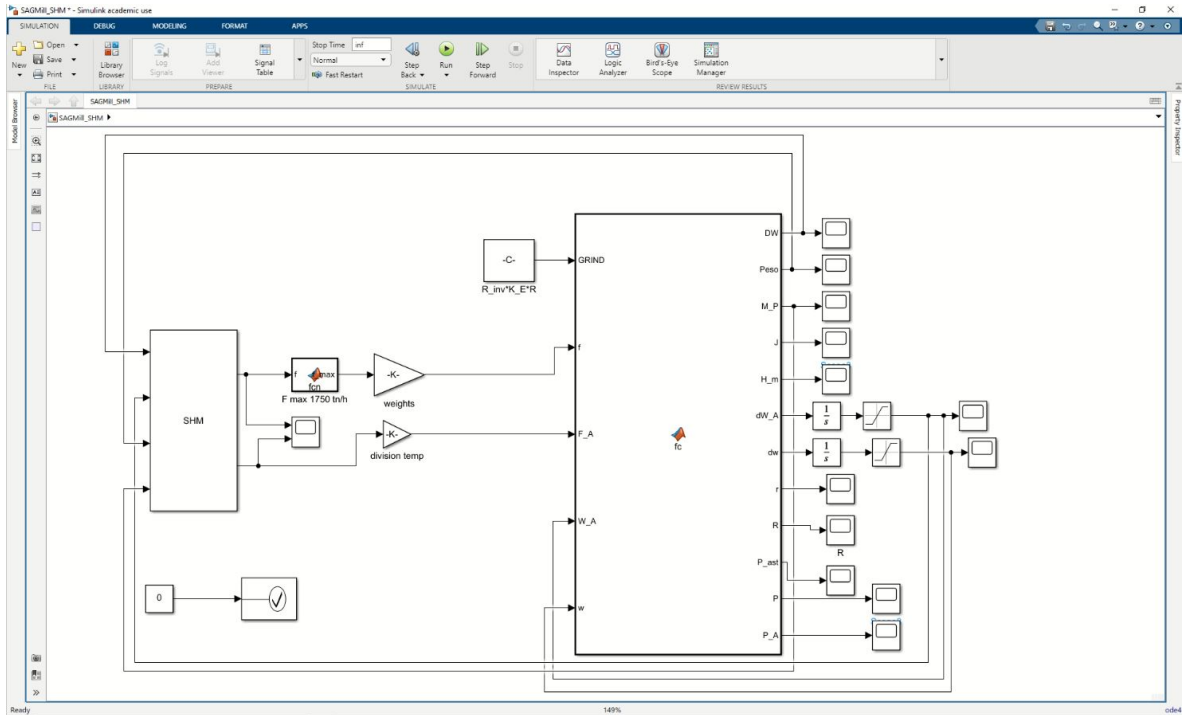


Figura 3.22: Modelo de molino SAG en Simulink usando SHM.

Al probar el modelo de tamaño 12×12 se observa que el programa requiere demasiados recursos, generando un retraso significativo entre cada paso de tiempo debido a que SIMIT opera en modo de tiempo real. Para mejorar este problema, se incrementa el paso de tiempo a 0.58 s, lo que permite simular correctamente el comportamiento del molino por aproximadamente cincuenta minutos. Sin embargo, después de este período, la simulación se detiene y no se vuelve a ejecutar, a pesar de que no se ha desconectado desde SyncSiMa.

Posteriormente, se prueba con un **modelo reducido de 3×3** , obteniendo mejoras en la ejecución, ya que la simulación se extiende por cerca de **una hora y 25 minutos**. Esta solución permite probar el molino por un tiempo limitado. Según el manual [16], SyncSiMa es un programa de ejemplo diseñado para demostrar la sincronización entre SIMIT y MATLAB/Simulink, por lo que puede presentar fallas. Es posible que la interrupción de la simulación se deba a un problema con esta aplicación. No obstante, también podría deberse a que el modelo del molino SAG requiere un alto uso de recursos en el servidor. Además, es importante destacar que no se recomienda utilizar bloques de scope o to workspace en la simulación de Simulink cuando se

conecta con SIMIT, ya que incrementan el costo computacional al tener que almacenar datos para luego graficarlos.

En la sección [4.3.3](#) se presentan los resultados de las pruebas realizadas a la simulación utilizando SHM.

3.3.2. SIMIT CTE para creación de componentes en lenguaje de texto

Para trabajar con SIMIT CTE se siguen las instrucciones y recomendaciones de [17](#).

SIMIT CTE permite crear un componente desde cero o editar un componente existente.

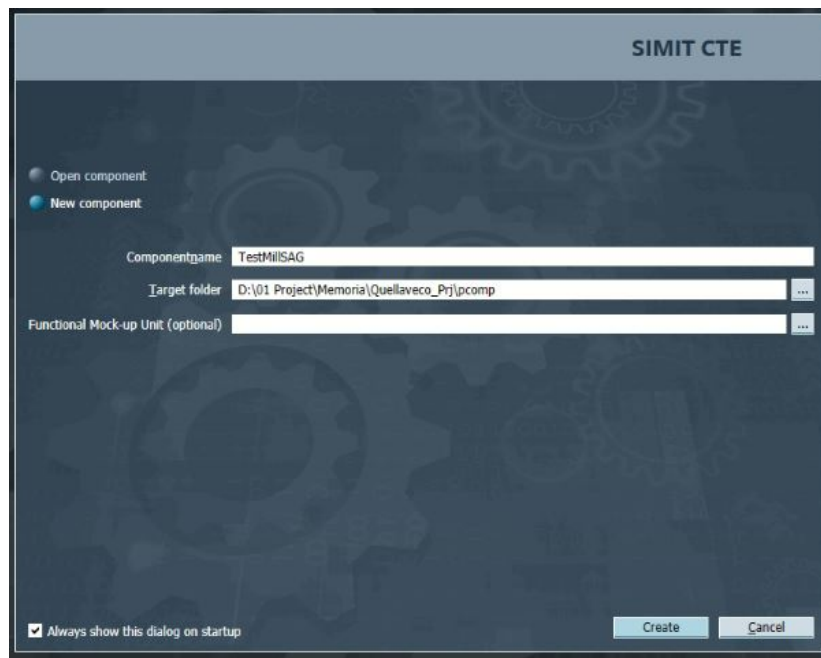


Figura 3.23: Ventana crear componente.

En este caso se crea el componente y se nombra “TestMillsAG”. Luego de realizar estas acciones, se abre la interfaz principal.



Figura 3.24: Interfaz principal SIMIT CTE.

En la figura 3.24 se puede observar a la izquierda tres secciones principales, en la primera se describen los datos generales del proyecto, sus conexiones al bloque y los parámetros a utilizar. En la segunda **Behavior**, se describe el modelo del bloque. Esta carpeta se divide en **States**, los estados que se utilizarán para las ecuaciones diferenciales, la inicialización o **Initialization** de las variables, en **Cyclic calculation** se describen los cálculos a realizar por el bloque y las actualizaciones de las ecuaciones diferenciales. En **Functions** se pueden crear funciones que después solo se deben llamar en **Cyclic calculation** para poder utilizarlas.

La última carpeta corresponde a **Visualization** en donde se puede editar la gráfica del componente en **Basic symbol** o agregar link y detalles más avanzados o personalizables al bloque.

A la derecha de la interfaz se encuentran las Task Cards, similares a las de SIMIT SP. La barra de herramientas también presenta un diseño similar, pero en lugar de incluir herramientas para la ejecución de la simulación, dispone de un ícono con dos flechas que permite compilar los cambios realizados y verificar posibles errores.

3.3.2.1. Plantear modelo de molino SAG

Al considerar que el sistema trabaja con vectores de 12 elementos y que la matriz GRIND es de tamaño 12×12 , es fundamental verificar que las operaciones vectoriales y matriciales se realicen correctamente. Es importante tener en cuenta que esta aplicación solo permite trabajar con arreglos simples, lo que requiere recorrer el arreglo utilizando dos bucles for para representar las filas y columnas.

Se crean las matrices GRIND, C e I en el bloque, junto con el vector weights. El resto del código

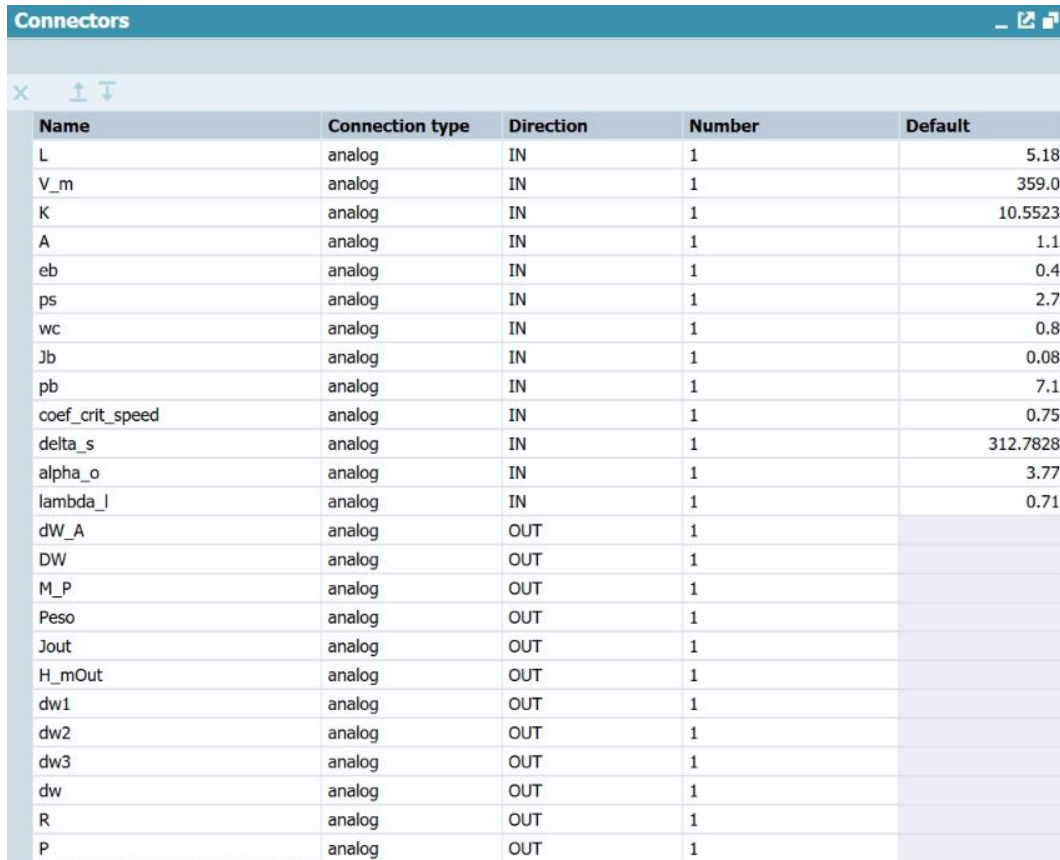
de Simulink se traduce a C# y se prueba el modelo. Durante varias iteraciones, se descubre que el programa **no permite trabajar con ecuaciones diferenciales en forma de arreglos**, lo que obliga a separar los 12 elementos. No obstante, al realizar esta separación, se observa que el programa no funciona correctamente al trabajar con más de **5 ecuaciones diferenciales** simultáneamente, lo que lleva a la decisión de reducir el sistema a tres elementos.

Para ello, se considera que los valores de las entradas y salidas se acumulan en 3 grupos de 4 elementos cada uno, con el objetivo de obtener los nuevos valores del vector weights para la alimentación de mineral. En MATLAB, se aplica el mismo enfoque a los vectores intermedios de la cámara de molienda, lo que permite calcular los nuevos valores de K_E y re-dimensionar la matriz GRIND **a un tamaño de 3×3** .

Además, cabe destacar que en las diferentes iteraciones realizadas para conocer el funcionamiento del programa se observa que los valores de los estados no pueden utilizarse dentro de un bucle for, ya que cada vez que se emplean los bucles con switch case, los valores integrados solo aumentan, sin seguir el comportamiento dinámico real de la ecuación diferencial. Finalmente, se encuentra una solución creando variables globales que permitan replicar las ecuaciones diferenciales fuera del bloque, eliminando los cálculos dentro del bucle for. Aunque esta solución reduce la eficiencia del código en términos de codificación, logra el objetivo de trabajar correctamente con las ecuaciones diferenciales.

3.3.2.2. Datos generales

En esta sección se definen los valores de las conexiones de entradas y salidas del bloque,



Name	Connection type	Direction	Number	Default
L	analog	IN	1	5.18
V_m	analog	IN	1	359.0
K	analog	IN	1	10.5523
A	analog	IN	1	1.1
eb	analog	IN	1	0.4
ps	analog	IN	1	2.7
wc	analog	IN	1	0.8
Jb	analog	IN	1	0.08
pb	analog	IN	1	7.1
coef_crit_speed	analog	IN	1	0.75
delta_s	analog	IN	1	312.7828
alpha_o	analog	IN	1	3.77
lambda_l	analog	IN	1	0.71
dW_A	analog	OUT	1	
DW	analog	OUT	1	
M_P	analog	OUT	1	
Peso	analog	OUT	1	
Jout	analog	OUT	1	
H_mOut	analog	OUT	1	
dw1	analog	OUT	1	
dw2	analog	OUT	1	
dw3	analog	OUT	1	
dw	analog	OUT	1	
R	analog	OUT	1	
P	analog	OUT	1	

Figura 3.25: Connectors SIMIT CTE.

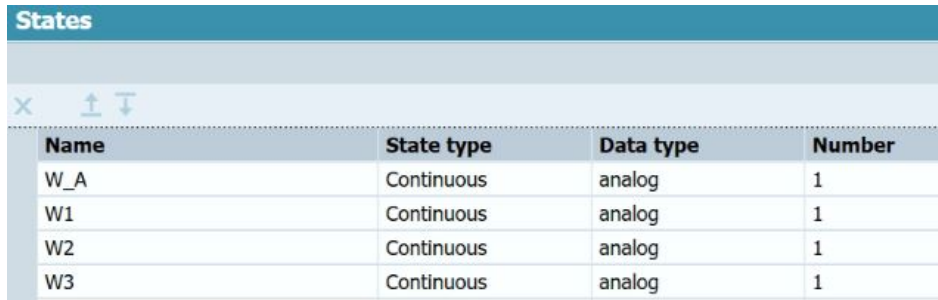
Las entradas incluyen los flujos de entrada de mineral y líquidos, junto con todos los parámetros del modelo para permitir que el bloque sea manipulable y de la opción de representar molinos de diferentes dimensiones.

Las salidas incluyen las variables de interés de peso del molino, la potencia consumida y la descarga total de este. Además, de variables interesantes para verificar el funcionamiento del molino como dW_A , $Jout$, H_mout , los valores de las ecuaciones diferenciales, P y R .

No se define información en la sección **Parameter**.

3.3.2.3. Behavior Molino SAG

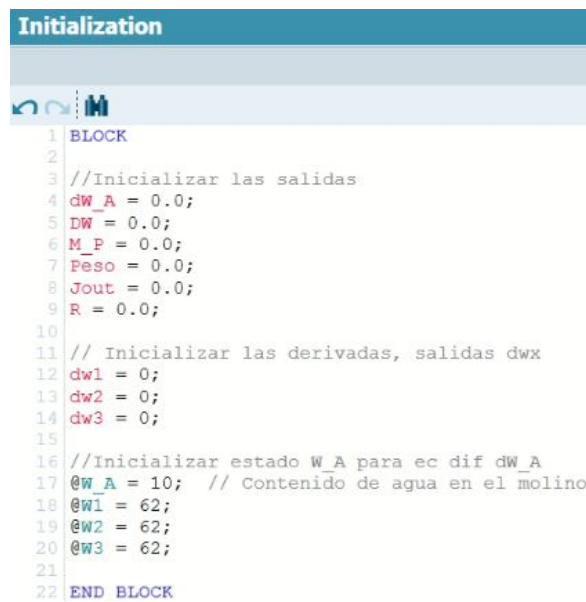
Se definen los estados para trabajar con las ecuaciones diferenciales [L.16](#) y [L.14](#) del balance dinámico del molino. Considerando que la primera se representa en sus tres partes.



Name	State type	Data type	Number
W_A	Continuous	analog	1
W1	Continuous	analog	1
W2	Continuous	analog	1
W3	Continuous	analog	1

Figura 3.26: Estados SIMIT CTE.

Luego, se inicializan las variables,



```

1 BLOCK
2
3 //Inicializar las salidas
4 dW_A = 0.0;
5 DW = 0.0;
6 M_P = 0.0;
7 Peso = 0.0;
8 Jout = 0.0;
9 R = 0.0;
10
11 // Inicializar las derivadas, salidas dwx
12 dw1 = 0;
13 dw2 = 0;
14 dw3 = 0;
15
16 //Inicializar estado W_A para ec dif dW_A
17 @W_A = 10; // Contenido de agua en el molino
18 @W1 = 62;
19 @W2 = 62;
20 @W3 = 62;
21
22 END BLOCK

```

Figura 3.27: Inicialización de variables SIMIT CTE.

Como se observa en la figura anterior, la inicialización requiere establecer tanto las salidas definidas como los estados. Esto último equivale a definir las condiciones iniciales de las integrales.

En *Cyclic calculation* se define el código trabajado que modela el molino SAG, el cual se encuentra anexo en [6.3](#).

En este programa, los cálculos matemáticos y la asignación de salidas deben realizarse dentro de estructuras tipo **BLOCK**. Fuera de estas, es posible definir variables globales y las ecuaciones diferenciales del sistema. Para ello, se utiliza el prefijo \$ antes del estado relacionado a la ecuación diferencial. Además, en caso de requerir correcciones por límites o condiciones específicas, se emplea el operador #.

3.3.2.4. Visualization

Se trabaja la visualización del componente creado del molino SAG en la sección Basic symbol y se presenta a continuación.

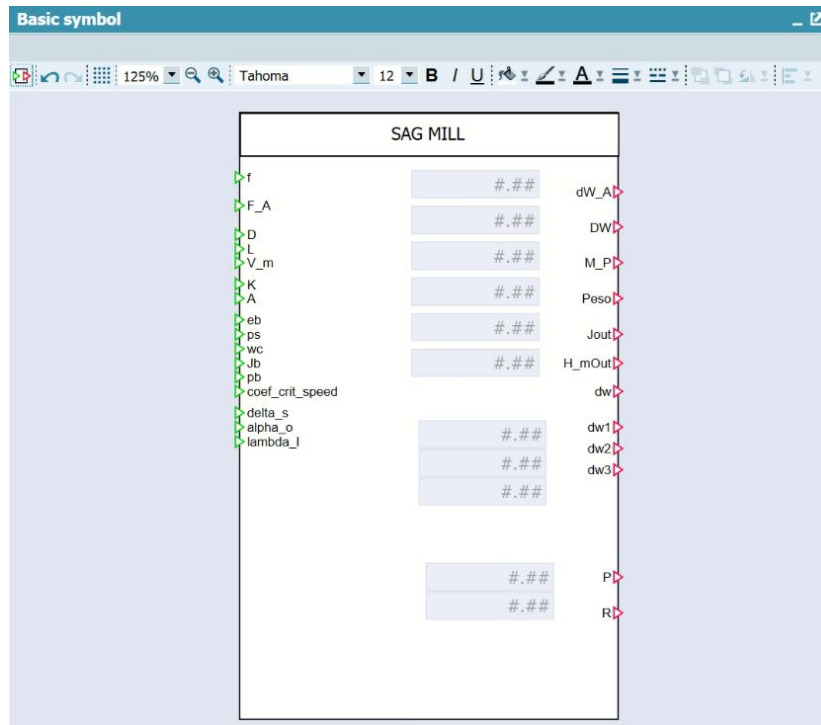


Figura 3.28: Basic symbol Molino SAG en SIMIT CTE.

A la izquierda del bloque se definen las entradas y los parámetros del modelo, mientras que a la derecha se ubican las salidas. Dentro del bloque, se incorporan displays digitales para visualizar los cambios en las salidas.

Los resultados de las pruebas usando el componente en lazo cerrado con la planta se muestran en la sección [4.3.4.2](#).

4 | Configuración de un Esquema SIL SIMIT – DCS PCS7

En este capítulo se presenta la configuración de un esquema SIL (Software-in-the-Loop) que integra modelos de simulación de un estanque y un molino SAG con el sistema de control PCS7, utilizando el entorno de simulación SIMIT. Se detallan las conexiones entre los modelos y las señales de la planta, incluyendo las configuraciones necesarias para la interacción entre SIMIT y PCS7. Además, se describen las pruebas realizadas para validar el comportamiento del estanque bajo control PID y del molino SAG en diferentes condiciones de operación.

4.1. Interconexión de modelos SIMIT con variables DCS PCS7

4.1.1. Conexión estanque a las señales PCS7

Para la integración del modelo del estanque con PCS7, se configuran las señales de entrada y salida en SIMIT, permitiendo la simulación del comportamiento del sistema en el entorno digital. El siguiente esquema representa cómo se interconectan las señales entre SIMIT y PCS7 del estanque.

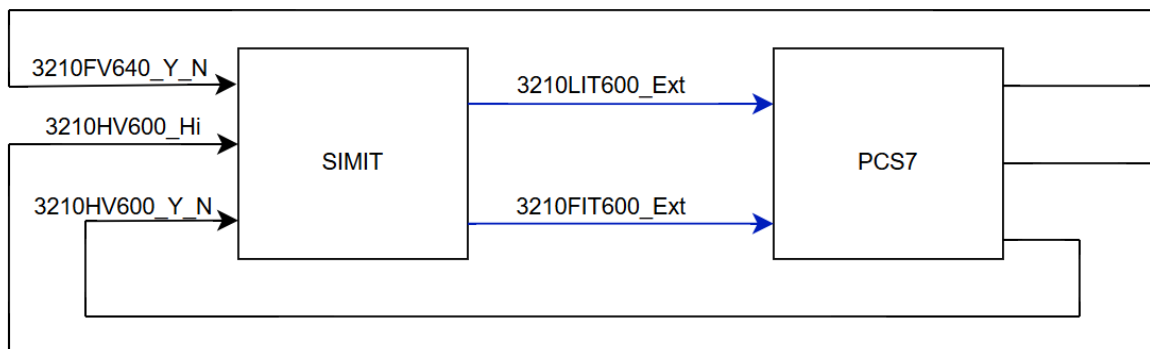


Figura 4.1: Esquema de la conexión estanque a PCS7.

Las señales utilizadas en el modelo del estanque se presentan en la tabla [4.1](#), donde se detallan las señales de la macro en SIMIT, su correspondencia con las señales de entrada y salida, y su

integración con PCS7.

Señal Macro	Señal Entrada SIMIT	Señal Salida SIMIT	Descripción
PosValv_IN	3210FV640_Y_N		Posición de la válvula de entrada (porcentaje de apertura)
EstadoValvula	3210HV600_Hi		Estado abierto (1) / cerrado (0) de la válvula de salida
PosValv_OUT	3210HV600_Y_N		Posición de la válvula de salida (porcentaje de apertura)
Vol_Perct		3210LIT600_Ext	Nivel de llenado del estanque expresado como porcentaje de volumen
Vol_OutPerct		3210FIT600_Ext	Flujo de salida del estanque expresado como porcentaje de volumen

Tabla 4.1: Señales utilizadas en el modelo del estanque.

De esta forma, las señales de entrada desde PCS7 hacia SIMIT necesarias para la simulación del estanque corresponden a la posición de la válvula de entrada, el estado abierto/cerrado de la válvula de salida y su posición. Luego, los datos calculados en SIMIT se envían de regreso a PCS7 mediante las señales de los transmisores de flujo y nivel.

El nivel de llenado del estanque se transmite utilizando la señal de volumen porcentual, que indica el porcentaje del volumen total ocupado. En este caso, no se emplea la señal `NivelAguaEst`, ya que el transmisor de flujo requiere información en formato porcentual. Esta información puede obtenerse tanto a partir del nivel porcentual como del volumen porcentual del estanque, ya que ambos valores entregan el mismo resultado en términos relativos. Finalmente, el flujo de salida porcentual se conecta a la señal correspondiente al transmisor de flujo de salida del estanque.

La figura [4.2](#) muestra la conexión de las señales del estanque a PCS7 mediante una macro en SIMIT.

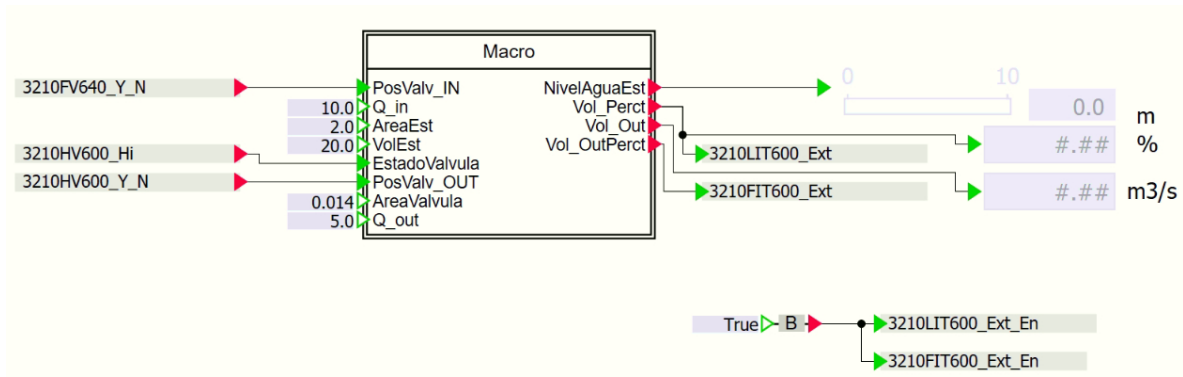


Figura 4.2: Conexión estanque a PCS7.

4.1.2. Conexión molino SAG a las señales PCS7

Debido a que se realizan dos soluciones para integrar el modelo del molino SAG con PCS7, se presenta el siguiente esquema general de la interconexión de las señales entre SIMIT y PCS7.

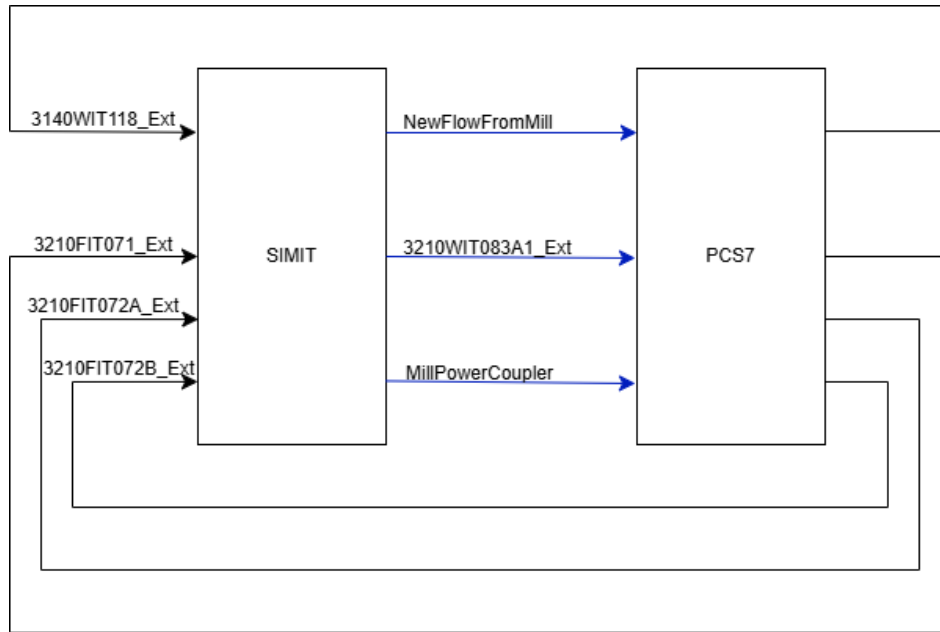


Figura 4.3: Esquema general de la conexión molino SAG a PCS7.

Las señales utilizadas en los modelos del molino SAG se resumen en la Tabla [4.2](#), donde se indica su correspondencia con las señales de entrada y salida en SIMIT, junto con una breve descripción de cada una.

Modelo SAG	Señal Entrada SIMIT	Señal Salida SIMIT	Descripción
F	3140WIT118_Ext		Alimentación de material seco en toneladas
F_A ₁	3210FIT071_Ext		Alimentación de agua de procesos en m ³ /h
F_A _{2A}	3210FIT072A_Ext		Flujo de lechada de cal A en m ³ /h
F_A _{2B}	3210FIT072B_Ext		Flujo de lechada de cal B en m ³ /h
DW		NewFlowFromMill	Descarga total del molino (mineral + agua)
Peso		3210WIT083A1_Ext	Peso interno estimado del molino
M_P		MillPowerCoupler	Potencia consumida por el motor del molino

Tabla 4.2: Señales utilizadas en la conexión del modelo SAG a PCS7

La señal de flujo de material F corresponde a 3140WIT118_Ext. Para las tres señales de líquidos, cada una se multiplica por su densidad nominal para sumarlas y poder representar la señal de salida **Peso** en toneladas. Aunque la lechada de cal y el diésel se añaden a la mezcla para ajustar el pH y mejorar la adherencia del cobre a las burbujas (collector) en la etapa de flotación, no tienen impacto en el proceso de molienda, por lo que no afectan la variable de interés: el peso del molino, y pueden considerarse simplemente como flujos de líquidos en t/h.

Así, la señal F_A se define como la suma de las tres señales de líquidos. El agua de proceso está representada por (3210FIT071_Ext) y la lechada de cal por (3210FIT072A_Ext o 3210FIT072B_Ext), ya que existen dos fuentes de lechada de cal, pero solo una está en funcionamiento a la vez debido al controlador que las gestiona. La tercera señal (diésel), en cambio, no cuenta con un transmisor de flujo en la simulación, por lo que se utiliza su valor nominal de $0,04 \text{ m}^3/\text{h}$ y se multiplica por su densidad de $0,85 \text{ t}/\text{m}^3$, lo que da como resultado una señal constante de $0,034 \text{ t}/\text{h}$.

A la salida del bloque SIMIT del esquema [4.3](#), se pueden observar tres señales. NewFlowFromMill representa la conexión a la descarga total del molino, que corresponde a la entrada del harnero o zaranda. Esta señal se dirige al chart Molienda11_BPS en la carpeta BPS, donde se utiliza como entrada del bloque que describe el comportamiento del harnero.

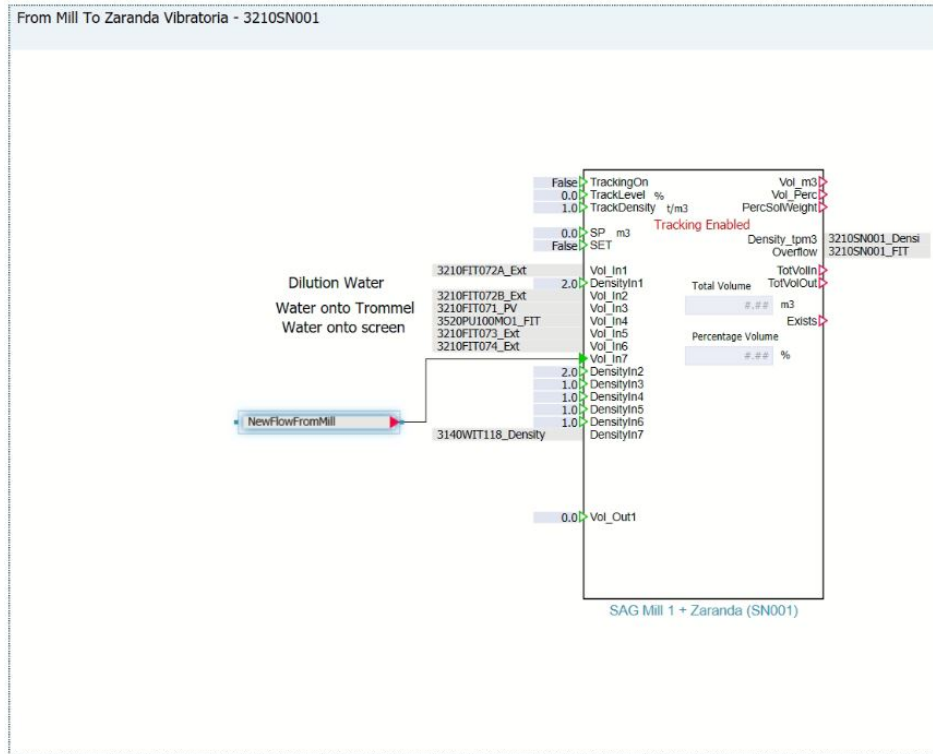


Figura 4.4: Harnero.

3210WIT083A1_Ext corresponde a la señal de peso del molino, y MillPowerCoupler se conecta a la señal de potencia consumida por este. Esta última se dirige al gráfico Values en la subcarpeta Mill_Drive de la sección BPS.

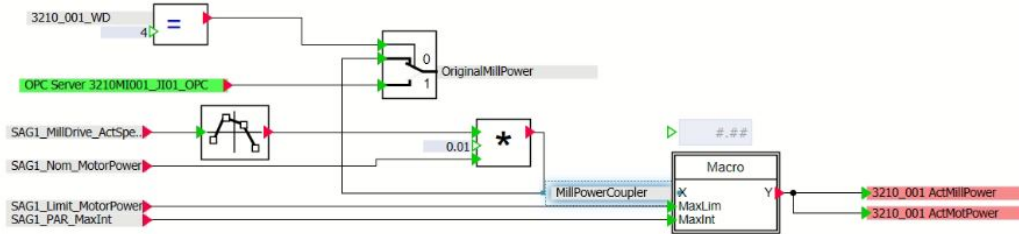


Figura 4.5: Señal molino.

Ambas soluciones cuentan con las mismas conexiones al PCS7, pero cambian sus esquemas en los charts de SIMIT.

4.1.2.1. Conexión del molino SAG con SHM a las señales PCS7

Al utilizar memoria compartida se deben conectar las señales de PCS7 a las señales de SHM. Es por ello que en la figura 4.6 se observa que la señal de flujo de material F 3140WIT118_Ext se conecta a Shared Memory SHM_INI1_F y la suma de las señales de los tres líquidos se conectan a Shared Memory SHM_INI2_FA que representa el flujo de entrada F_A .

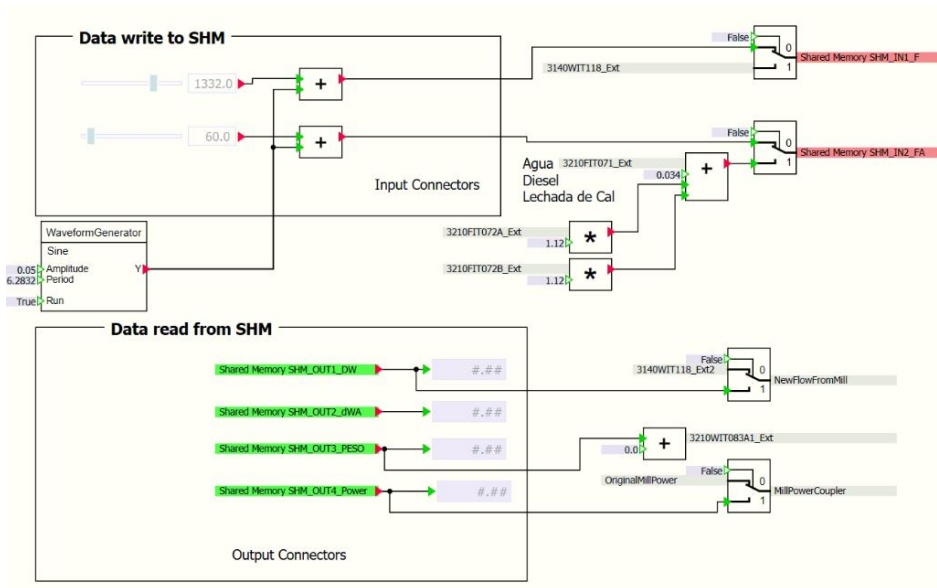


Figura 4.6: Conexión del molino SAG a la planta mediante SHM.

Las señales se conectan desde el SHM a las señales de planta PCS7. La señal de flujo de descarga total del molino Shared Memory SHM_OUT1_DW se conecta a NewFlowFromMill. La señal de peso de molino Shared Memory SHM_OUT3_Peso se conecta a 3210WIT083A1_Ext y la señal de potencia consumida Shared Memory SHM_OUT4_Power se conecta a MillPowerCoupler.

Es importante destacar que estas señales se conectan a switches condicionales, permitiendo realizar pruebas tanto con los valores reales de la planta como con valores específicos. En el caso de las salidas, los switches están vinculados a las señales originales utilizadas previamente por la planta: 3140WIT118_Ext2 para la descarga de flujo y OriginalMillPower para la potencia del molino.

4.1.2.2. Conexión del componente diseñado en SIMIT CTE a las señales PCS7

Para este caso, las señales de planta PCS7 se conectan directamente al componente del molino SAG.

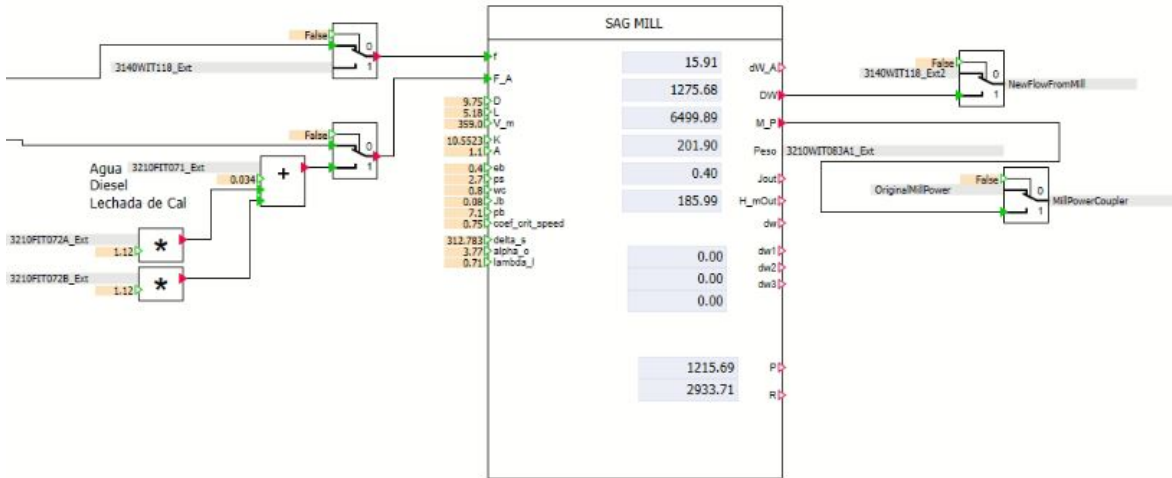


Figura 4.7: Conexión del molino SAG a la planta.

Como se muestra en la Figura 4.7, las entradas y salidas también están conectadas a switches condicionales. Esto permite realizar pruebas tanto con valores fijos como con los valores reales de la planta.

4.1.3. Control PID en PCS7 del nivel del estanque simulado en SIMIT

Se emplea el controlador de nivel 3210LIC600 en PCS7, configurando el setpoint en un 50%. El lazo de control incluye una válvula de entrada regulable y una válvula de salida. El control PID ajusta la posición de la válvula de entrada para mantener el nivel de llenado del estanque en el porcentaje deseado, para eso usa la señal Vol_Perct.

En este sistema de estanque, el control PID permite estabilizar el nivel dellenado del estanque mediante la regulación dinámica de la válvula de entrada.

El controlador en WinCC es:

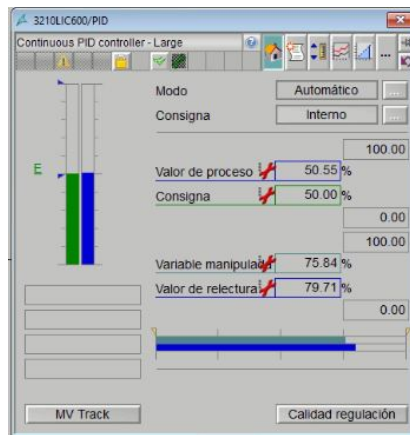


Figura 4.8: Controlador PID 3210LIC600 en WinCC.

En este controlador, el **setpoint** deseado se configura en la sección **Consigna**. La sección **Valor de proceso** muestra la variable controlada (PV), correspondiente al porcentaje de llenado del estanque transmitido por la señal 3210LIT600_Ext mientras que en la sección **Variable manipulada** se despliega el valor de la variable manipulada (MV), correspondiente a la apertura de la válvula de entrada transmitido por la señal 3210FV640_Y_N.

Al incorporar este controlador en PCS7, es necesario configurar el bloque CFC. Este bloque cuenta con una preconfiguración establecida de sus entradas y salidas, por lo que únicamente se verifica que la configuración sea correcta para su aplicación en el sistema. En caso de ser necesario, pueden realizarse ajustes adicionales dentro del CFC para garantizar su correcto funcionamiento en el lazo de control. En este caso solo se cambia el setpoint.

A continuación se presenta la figura 4.9 del bloque CFC del controlador con las ganancias $Kc = 6$, $Ti = 2200$ y $Td = 0$ encerradas en una caja roja, ya que el factor derivativo es igual a cero el controlador corresponde a uno de tipo PI. Vale destacar que estos valores.

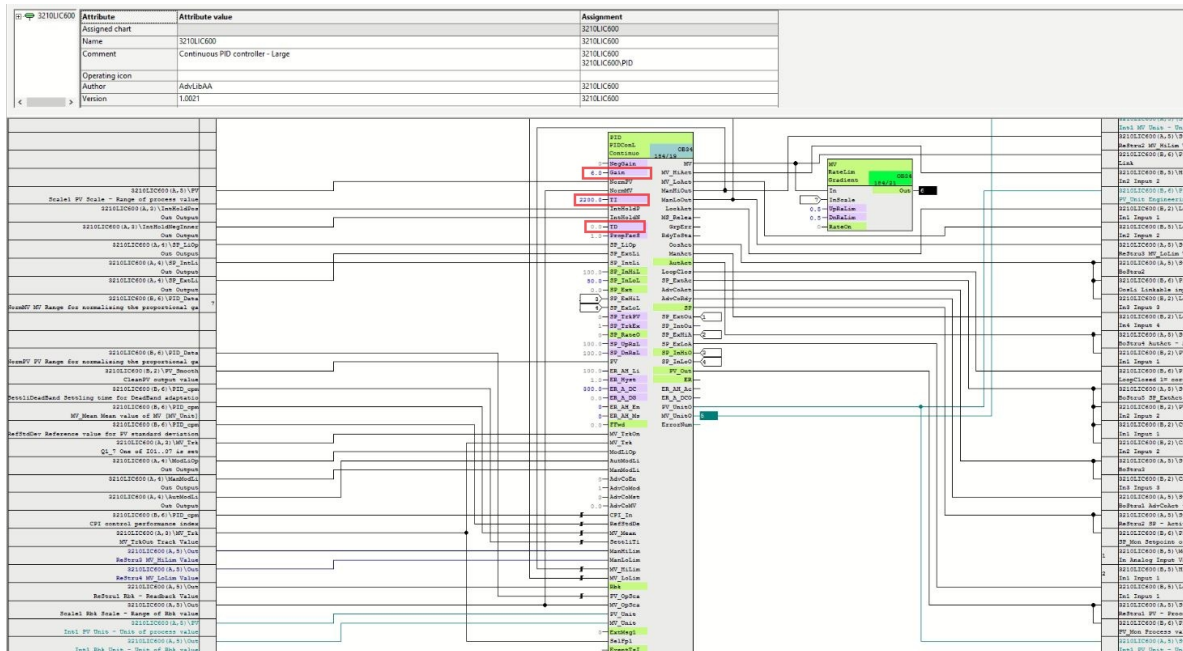


Figura 4.9: Bloque CFC del controlador del estanque.

4.2. Interconexión de la planta concentradora actualizada con variables DCS PCS7

La implementación del modelo dinámico del molino SAG representa una mejora significativa en la interconexión de la planta concentradora con el sistema DCS en PCS7. Anteriormente, la planta operaba con una aproximación simplificada, donde el peso del molino y su descarga eran estimados mediante señales ponderadas en función de la velocidad del molino SAG. Con la incorporación del modelo dinámico reducido a tres granulometrías, ahora se generan señales simuladas que reflejan de manera más precisa el comportamiento real del sistema, permitiendo una interacción más representativa con la planta.

En la Sección [4.1.2](#) se detalla la actualización de las conexiones tras la implementación del modelo dinámico y en la figura [4.3](#) se puede evidenciar como las señales se interconectan entre programas.

4.2.1. Aplicación de la filosofía de control

La integración del molino SAG con la planta concentradora permite evaluar la filosofía de control establecida para un equipo de mayor tamaño que el diseñado originalmente. Esto facilita el análisis del comportamiento de los lazos de control al incorporar señales simuladas más representativas del proceso real, considerando un molino de menor tamaño y capacidad de procesamiento de mineral.

Se evalúa el desempeño de los controladores en la regulación de variables críticas, como el nivel del molino, la tasa de alimentación y la velocidad de descarga.

4.3. Pruebas realizadas

Se realizan pruebas de los modelos de manera aislada primero, para luego evaluar su comportamiento integrado con las señales de planta. En el caso del estanque, se evalúa si el controlador es capaz de seguir una referencia. Para los modelos del molino SAG, se analiza la dinámica del sistema en su punto de operación, se determinan los límites superior e inferior del tonelaje de alimentación de mineral, y finalmente se aplican cambios de referencias para evaluar la respuesta del modelo.

4.3.1. Pruebas realizadas en el estanque

Para validar el funcionamiento del modelo del estanque, se realiza una prueba en SIMIT utilizando sliders y displays para monitorear su comportamiento.

Luego, se realiza una prueba sencilla para verificar el correcto funcionamiento de los controladores. Para ello se conectan las señales PCS7 al bloque que define el comportamiento del estanque en SIMIT y se arranca la simulación. En WinCC se genera una gráfica con la señal de nivel del estanque y la simulación comienza desde cero para llenar el estanque y verificar si logra establecer el nivel en el 50% como se había fijado.

Los datos son extraídos de WinCC en un archivo .csv que se grafica en MATLAB, logrando la siguiente figura.

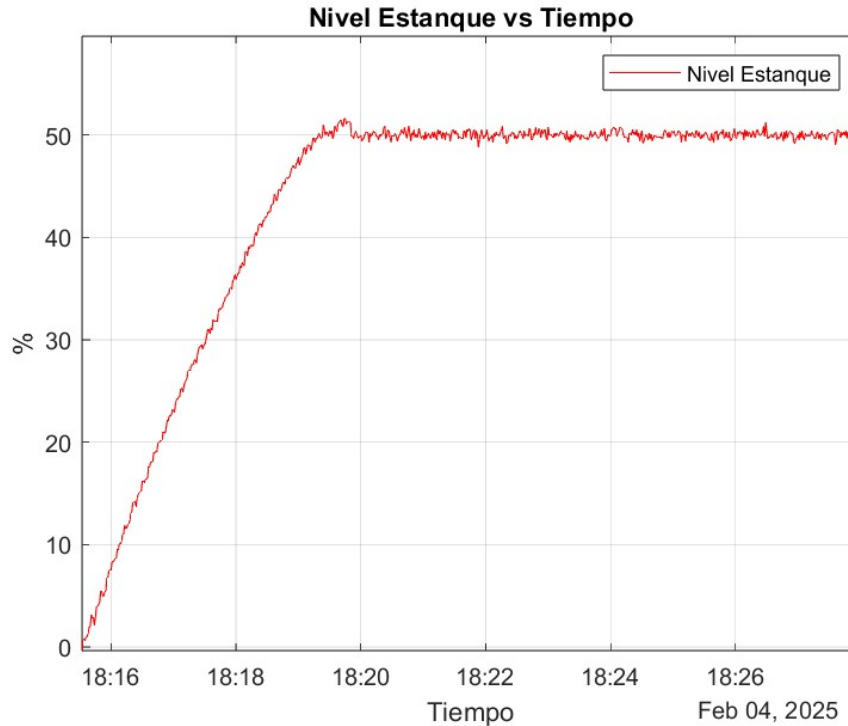


Figura 4.10: Prueba nivel de estanque.

En la cual se observa la dinámica de llenado del estanque hasta alcanzar el 50 %, demostrando el correcto funcionamiento del control.

4.3.2. Pruebas del modelo del molino aislado en Simulink en lazo abierto

Como se realiza en la sección 2.3, se prueba el punto de operación de $F = 1332 t/h$ y $F_A = 230 m^3/h$ y se llega a los resultados esperados según los valores de referencia calculados en la sección 2.2 usando un solver Runge Kutta con paso de integración de 0.1 s.

Luego, se hicieron pruebas con el ingreso máximo y mínimo de tonelaje de mineral que puede procesar el molino sin que se indefina el sistema.

Las señales se grafican por 3600 segundos para obtener los resultados de una hora de funcionamiento del molino.

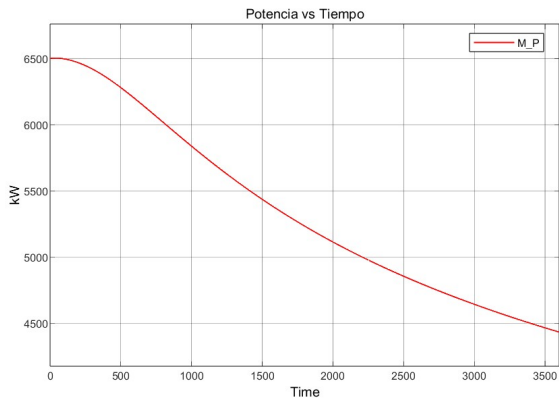


Figura 4.11: Comportamiento de la variable M_P con $F = 1750 t/h$.

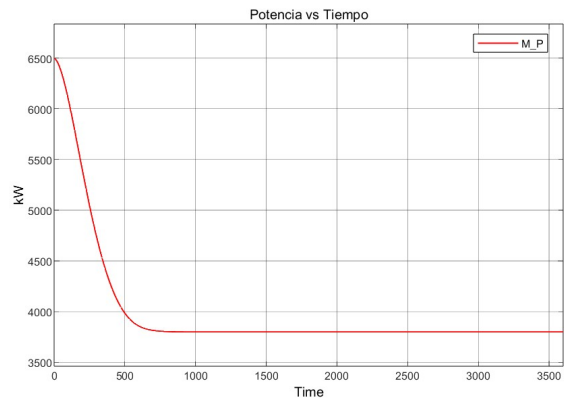


Figura 4.12: Comportamiento de la variable M_P con $F = 250 t/h$.

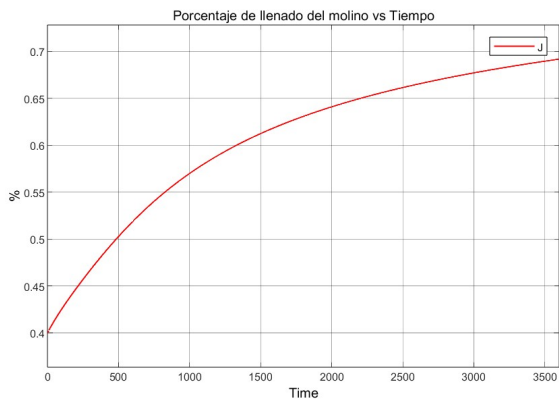


Figura 4.13: Comportamiento de la variable J con $F = 1750 t/h$.

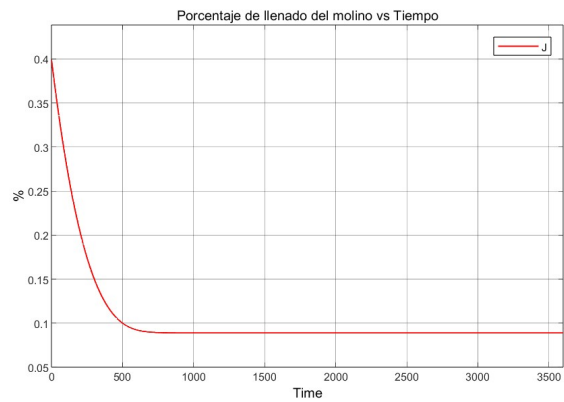


Figura 4.14: Comportamiento de la variable J con $F = 250 t/h$.

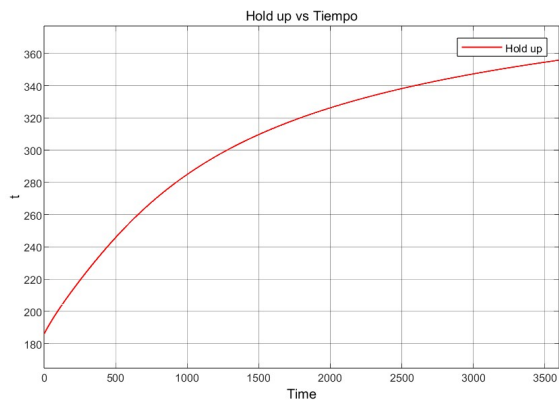


Figura 4.15: Comportamiento de la variable H_m con $F = 1750 t/h$.

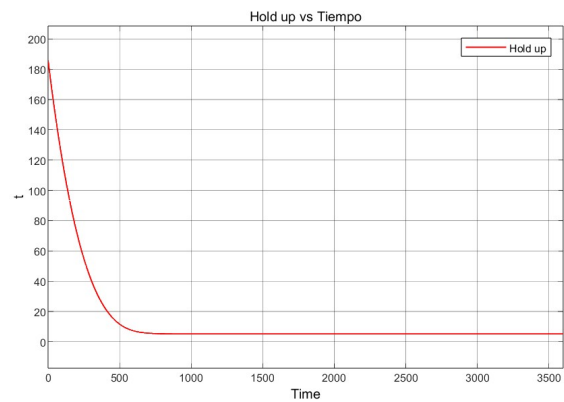


Figura 4.16: Comportamiento de la variable H_m con $F = 250 t/h$.

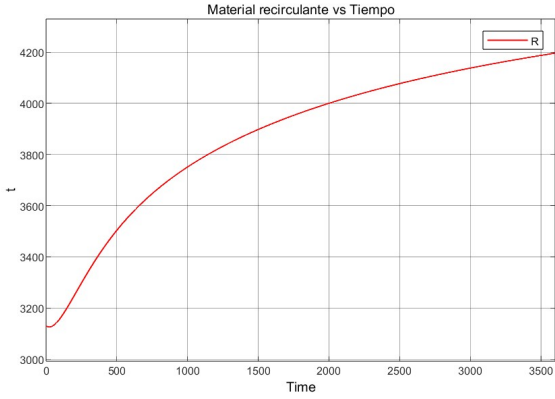


Figura 4.17: Comportamiento de la variable R con $F = 1750 t/h$.

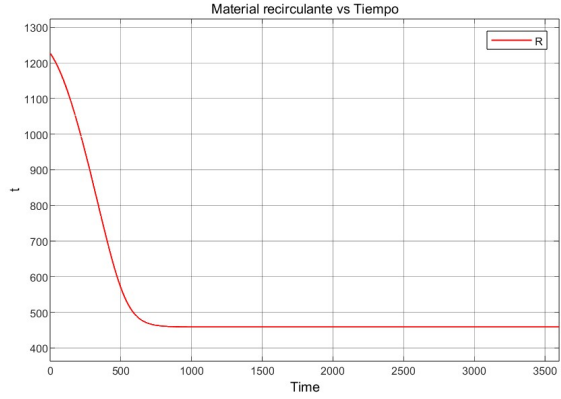


Figura 4.18: Comportamiento de la variable R con $F = 250 t/h$.

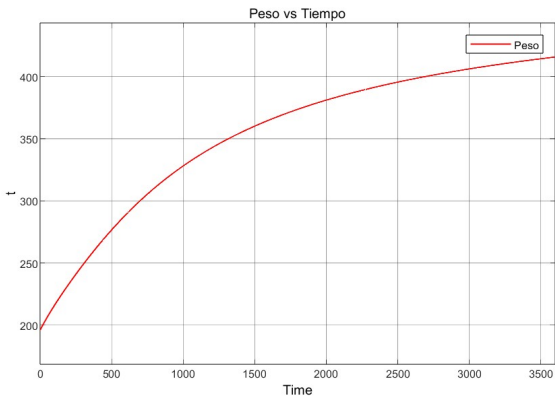


Figura 4.19: Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 1750 t/h$.

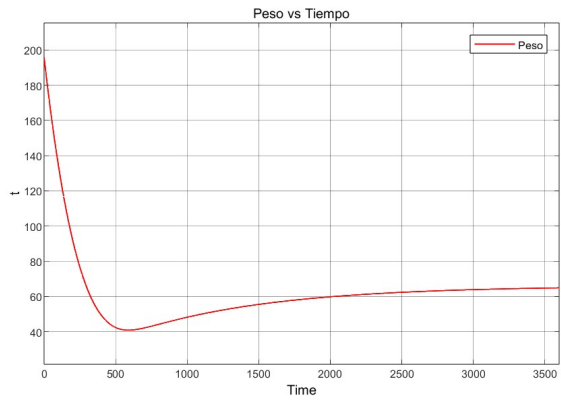


Figura 4.20: Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 250 t/h$.

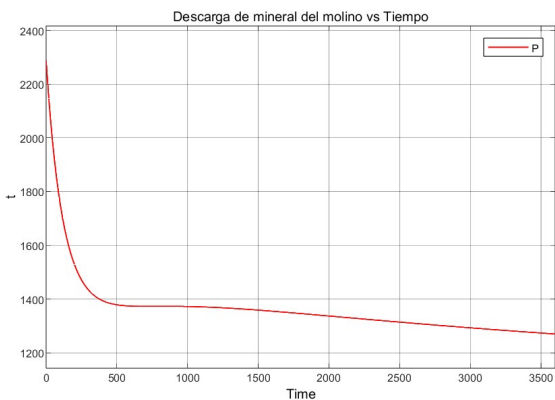


Figura 4.21: Comportamiento de la variable P con $F = 1750 t/h$.

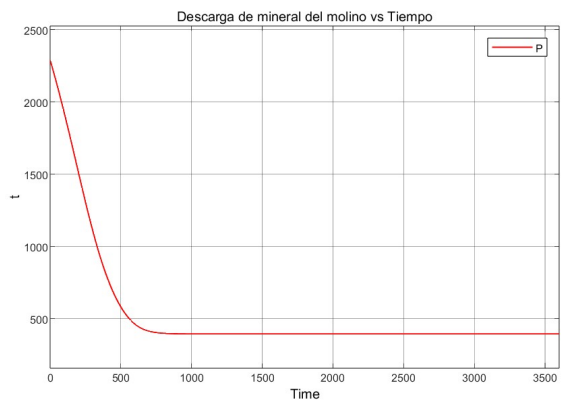


Figura 4.22: Comportamiento de la variable P con $F = 250 t/h$.

Finalmente, se realizan pruebas para evaluar la respuesta del sistema ante un aumento y disminución en el tonelaje de material de entrada, modificando el punto de operación. Para

ello se simula el punto de operación por una hora, permitiendo que el sistema se estabilice, y luego se realizan dos pruebas. En la primera se aumenta la carga a 1600 t/h y en la segunda se disminuye la carga a 1000 t/h respecto al valor inicial $F = 1332$ t/h.

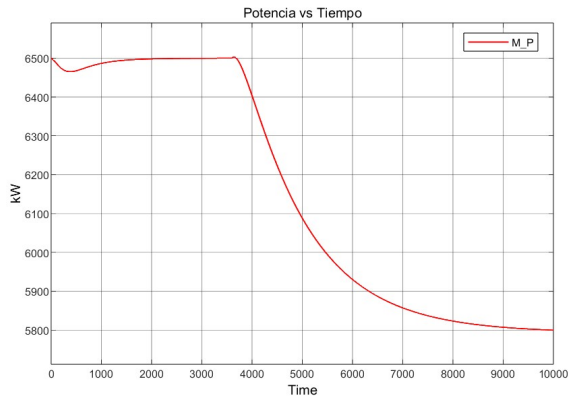


Figura 4.23: Comportamiento de la variable M_P a un aumento de $F = 1600$.

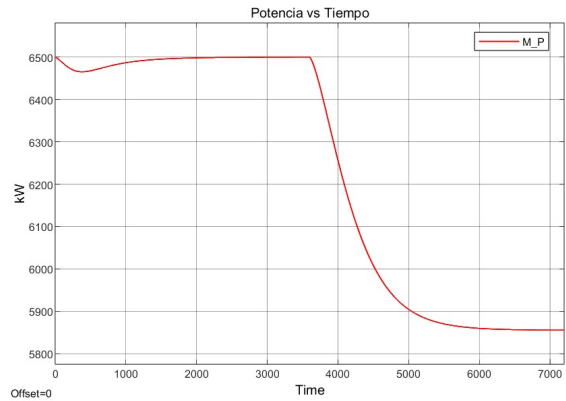


Figura 4.24: Comportamiento de la variable M_P a una disminución de $F = 1000$.

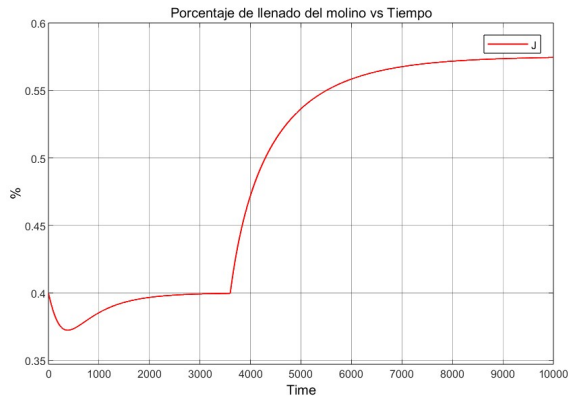


Figura 4.25: Comportamiento de la variable J a un aumento de $F=1600$.

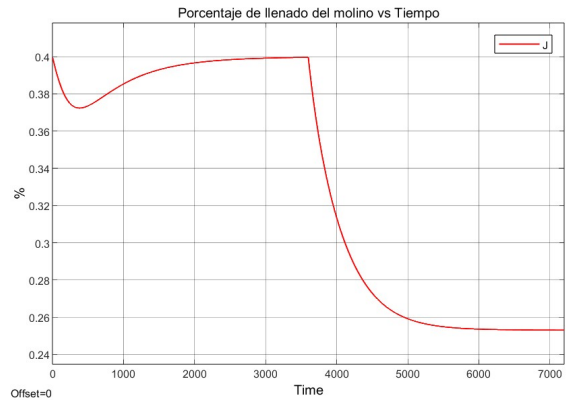


Figura 4.26: Comportamiento de la variable J a una disminución de $F = 1000$.

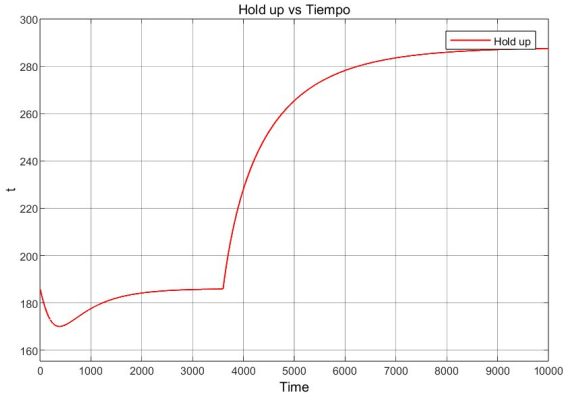


Figura 4.27: Comportamiento de la variable H_m a un aumento de $F = 1600$.

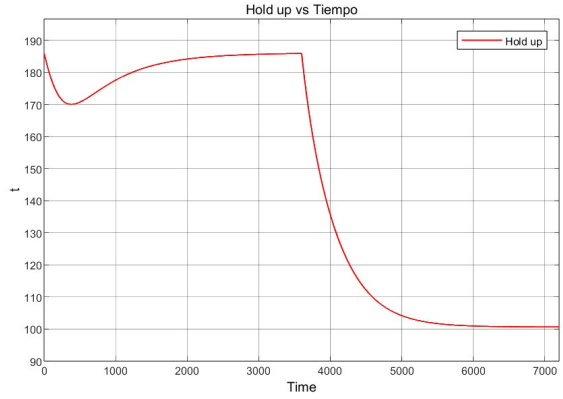


Figura 4.28: Comportamiento de la variable H_m a una disminución de $F = 1000$.

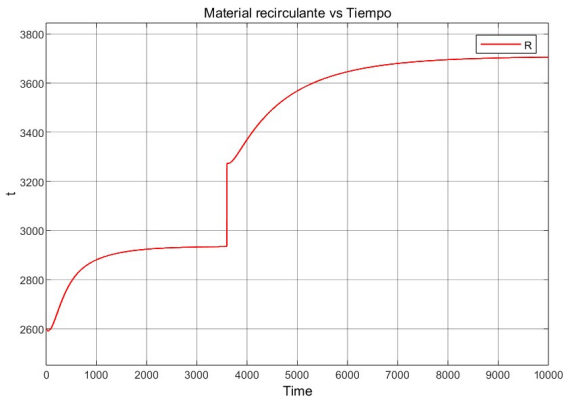


Figura 4.29: Comportamiento de la variable R a un aumento de $F = 1600$.

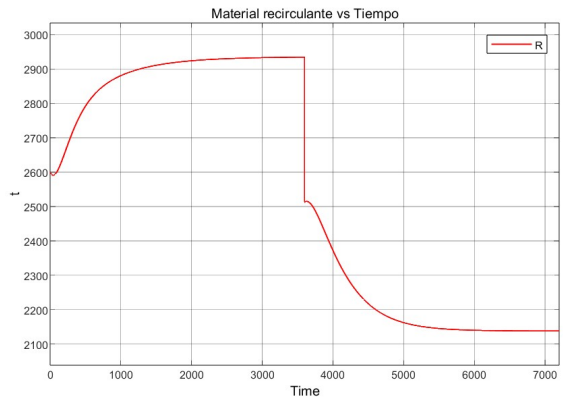


Figura 4.30: Comportamiento de la variable R a una disminución de $F = 1000$.

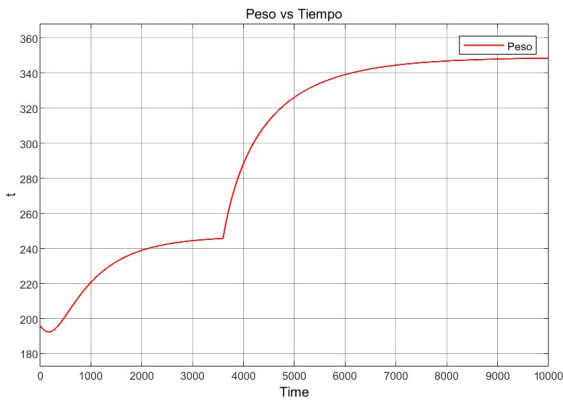


Figura 4.31: Comportamiento de la variable $Peso$ a un aumento de $F = 1600$.

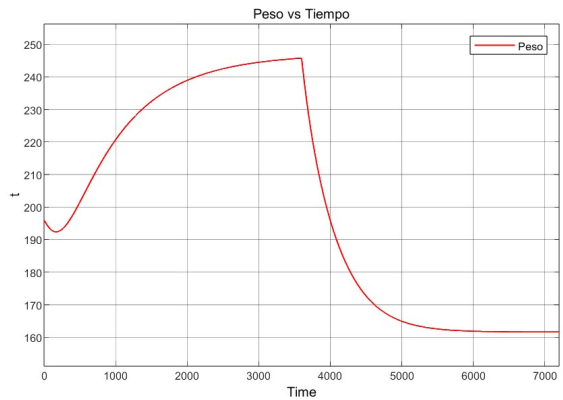


Figura 4.32: Comportamiento de la variable $Peso$ a una disminución de $F = 1000$.

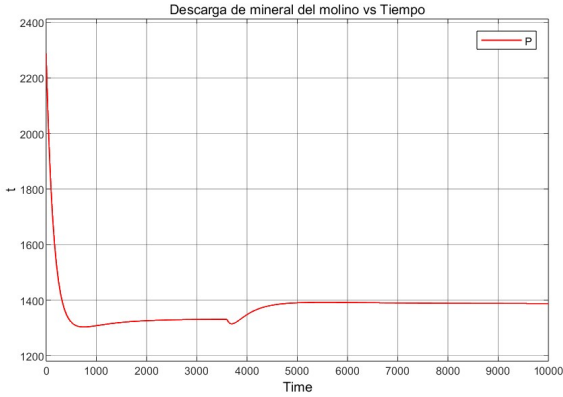


Figura 4.33: Comportamiento de la variable P a un aumento de $F = 1600$.

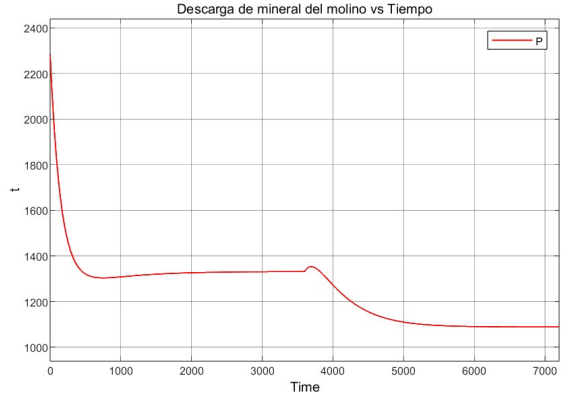


Figura 4.34: Comportamiento de la variable P a una disminución de $F = 1000$.

Como se observa en las figuras presentadas, el molino SAG responde ante variaciones en la carga de alimentación, ajustando su comportamiento hasta alcanzar un nuevo estado de equilibrio. El nivel de llenado se mantiene dentro del rango operativo permitido, con un valor máximo de 0,7 y un mínimo de 0,08. Además, los resultados reflejan la efectividad del modelo en la simulación del proceso de molienda, permitiendo evaluar su desempeño ante cambios en las condiciones de operación.

4.3.2.1. Pruebas realizadas al modelo reducido del molino SAG

Primero se realiza la prueba del punto de operación de $F = 1332 t/h$ y $F_A = 230 m^3/h$, con el solver Runge Kutta y un paso 0.1 s, para comparar la respuesta del modelo reducido con el de 12 elementos.

Las señales se grafican por 3600 segundos para obtener los resultados de una hora de funcionamiento del molino.

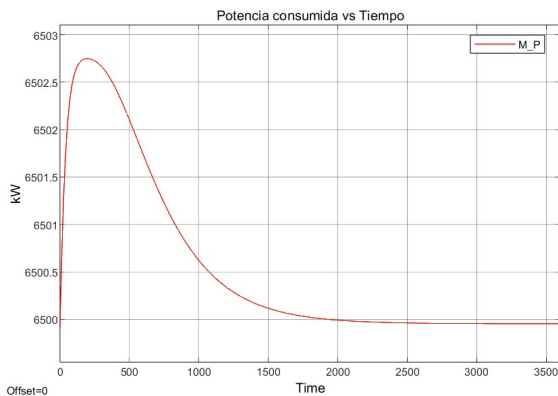


Figura 4.35: Comportamiento de la variable M_P del modelo 3×3 .

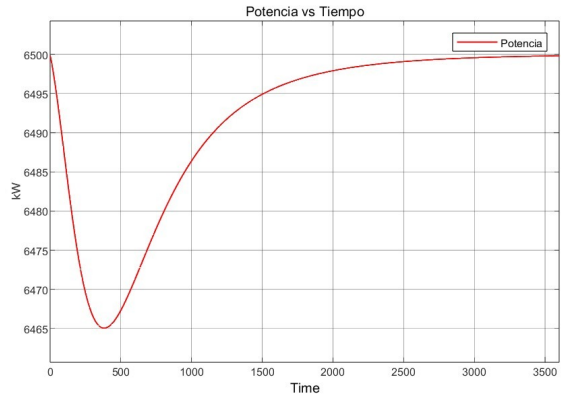


Figura 4.36: Comportamiento de la variable M_P del modelo 12×12 .

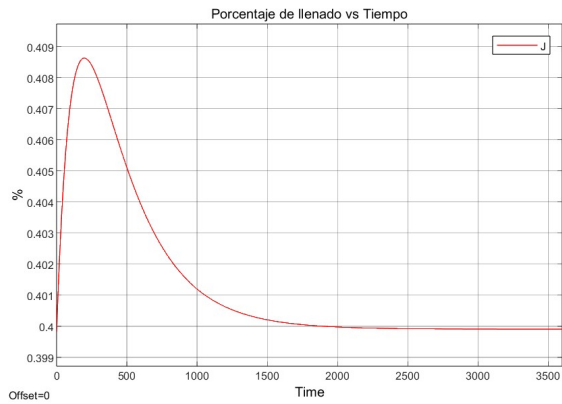


Figura 4.37: Comportamiento de la variable J del modelo 3×3 .

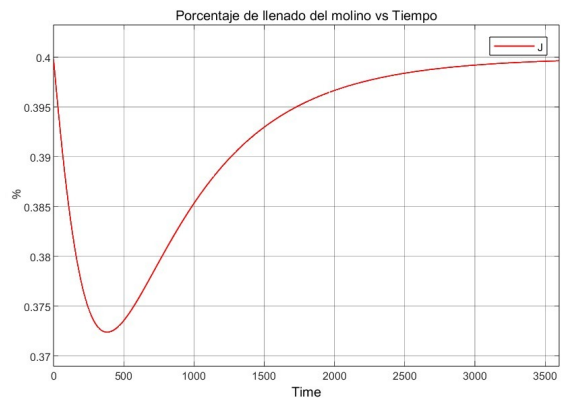


Figura 4.38: Comportamiento de la variable J del modelo 12×12 .

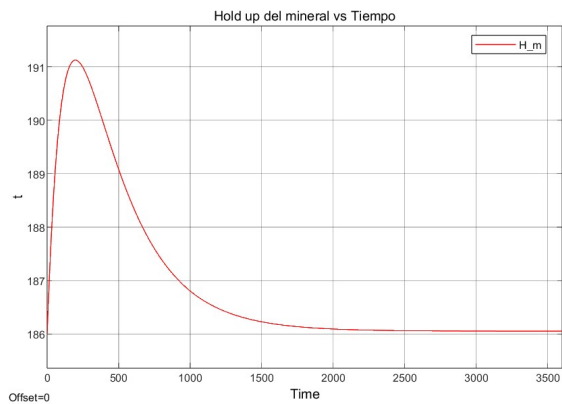


Figura 4.39: Comportamiento de la variable H_m del modelo 3×3 .

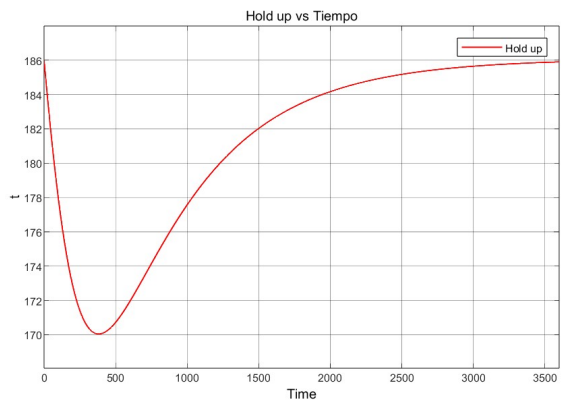


Figura 4.40: Comportamiento de la variable H_m del modelo 12×12 .

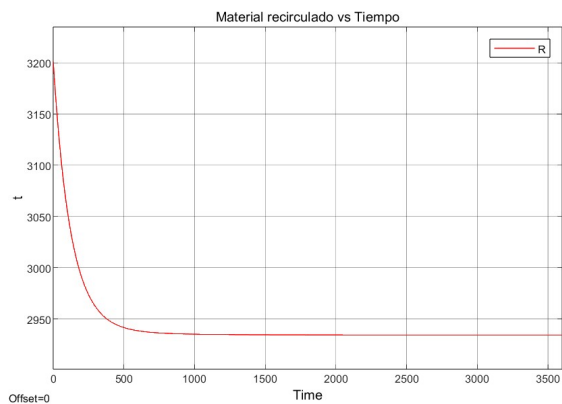


Figura 4.41: Comportamiento de la variable R del modelo 3×3 .

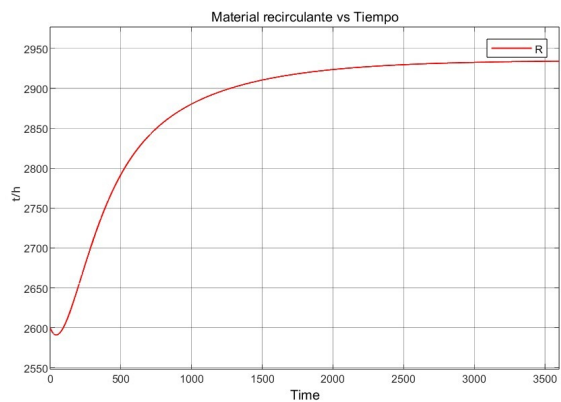


Figura 4.42: Comportamiento de la variable R con del modelo 12×12 .

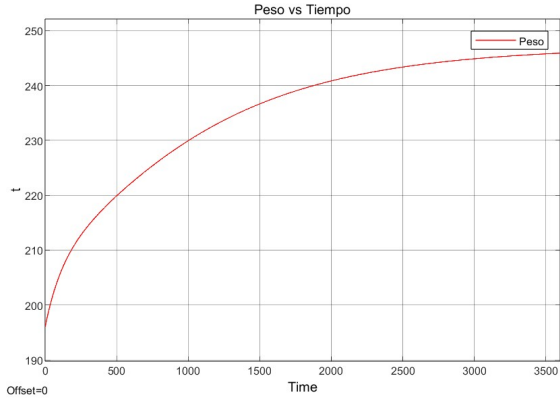


Figura 4.43: Comportamiento de la variable *Peso* del modelo 3×3 .

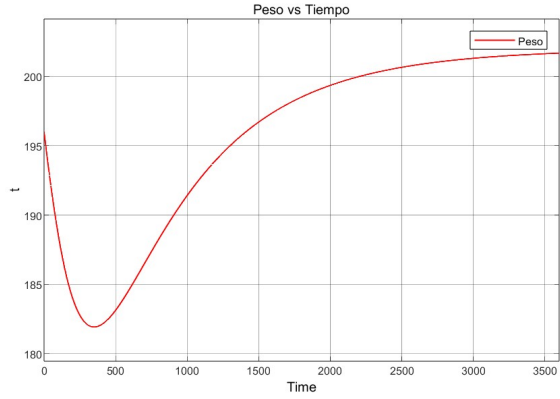


Figura 4.44: Comportamiento de la variable *Peso* del modelo 12×12 .

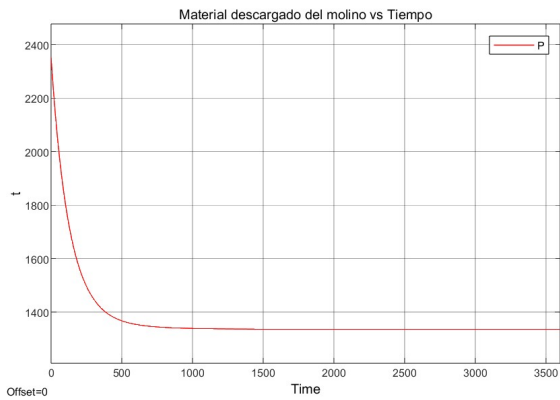


Figura 4.45: Comportamiento de la variable *P* del modelo 3×3 .

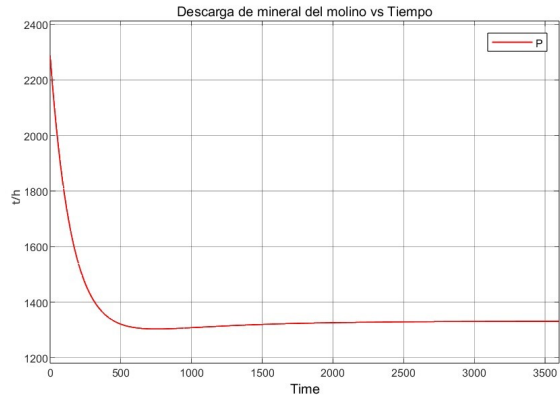


Figura 4.46: Comportamiento de la variable *P* del modelo 12×12 .

En esta prueba se evidencia la diferencia en la respuesta dinámica del sistema reducido en comparación con el modelo original de 12 elementos. Esta variación es esperada, ya que la reducción del modelo implica una simplificación del proceso de molienda, lo que resulta en una respuesta más rápida. Sin embargo, es destacable que, a pesar de la simplificación, el sistema reducido logra estabilizarse en los puntos deseados de las señales, a pesar de tener un comportamiento transiente contrario en algunas señales.

Luego se realizan las pruebas para evaluar la reacción del molino al trabajar con las cargas máximas y mínimas de alimentación de mineral.

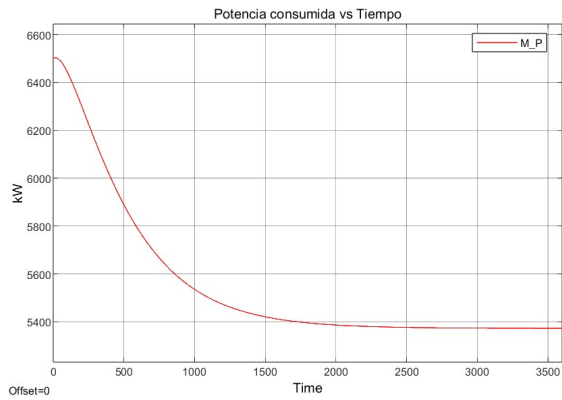


Figura 4.47: Comportamiento de la variable M_P con $F = 1750 t/h$.

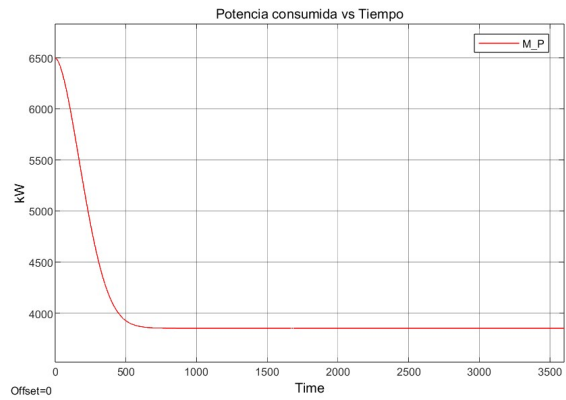


Figura 4.48: Comportamiento de la variable M_P con $F = 250 t/h$.

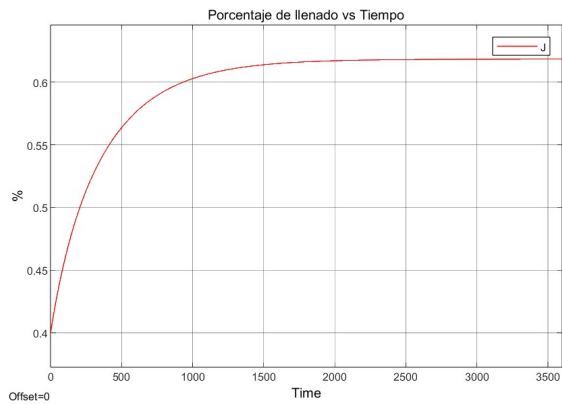


Figura 4.49: Comportamiento de la variable J con $F = 1750 t/h$.

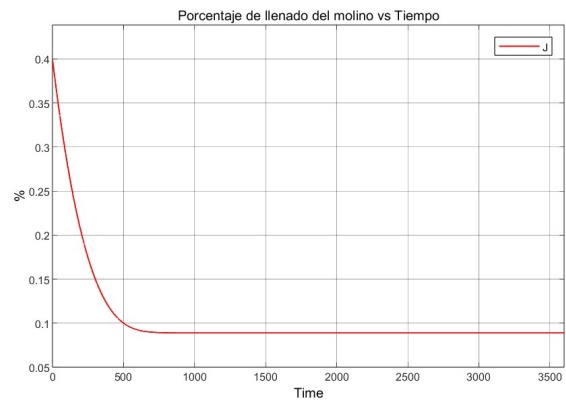


Figura 4.50: Comportamiento de la variable J con $F = 250 t/h$.

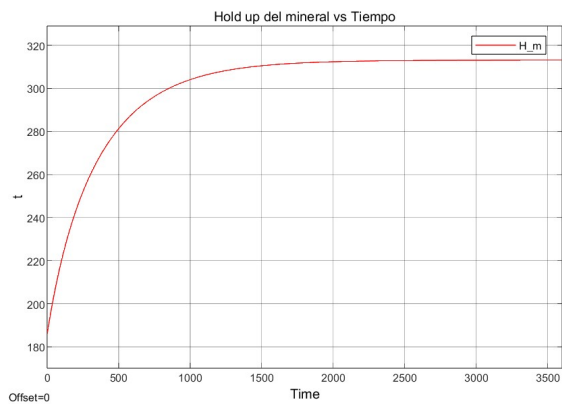


Figura 4.51: Comportamiento de la variable H_m con $F = 1750 t/h$.

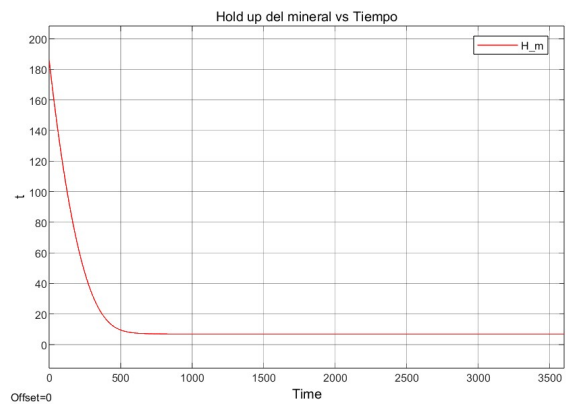


Figura 4.52: Comportamiento de la variable H_m con $F = 250 t/h$.

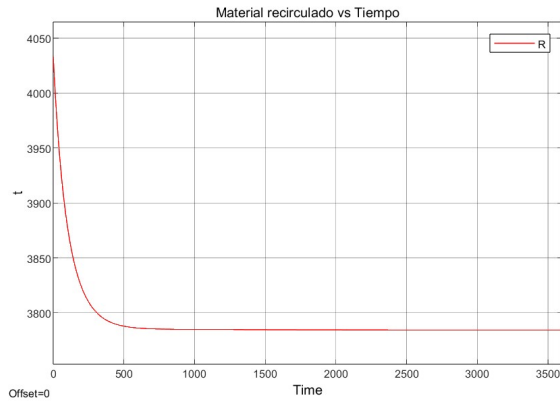


Figura 4.53: Comportamiento de la variable R con $F = 1750 \text{ t/h}$.

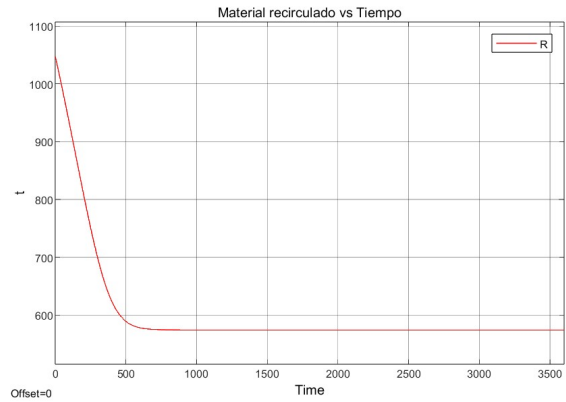


Figura 4.54: Comportamiento de la variable R con $F = 250 \text{ t/h}$.

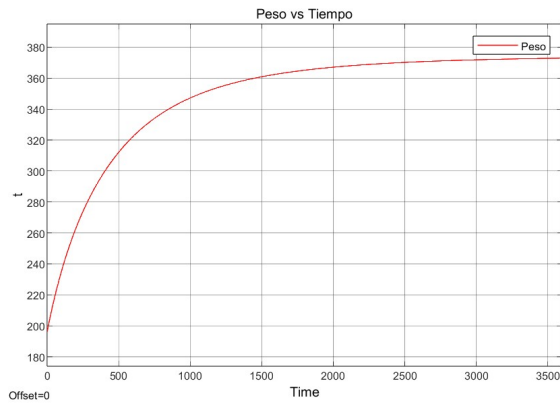


Figura 4.55: Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 1750 \text{ t/h}$.

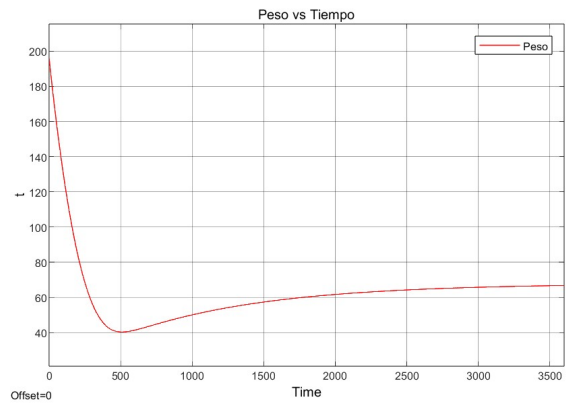


Figura 4.56: Comportamiento de la variable $Peso$ con $F = 250 \text{ t/h}$.

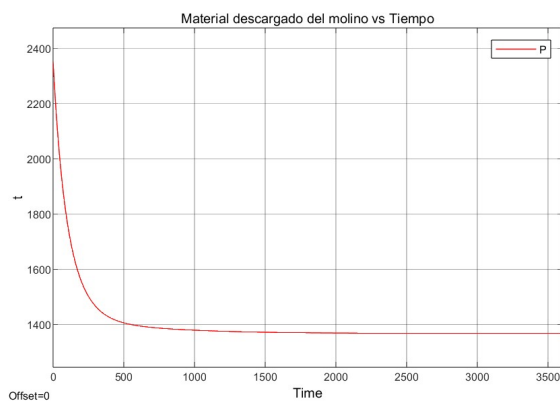


Figura 4.57: Comportamiento de la variable P con $F = 1750 \text{ t/h}$.

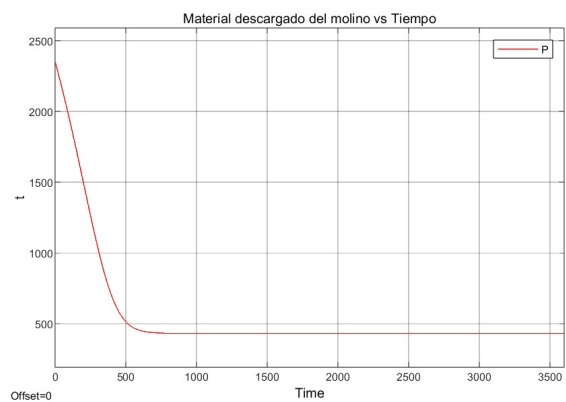


Figura 4.58: Comportamiento de la variable P con $F = 250 \text{ t/h}$.

Finalmente, se realizan pruebas para evaluar la respuesta del sistema ante un aumento y disminución en el tonelaje de material de entrada, modificando el punto de operación. Para

ello se simula el punto de operación por una hora, permitiendo que el sistema se estabilice, y luego se realizan dos pruebas. En la primera se aumenta la carga a 1600 t/h y en la segunda se disminuye la carga a 1000 t/h.

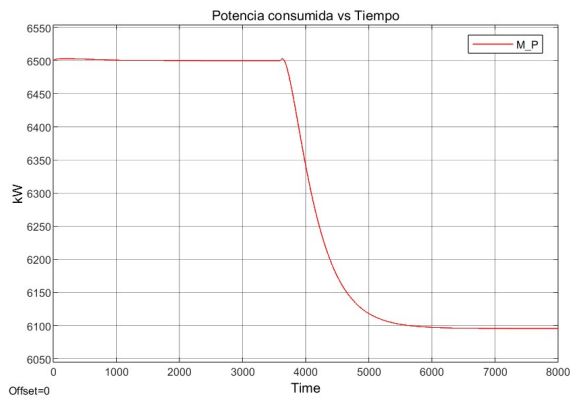


Figura 4.59: Comportamiento de la variable M_P a un aumento de F .

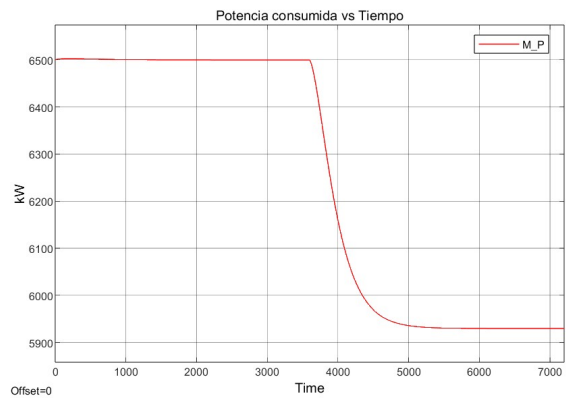


Figura 4.60: Comportamiento de la variable M_P a una disminución de F .

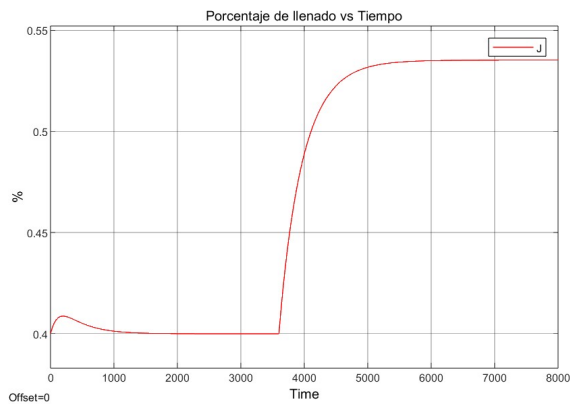


Figura 4.61: Comportamiento de la variable J a un aumento de F .

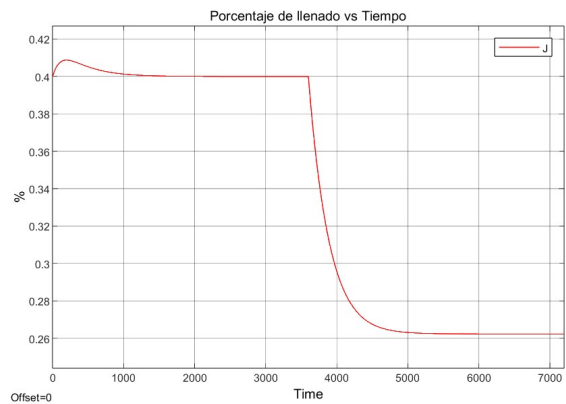


Figura 4.62: Comportamiento de la variable J a una disminución de F .

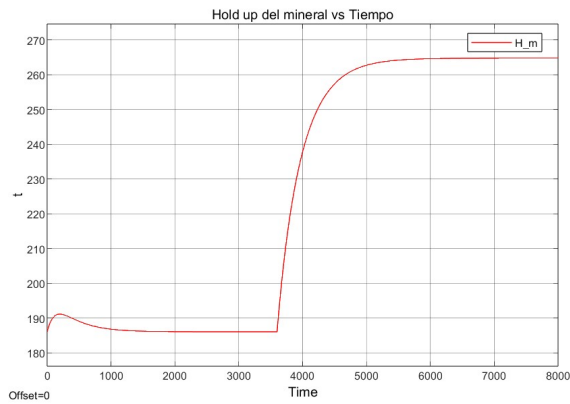


Figura 4.63: Comportamiento de la variable H_m a un aumento de F .

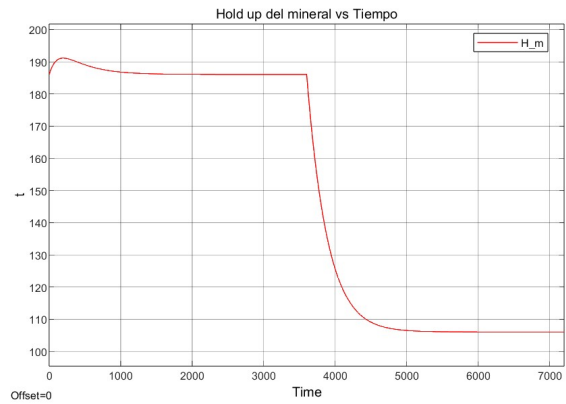


Figura 4.64: Comportamiento de la variable H_m a una disminución de F .

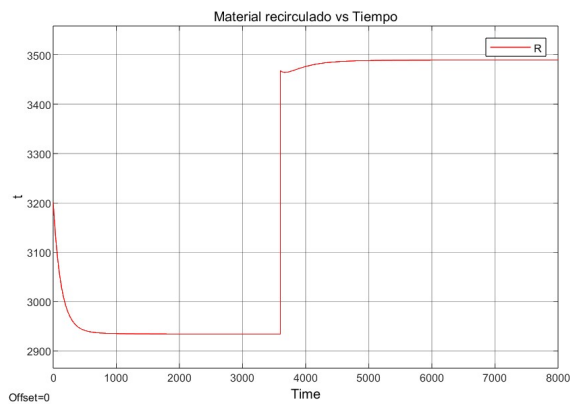


Figura 4.65: Comportamiento de la variable R a un aumento de F .

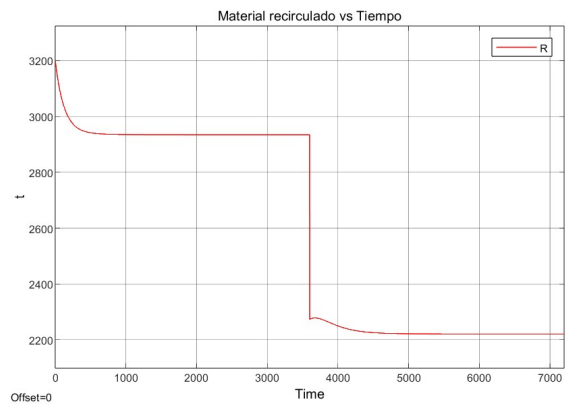


Figura 4.66: Comportamiento de la variable R a una disminución de F .

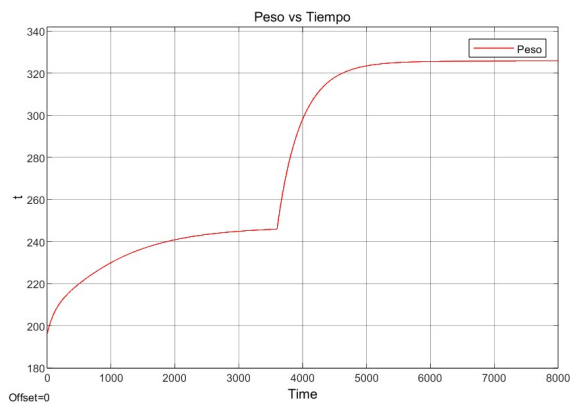


Figura 4.67: Comportamiento de la variable $Peso$ a un aumento de F .

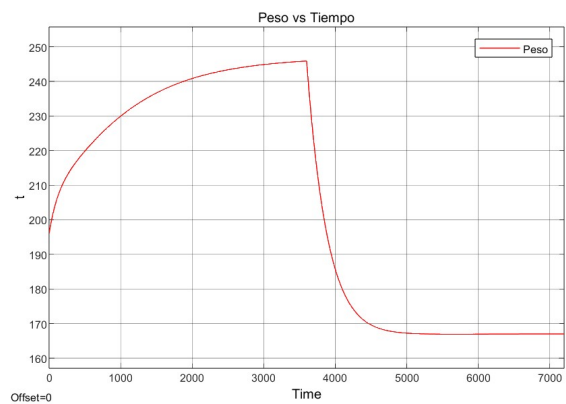


Figura 4.68: Comportamiento de la variable $Peso$ a una disminución de F .

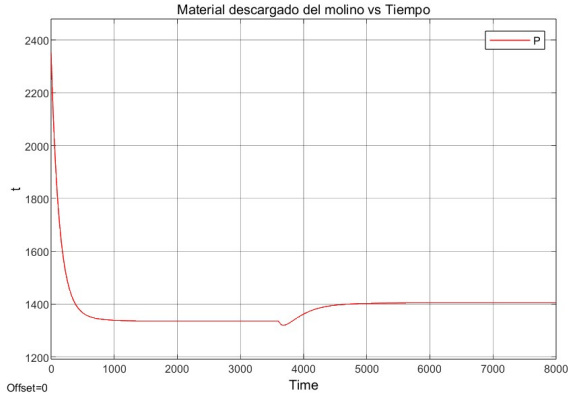


Figura 4.69: Comportamiento de la variable P a un aumento de F .

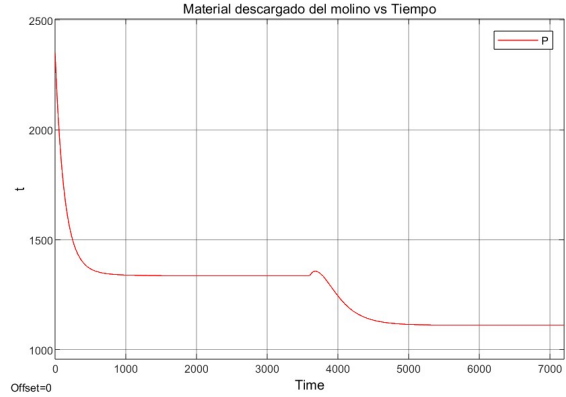


Figura 4.70: Comportamiento de la variable P a una disminución de F .

4.3.3. Pruebas del modelo del molino aislado conectado a SIMIT usando SHM

En esta sección se evalúa la eficacia de la aplicación SyncSiMa para sincronizar el modelo de Simulink con SIMIT. Inicialmente, se realizan pruebas usando el modelo de tamaño 12×12 con el solver Runge Kutta y un paso de simulación de 0.1 s. Sin embargo, el sistema presenta un alto retardo entre cada pausa del modelo en Simulink. Como solución, se incrementa el paso de simulación a 0.58 s, lo que permite simular el punto de operación con $F = 1332 t/h$ y $F_A = 230 t/h$, estableciendo estos valores en los sliders de SIMIT durante una hora.

Luego se prueba el modelo 3×3 con el solver Runge Kutta y un paso de simulación de 0.58 s, lo que permite aumentar el tiempo de simulación a una hora y veinticinco minutos aproximadamente. Las gráficas se simulan durante una hora, a la derecha se presentan los resultados del modelo 12×12 y la izquierda del modelo 3×3 .

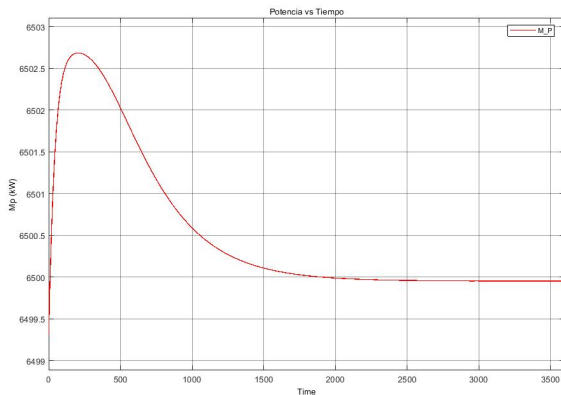


Figura 4.71: Comportamiento de la variable M_P del modelo 3×3 .

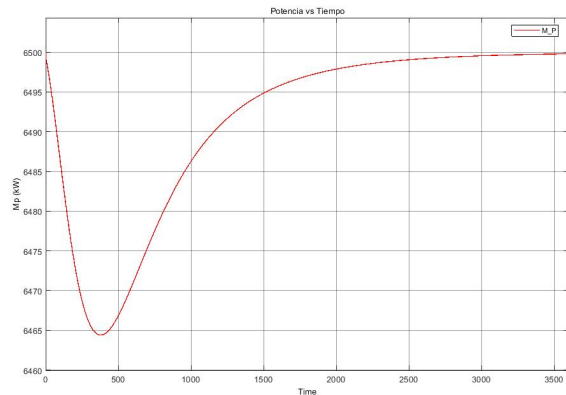


Figura 4.72: Comportamiento de la variable M_P del modelo 12×12 .

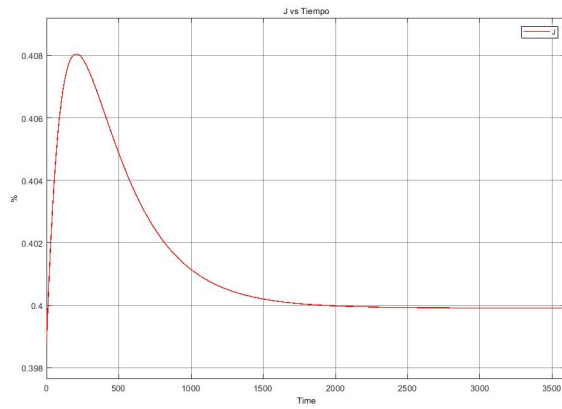


Figura 4.73: Comportamiento de la variable J del modelo 3×3 .

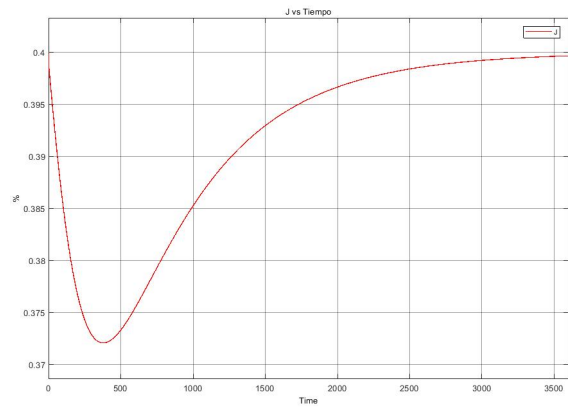


Figura 4.74: Comportamiento de la variable J del modelo 12×12 .

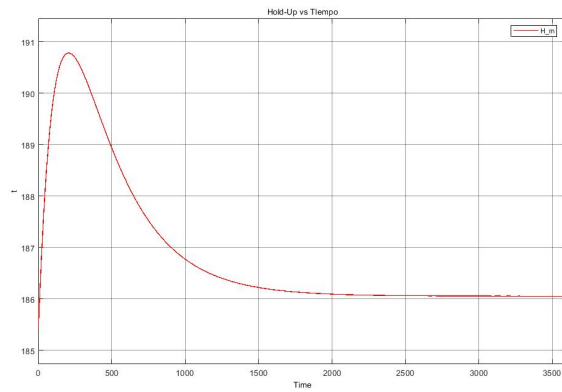


Figura 4.75: Comportamiento de la variable H_m del modelo 3×3 .

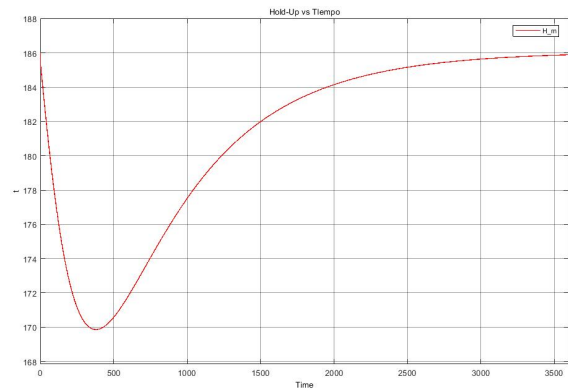


Figura 4.76: Comportamiento de la variable H_m del modelo 12×12 .

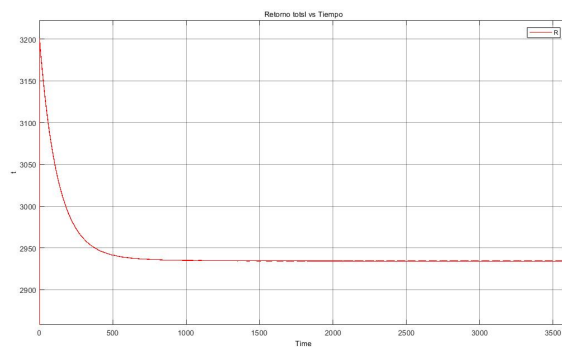


Figura 4.77: Comportamiento de la variable R del modelo 3×3 .

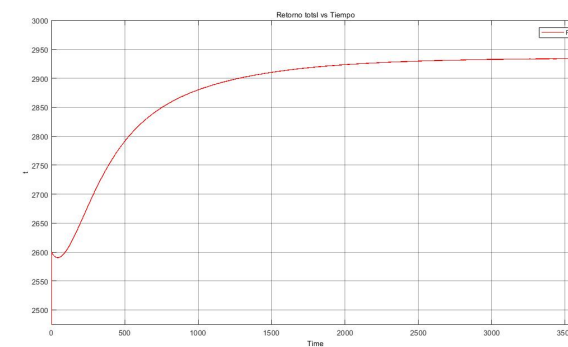


Figura 4.78: Comportamiento de la variable R con del modelo 12×12 .

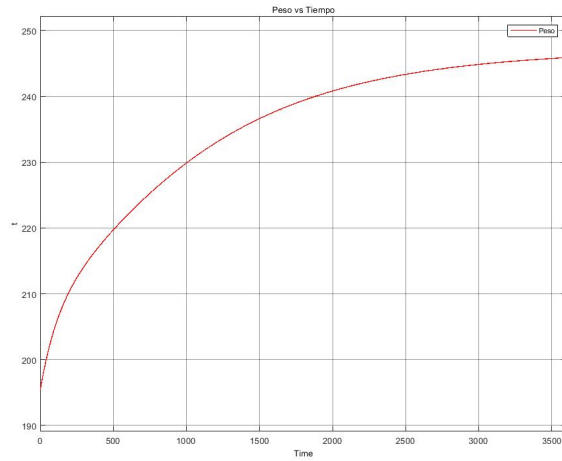


Figura 4.79: Comportamiento de la variable *Peso* del modelo 3×3 .

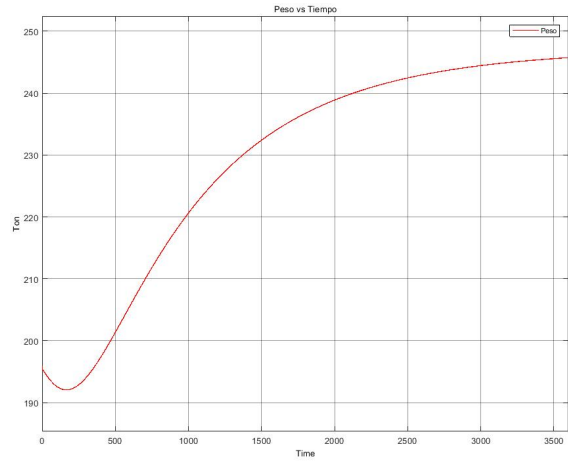


Figura 4.80: Comportamiento de la variable *Peso* del modelo 12×12 .

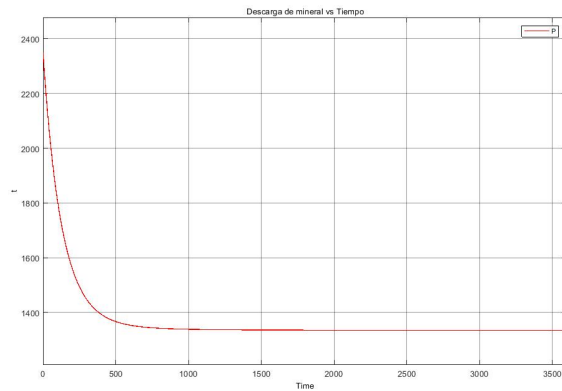


Figura 4.81: Comportamiento de la variable *P* del modelo 3×3 .

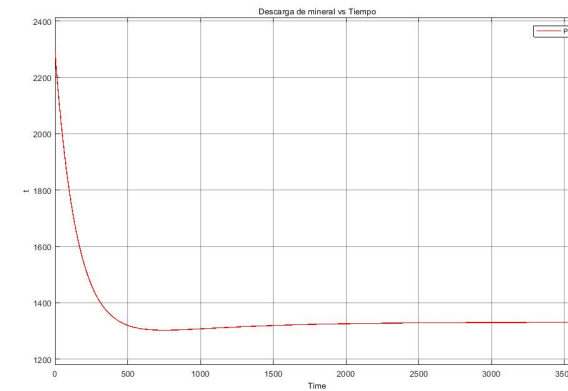


Figura 4.82: Comportamiento de la variable *P* del modelo 12×12 .

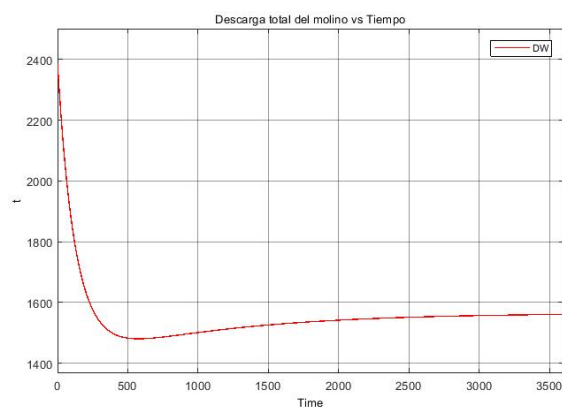


Figura 4.83: Comportamiento de la variable *DW* del modelo 3×3 .

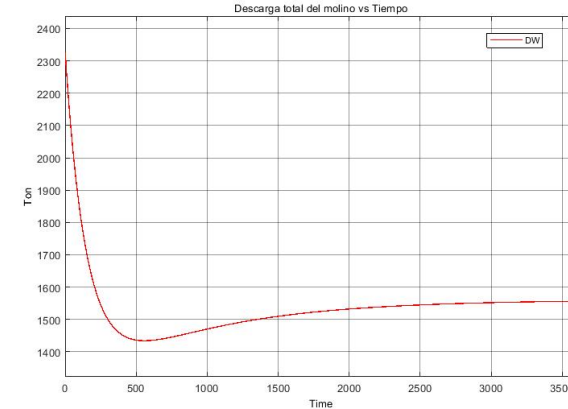


Figura 4.84: Comportamiento de la variable *DW* del modelo 12×12 .

Finalmente se prueba cambiando las cargas de entrada y salida luego de que el sistema se estabiliza en su punto de operación. Para ello se simula el punto de operación por una hora del modelo con dimensión 3×3 , permitiendo que el sistema se estabilice, y luego se realizan dos pruebas. En la primera se aumenta la carga a 1600 t/h y en la segunda se disminuye la carga a 1000 t/h .

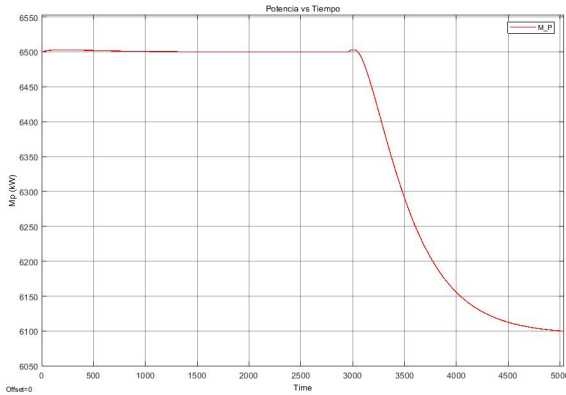


Figura 4.85: Comportamiento de la variable M_P a un aumento de F .

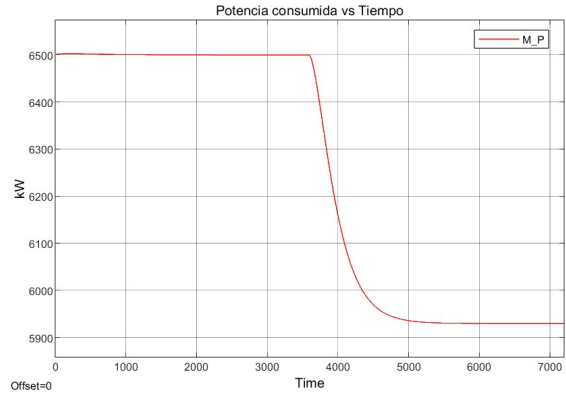


Figura 4.86: Comportamiento de la variable M_P a una disminución de F .

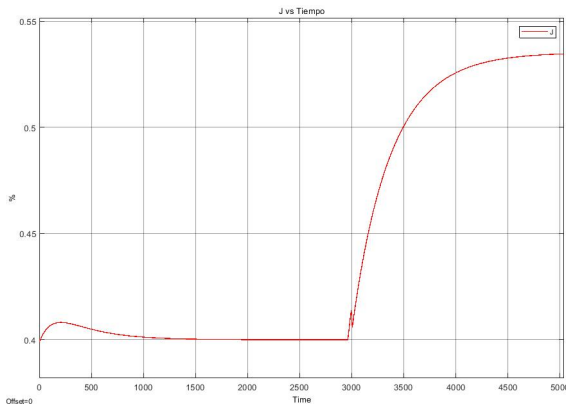


Figura 4.87: Comportamiento de la variable J a un aumento de F .

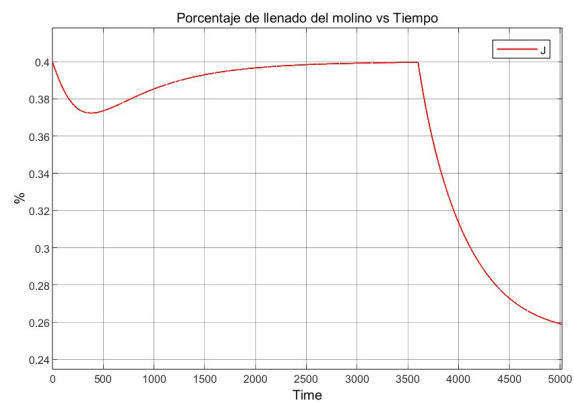


Figura 4.88: Comportamiento de la variable J a una disminución de F .

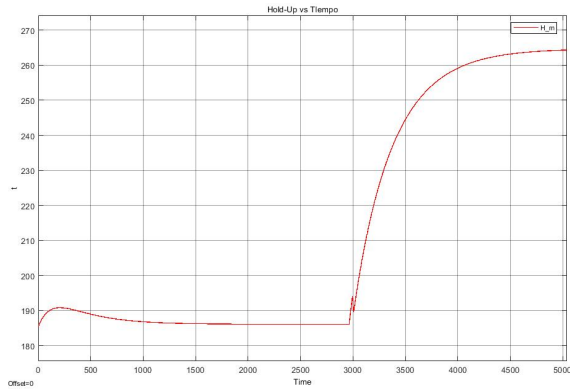


Figura 4.89: Comportamiento de la variable H_m a un aumento de F .

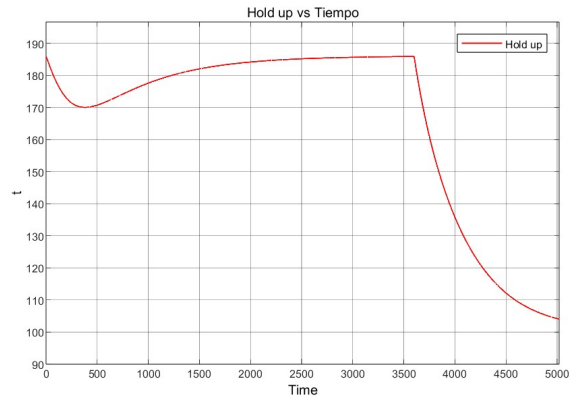


Figura 4.90: Comportamiento de la variable H_m a una disminución de F .

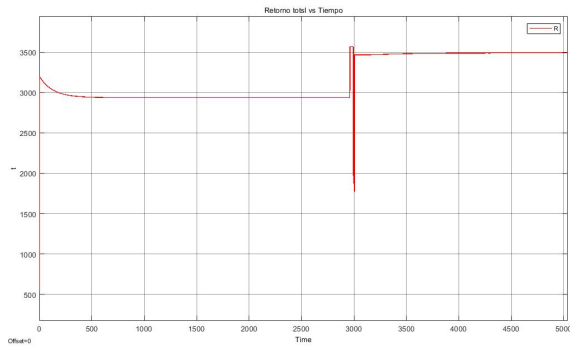


Figura 4.91: Comportamiento de la variable R a un aumento de F .

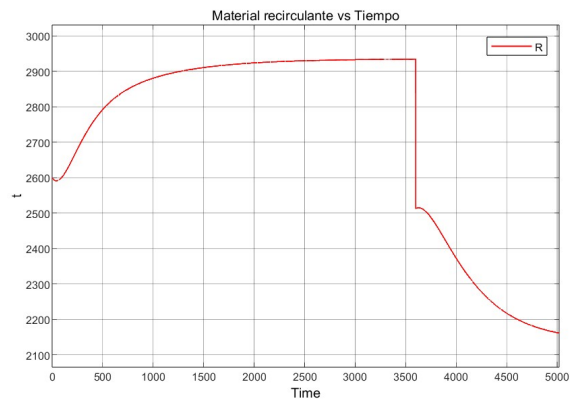


Figura 4.92: Comportamiento de la variable R a una disminución de F .

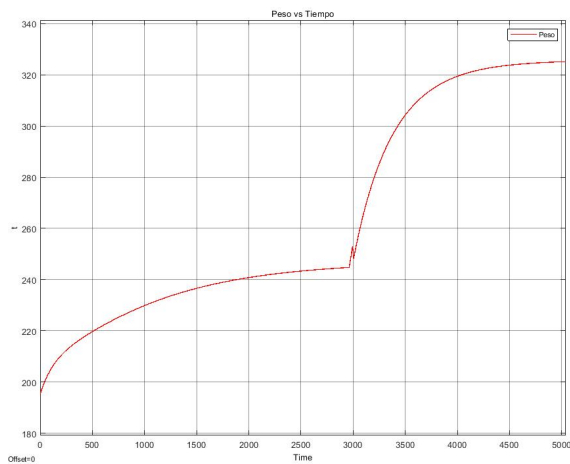


Figura 4.93: Comportamiento de la variable $Peso$ a un aumento de F .

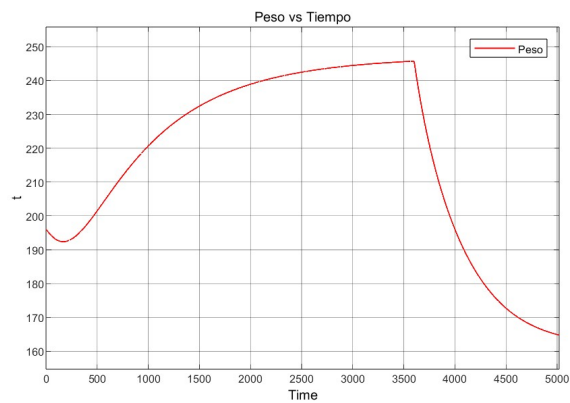


Figura 4.94: Comportamiento de la variable $Peso$ a una disminución de F .

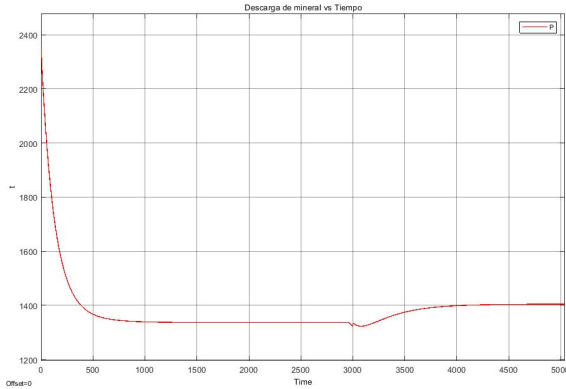


Figura 4.95: Comportamiento de la variable P a una aumento de F .

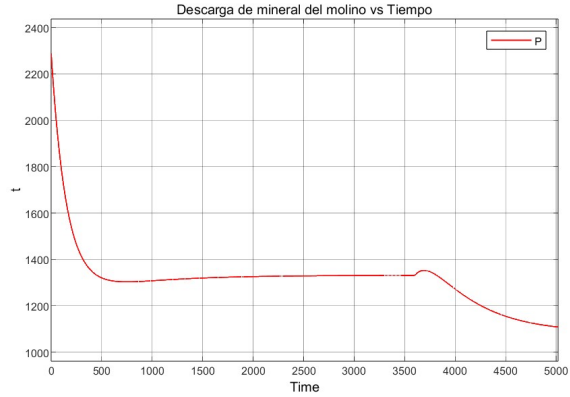


Figura 4.96: Comportamiento de la variable P a una disminución de F .

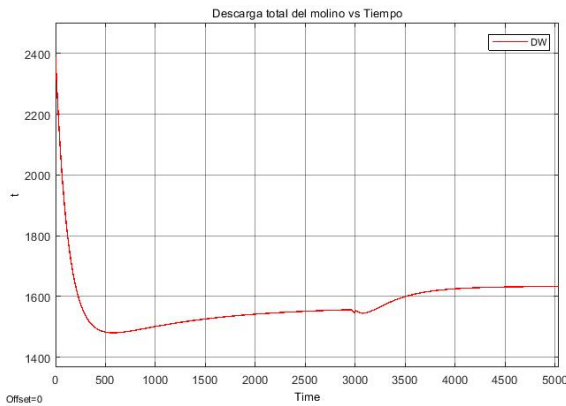


Figura 4.97: Comportamiento de la variable DW a una aumento de F .

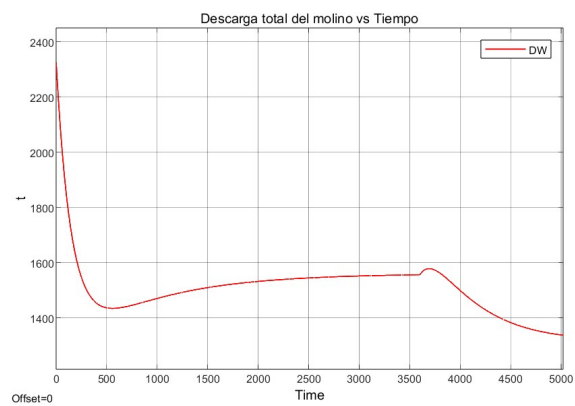


Figura 4.98: Comportamiento de la variable DW a una disminución de F .

Al realizar las mismas pruebas en el sistema aislado en Simulink y luego en el conectado a SIMIT, se puede observar el mismo comportamiento del modelo. La principal diferencia se presenta en la prueba de aumento de F en SIMIT, donde el slider no reacciona de manera instantánea, lo que provoca saltos en las gráficas.

4.3.4. Pruebas del molino conectado a las señales de la planta en lazo cerrado

Dado que la planta fue diseñada para un molino de mayores dimensiones y el molino simulado se basa en datos de una planta más pequeña, es necesario evaluar el comportamiento de los lazos de control en la alimentación de los feeders, el nivel del estanque de salida y la densidad de la pulpa bombeada hacia los hidrociclones con este molino de menor capacidad.

Para ello, primero se lleva la planta a un estado de equilibrio en el que se establezcan el nivel del estanque y la densidad de pulpa del flujo de salida. Esto requiere el arranque manual de todos los instrumentos necesarios, como bombas, transmisores y válvulas. En SIMIT, se debe asegurar que los transmisores del área de descarga 3210FIT073, 3210FIT074, 3210FIT640, 3210FIT604,

3210DIT605, 3210FIT624 y 3210DIT625 estén en Process Mode. Una vez alcanzado este estado, se guarda un snapshot de la planta.

Los puntos de operación a evaluar incluyen:

- El seguimiento de un setpoint dinámico por parte de los feeders.
- El mantenimiento del nivel del estanque dentro de un rango del 60 % al 90 %, con un setpoint ideal del 70 %.
- La densidad de pulpa en el rango de [56-60] %.

Para lograr estas condiciones, se habilitan las dos bombas de salida del estanque, las cuales inician en 100 % y 40 %, estabilizándose en aproximadamente 74 % cada una. Además, se establece un ingreso total de líquidos de 1100 t/h para alcanzar la densidad de pulpa de salida deseada, [56-60] %. Vale destacar que el control de las bombas es muy lento, razón por la cual es necesario hacer snapshot cuando se alcancen las condiciones de planta.

Una vez estabilizada la planta en estos puntos, se modifica el setpoint de los feeders a 1332 t/h para evaluar la respuesta del sistema y su impacto en el resto de la planta. Posteriormente, se realiza una prueba incrementando el setpoint de los feeders a 1750 t/h .

Estas pruebas se ejecutan en el modelo reducido a tres granulometrías con el objetivo de comparar los resultados obtenidos al utilizar la SHM y el componente del molino diseñado.

4.3.4.1. Molino SHM

El estado inicial de la planta considera:

- Setpoint Feeders: 1500 t.
- Flujo agua de procesos: 655 m^3/h .
- Flujo lechada de cal: 27 m^3/h .
- Nivel de estanque: 70 %.
- Densidad de pulpa: 60 %.
- Bomba salida 1: 77 %.
- Bomba salida 2: 73 %.

La primera prueba se realiza cargando el snapshot y simulando el comportamiento hasta alcanzar el setpoint del feeder de 1332 t/h .

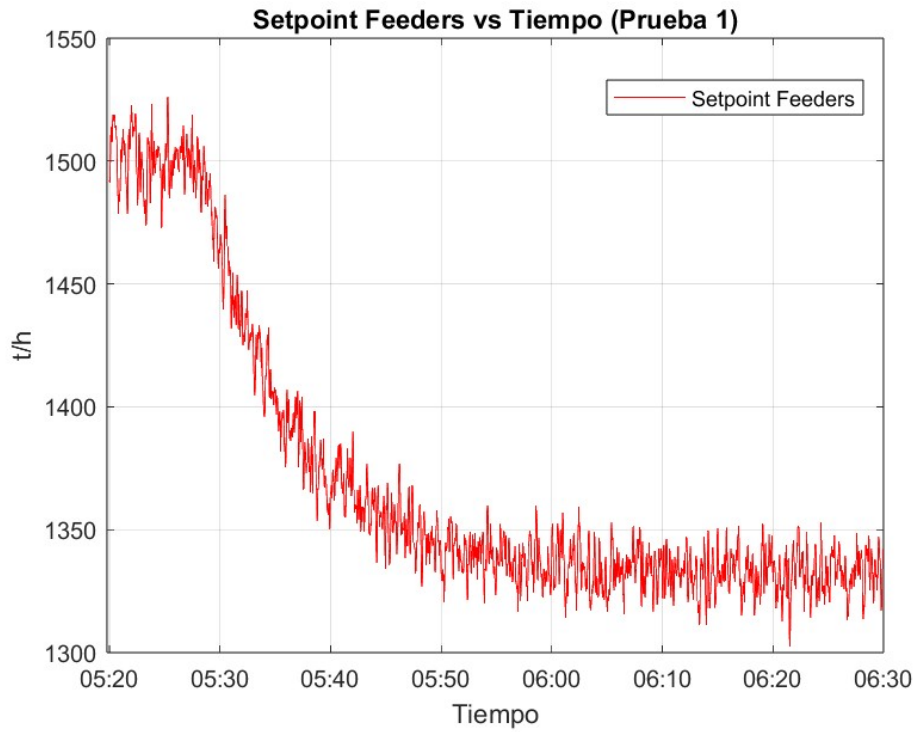


Figura 4.99: Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.

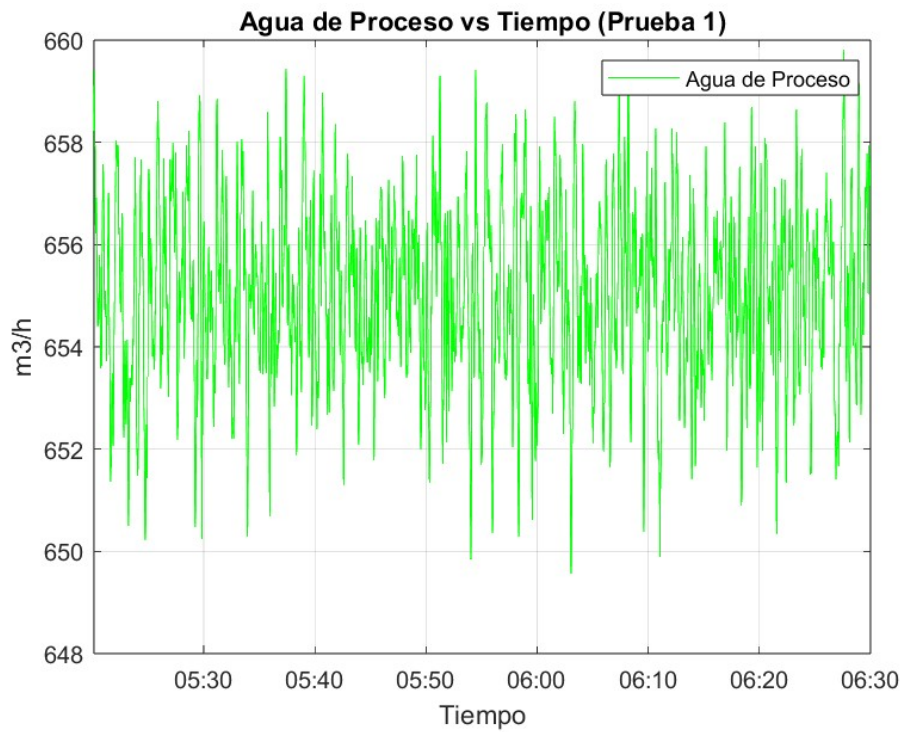


Figura 4.100: Comportamiento flujo Agua de proceso.

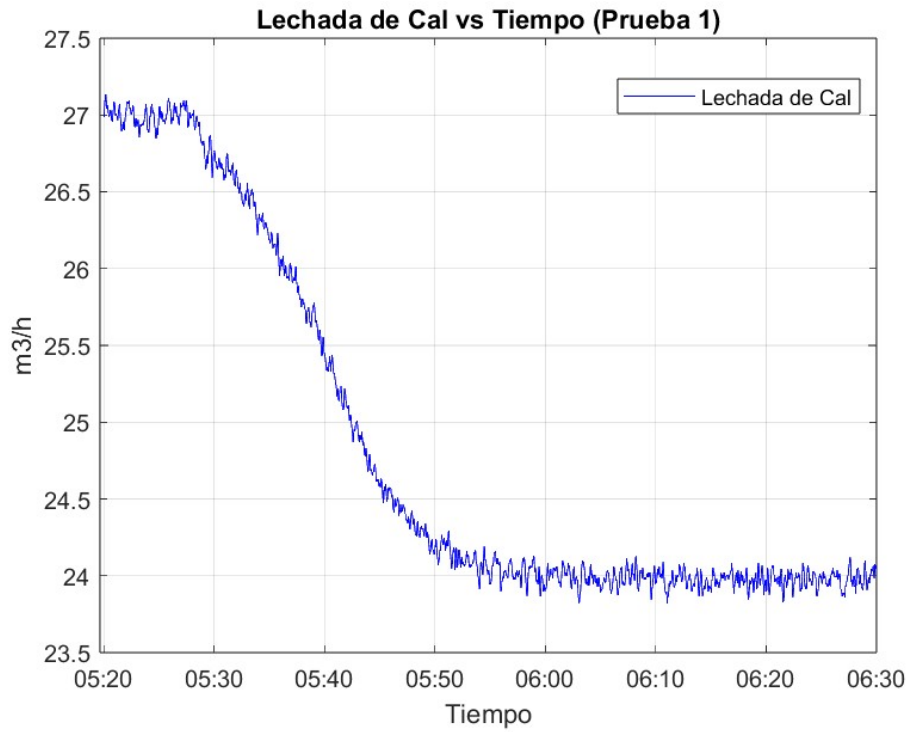


Figura 4.101: Comportamiento flujo Lechada de cal.

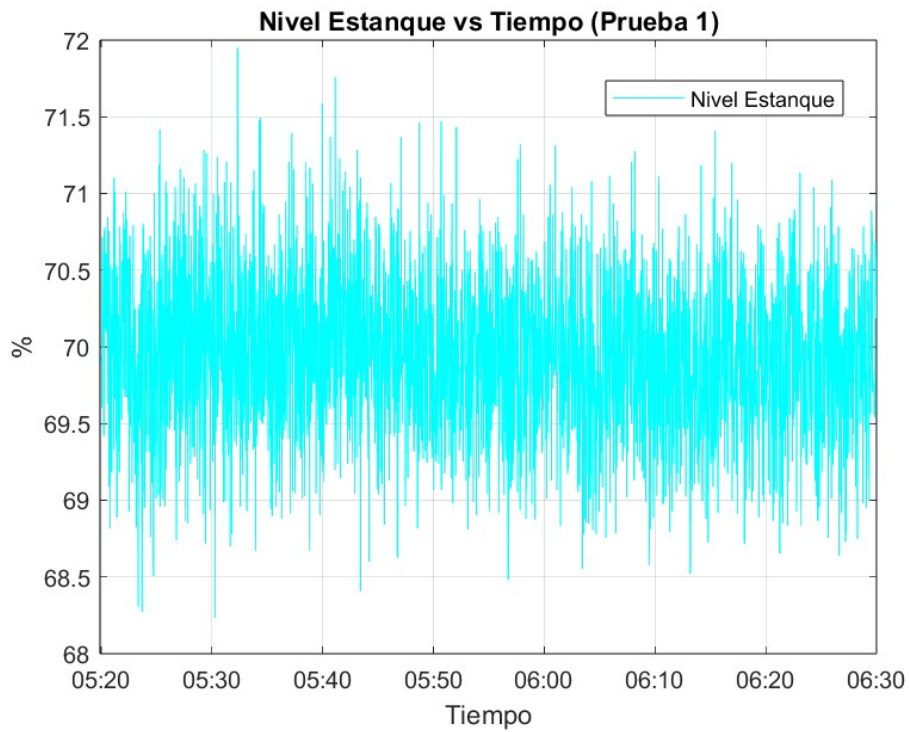


Figura 4.102: Comportamiento de la variable Nivel estanque.

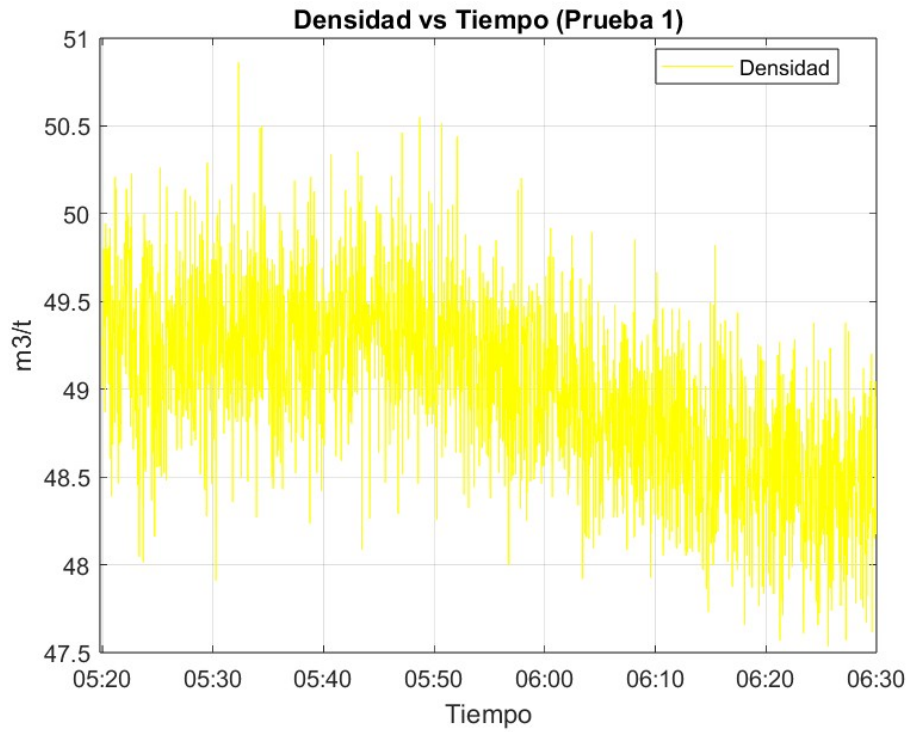


Figura 4.103: Comportamiento de la variable Densidad de pulpa de salida.

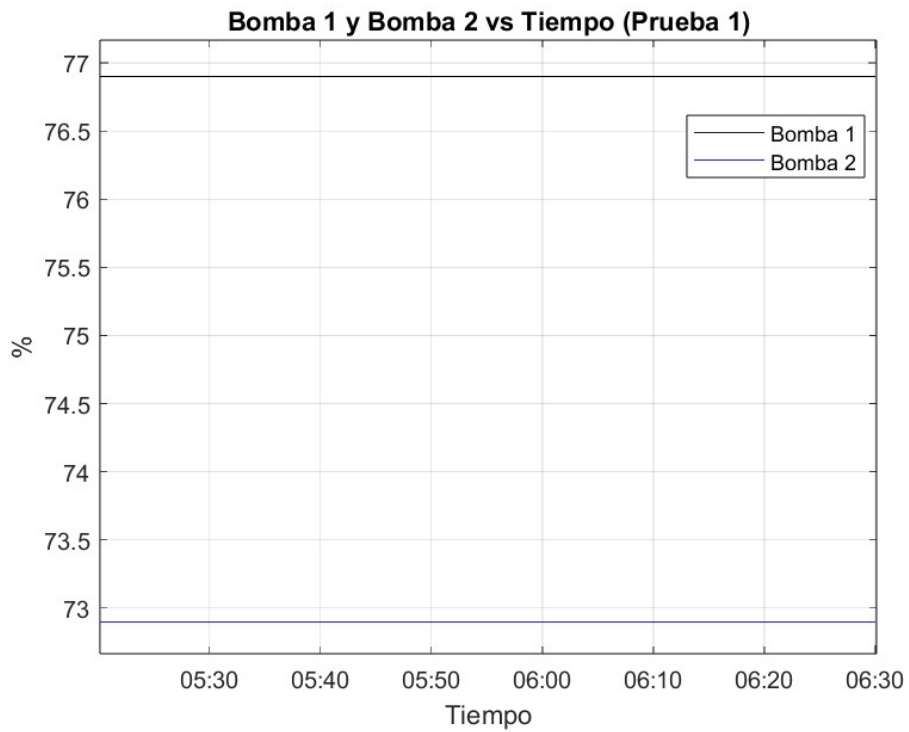


Figura 4.104: Comportamiento de las Bombas de salida.

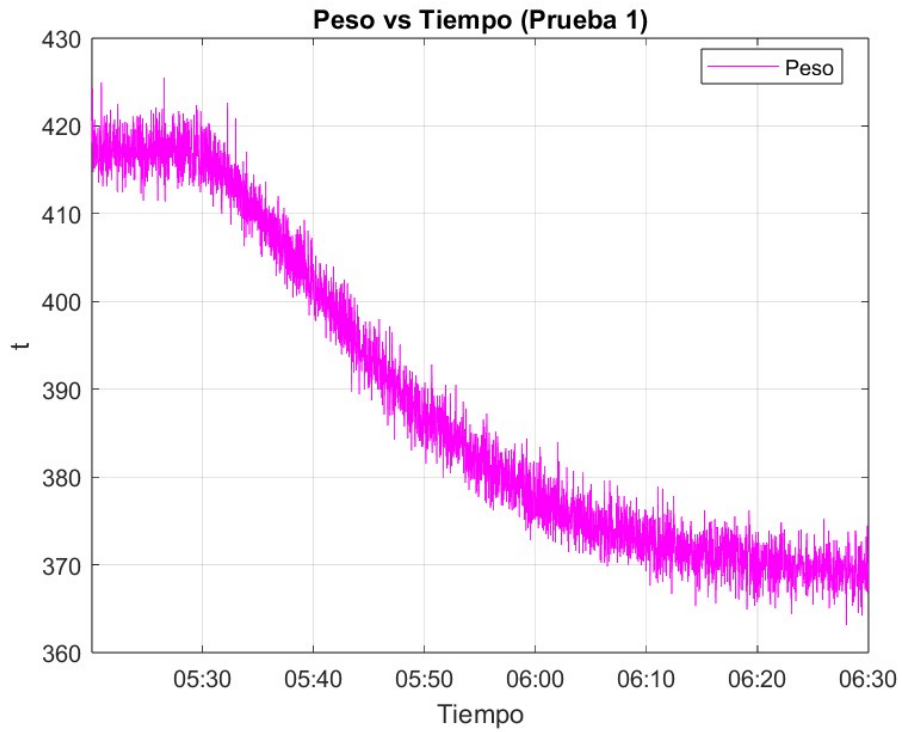


Figura 4.105: Comportamiento de la variable *Peso*.

Luego se aumenta el setpoint de los feeders a 1650 t/h para evaluar el comportamiento de la planta. Se obtienen los resultados:

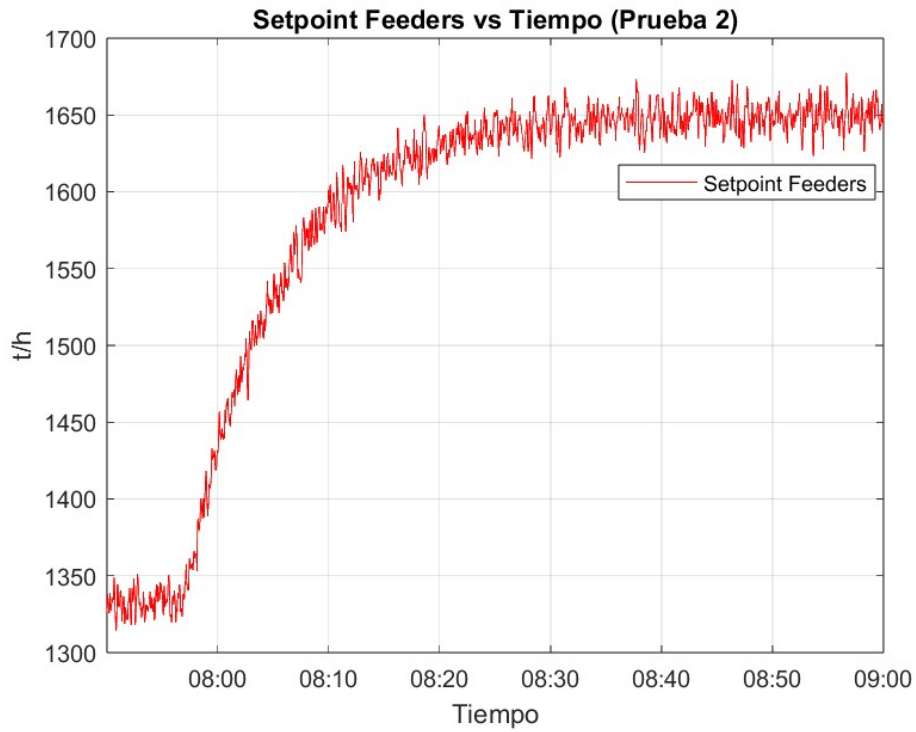


Figura 4.106: Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.

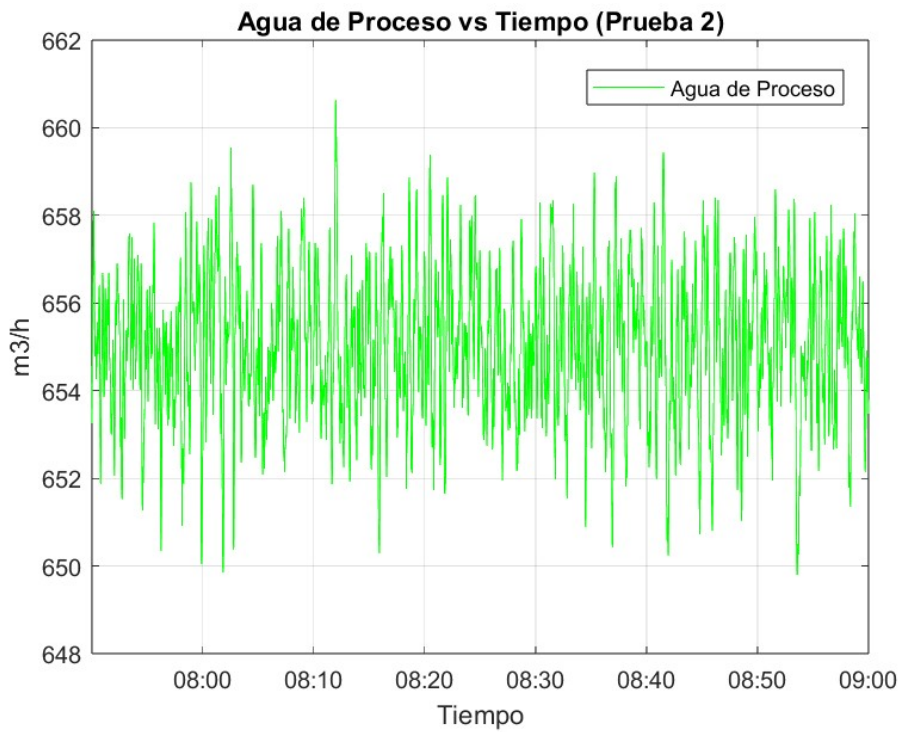


Figura 4.107: Comportamiento flujo Agua de proceso.

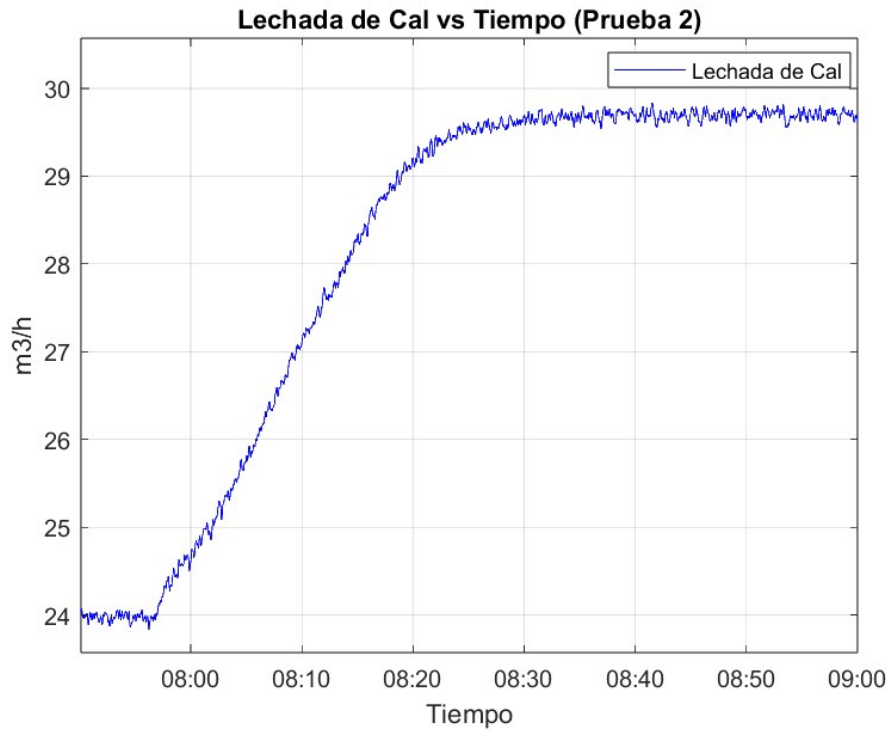


Figura 4.108: Comportamiento flujo Lechada de cal.

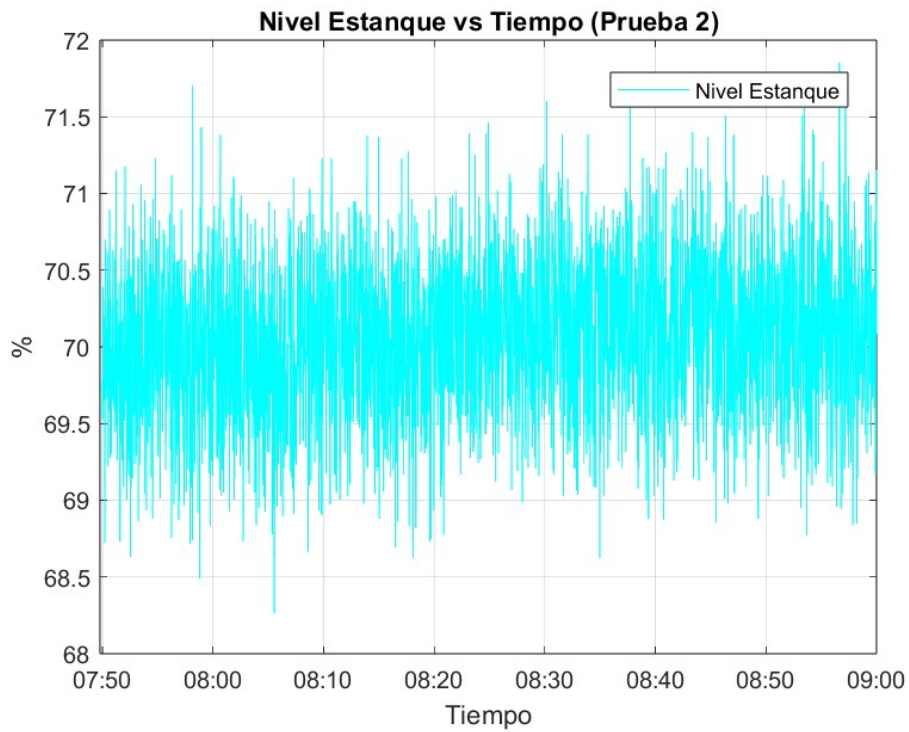


Figura 4.109: Comportamiento de la variable Nivel estanque.

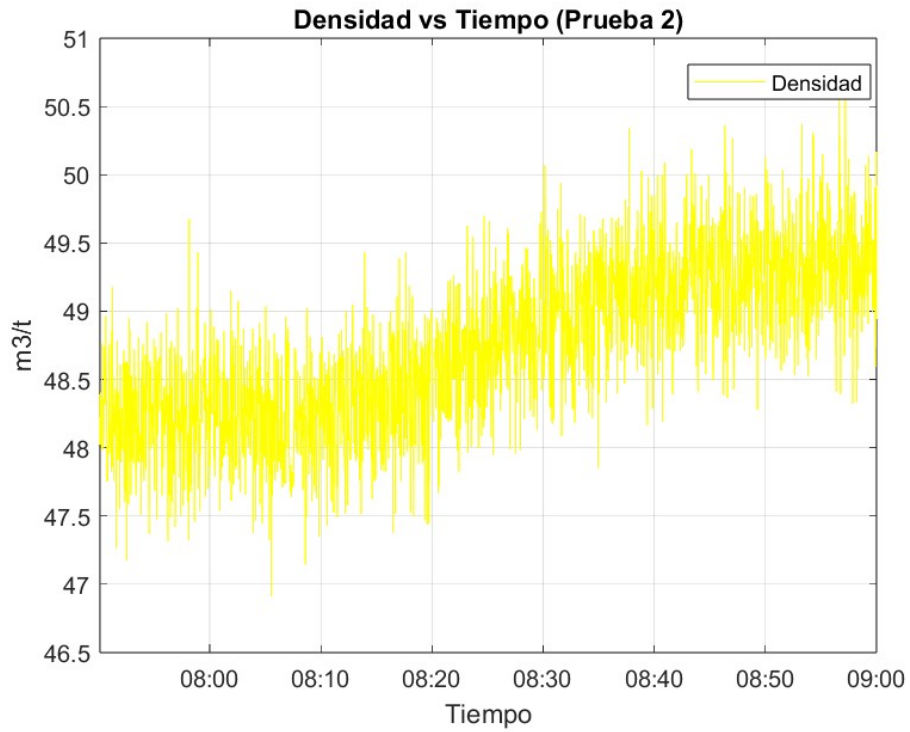


Figura 4.110: Comportamiento de la variable Densidad de pulpa de salida.

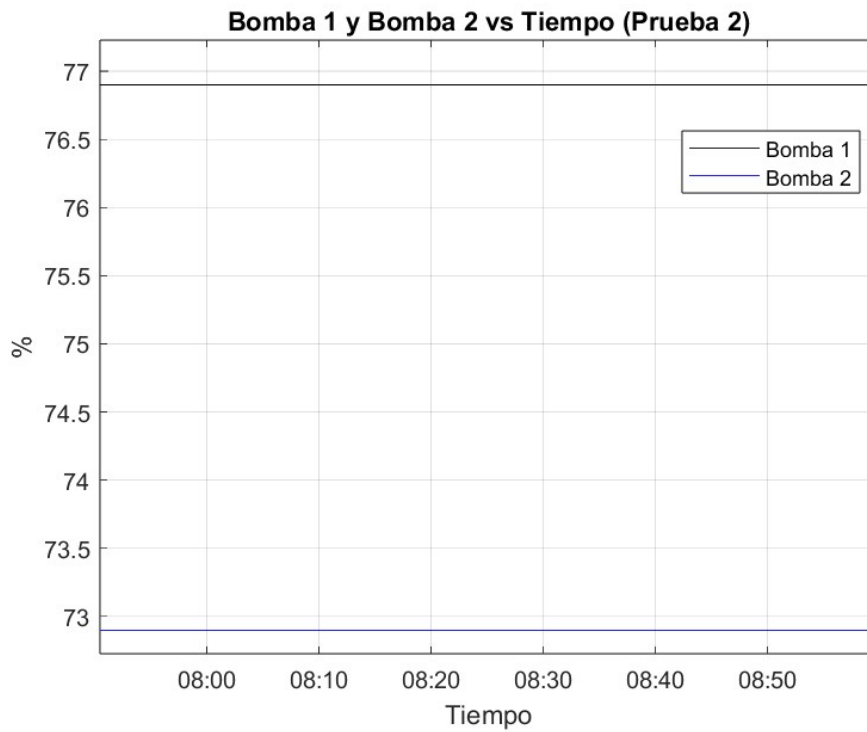


Figura 4.111: Comportamiento de las Bombas de salida.

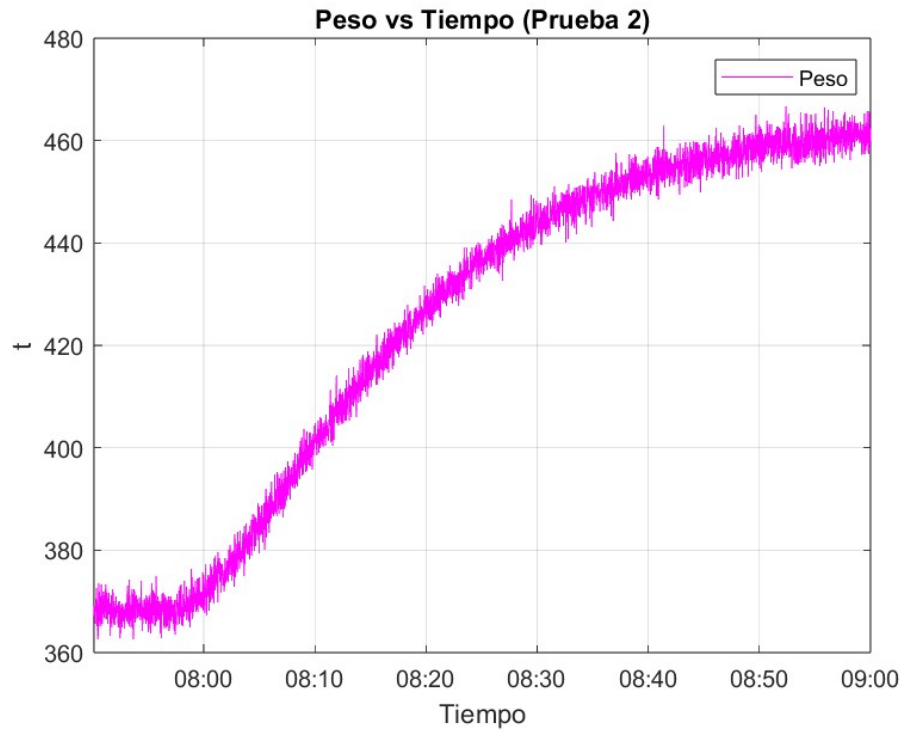


Figura 4.112: Comportamiento de la variable *Peso*.

Finalmente, se cierra la línea dos de descarga para evaluar si con ese cambio la planta logra controlar la densidad de salida en el rango de [56-60] %.

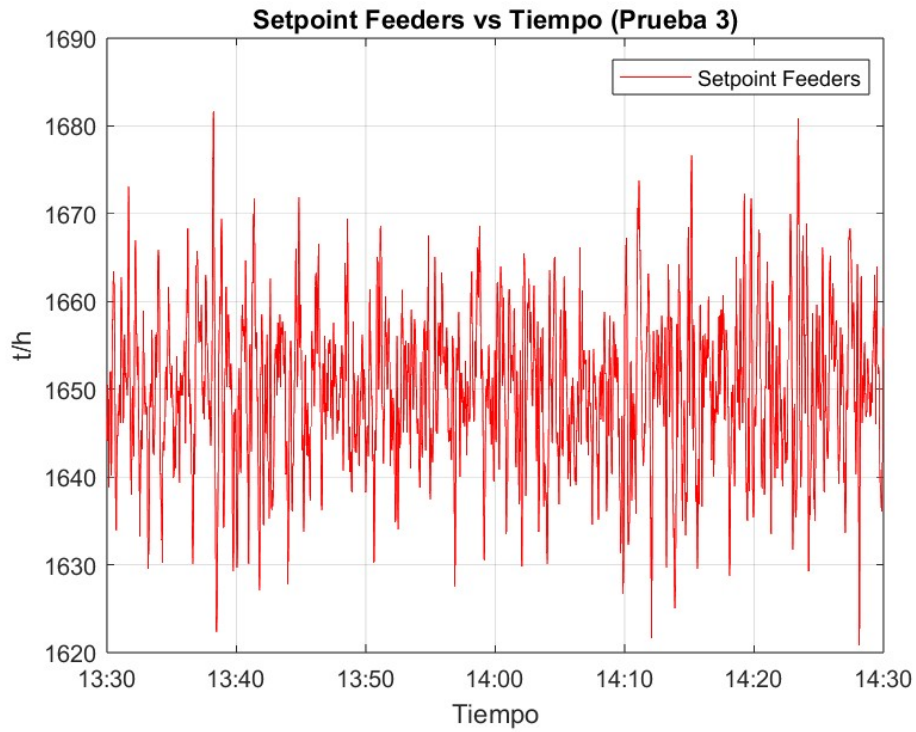


Figura 4.113: Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.

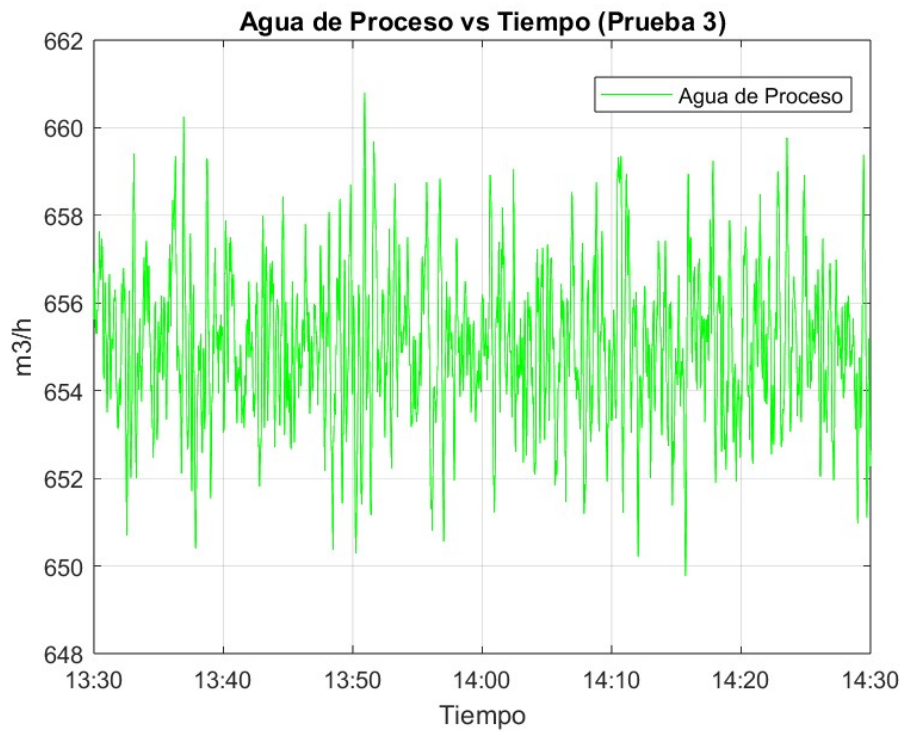


Figura 4.114: Comportamiento flujo Agua de proceso.

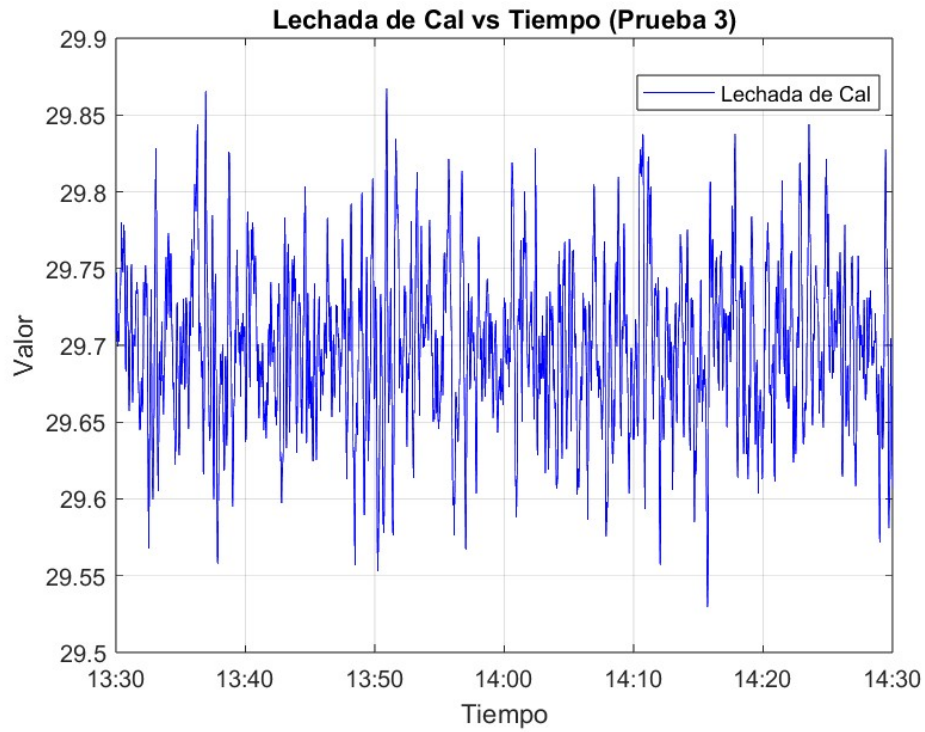


Figura 4.115: Comportamiento flujo Lechada de cal.

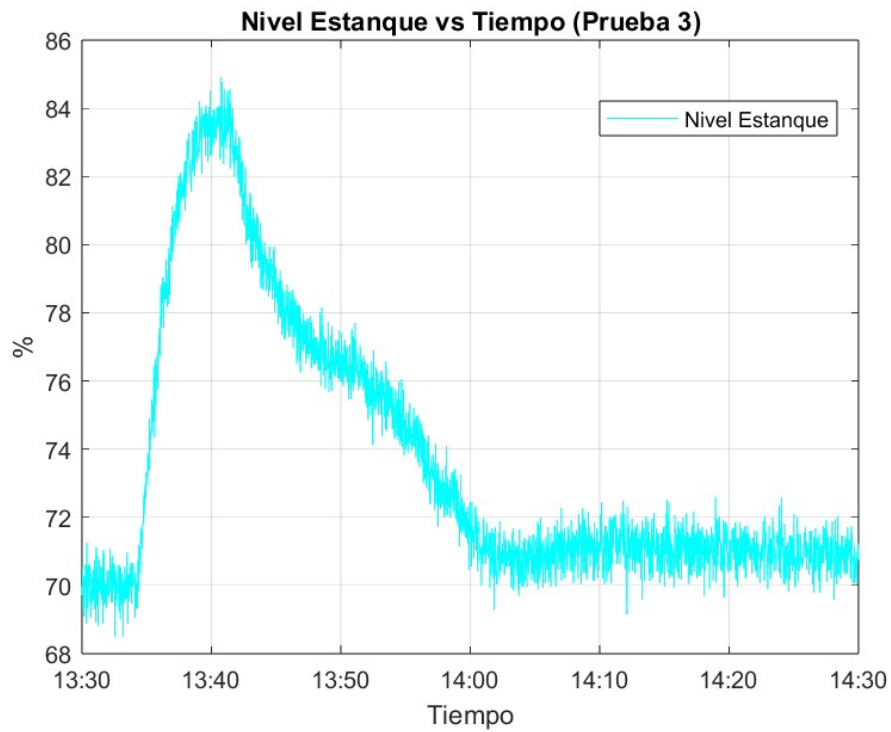


Figura 4.116: Comportamiento de la variable Nivel estanque.

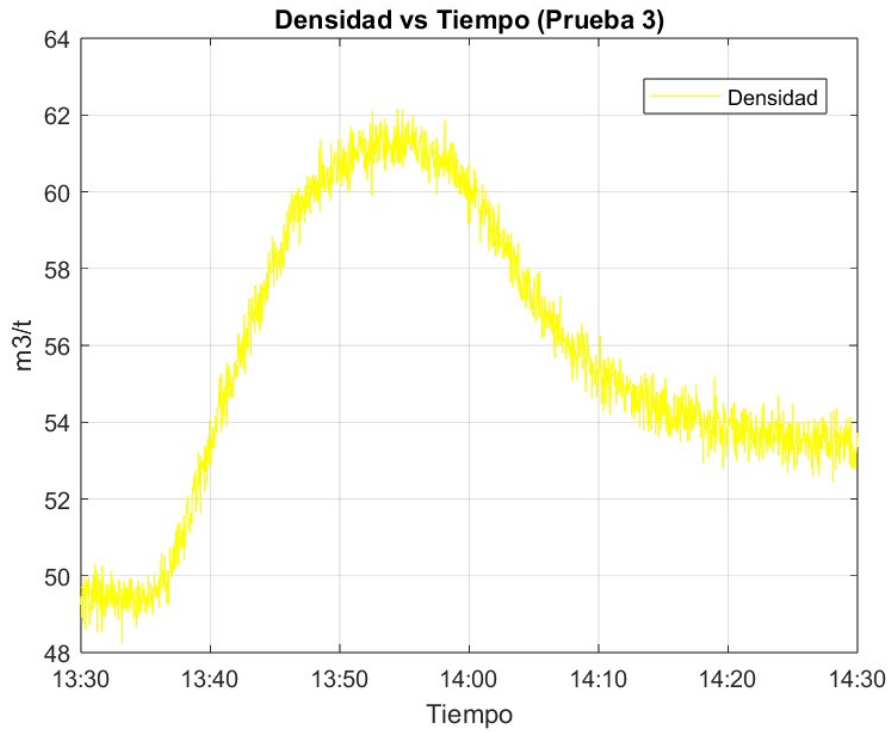


Figura 4.117: Comportamiento de la variable Densidad de salida.

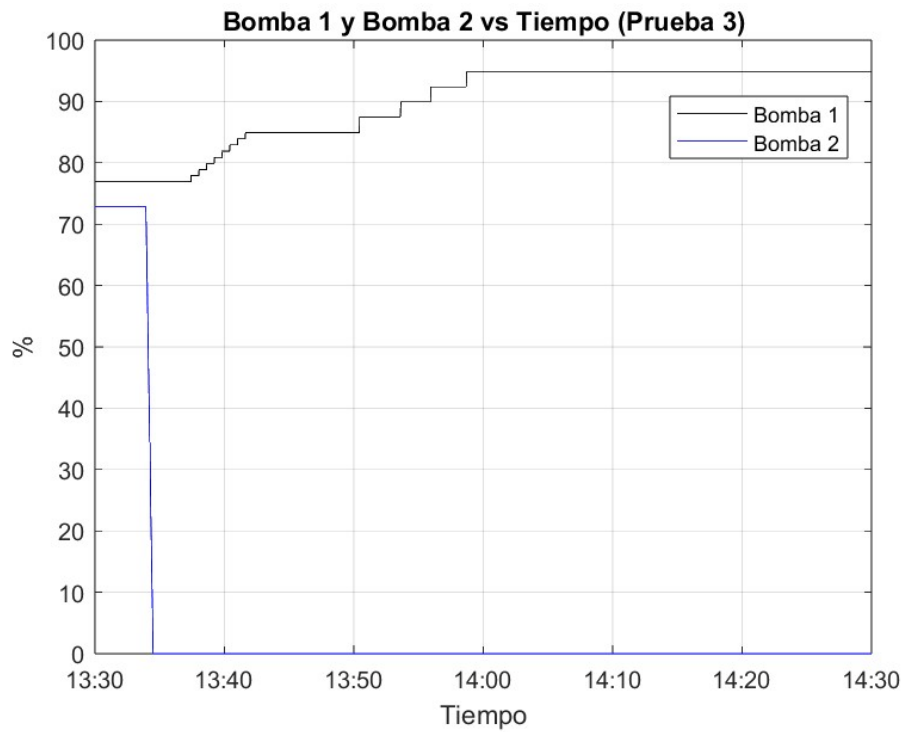


Figura 4.118: Comportamiento de las Bombas de salida.

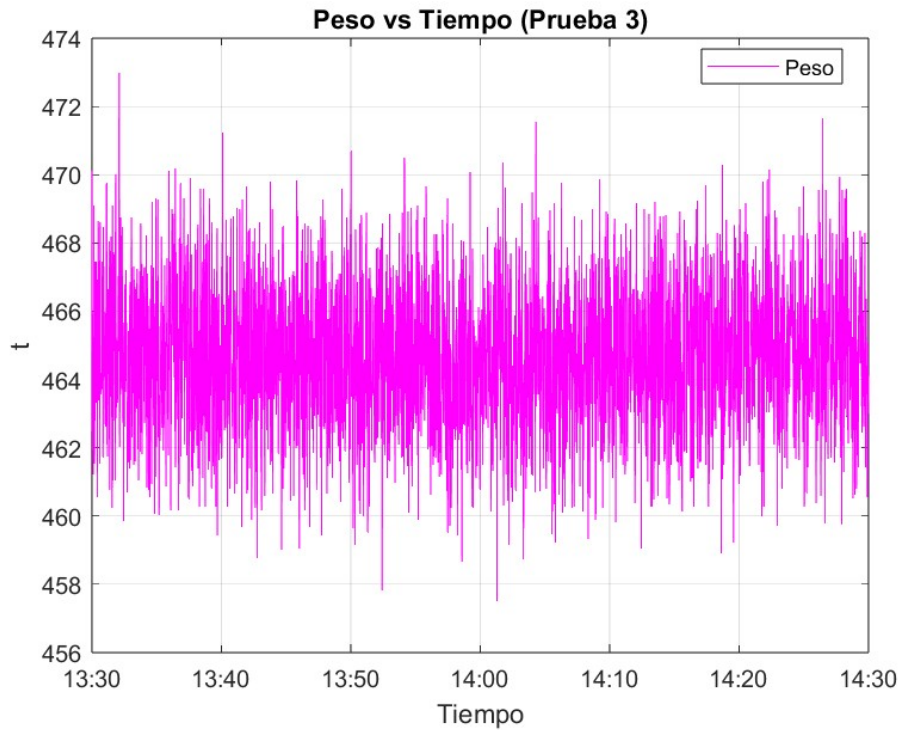


Figura 4.119: Comportamiento de la variable *Peso*.

Como se observa en las figuras anteriores, la planta sigue correctamente el setpoint de los feeders y mantiene el nivel del estanque. Sin embargo, no alcanza la densidad de flujo deseada, incluso al cerrar la línea 2 de descarga, aunque logra incrementarla hasta un 53 %.

4.3.4.2. Componente Molino SIMIT CTE

Se realiza la primera prueba, modificar el setpoint de los feeders a $1332 t/h$ para evaluar el comportamiento de la planta. Se obtienen los siguientes resultados:

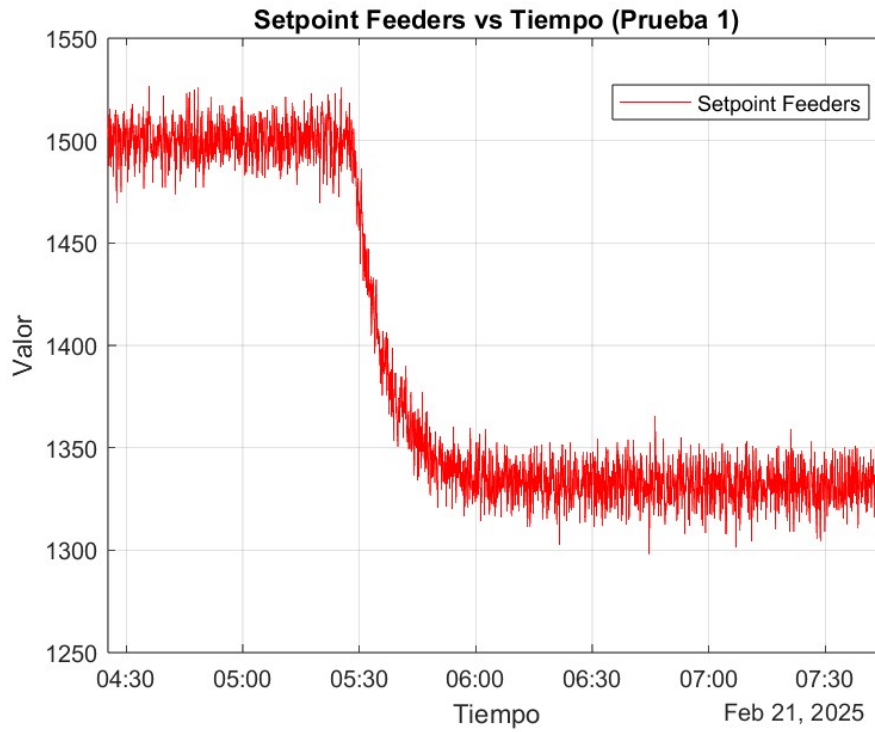


Figura 4.120: Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.

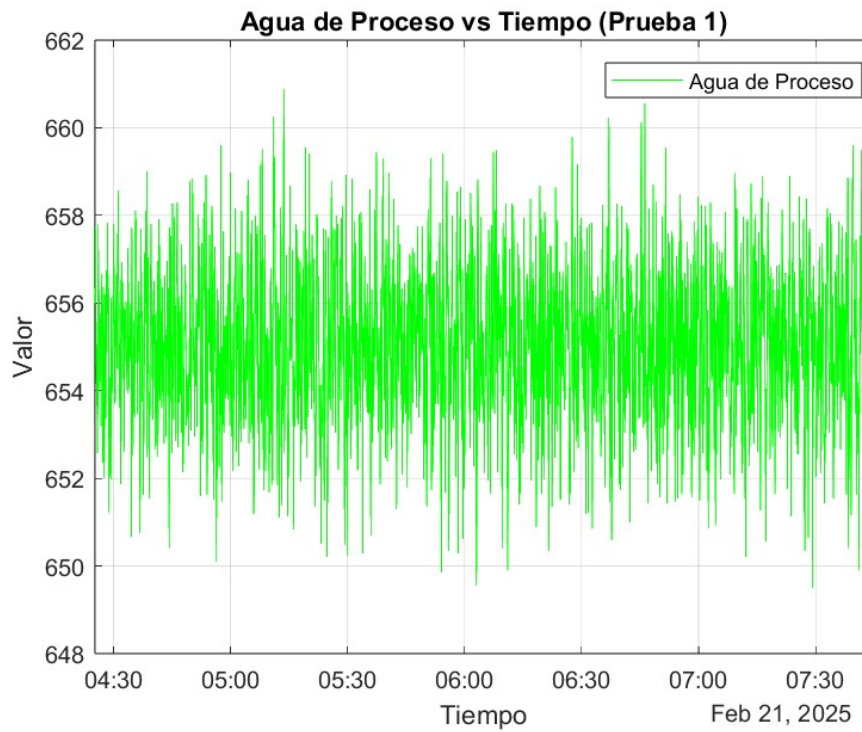


Figura 4.121: Comportamiento flujo Agua de proceso.

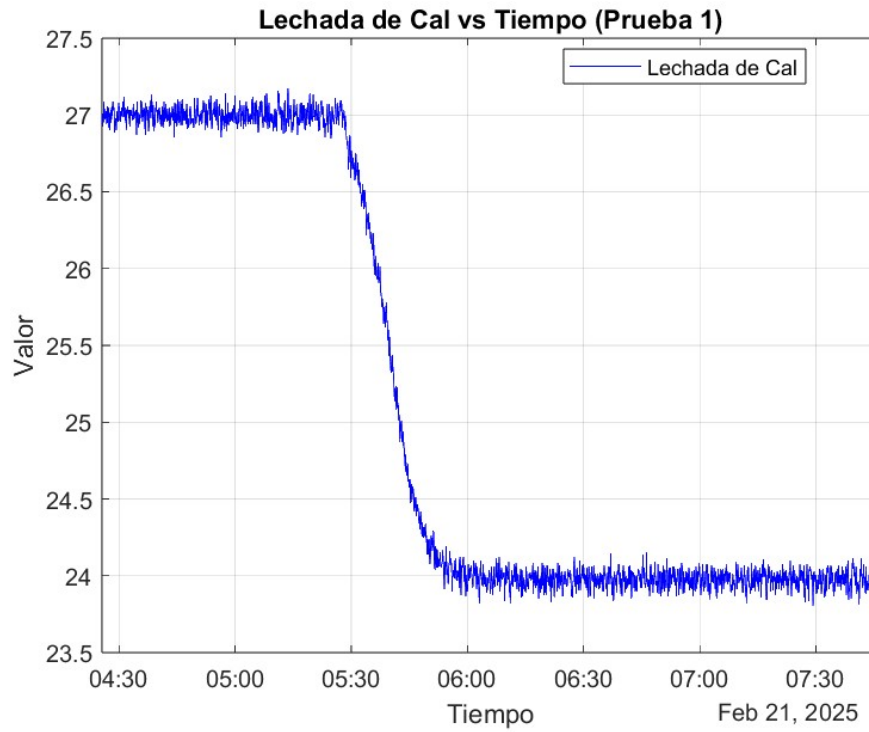


Figura 4.122: Comportamiento flujo Lechada de cal.

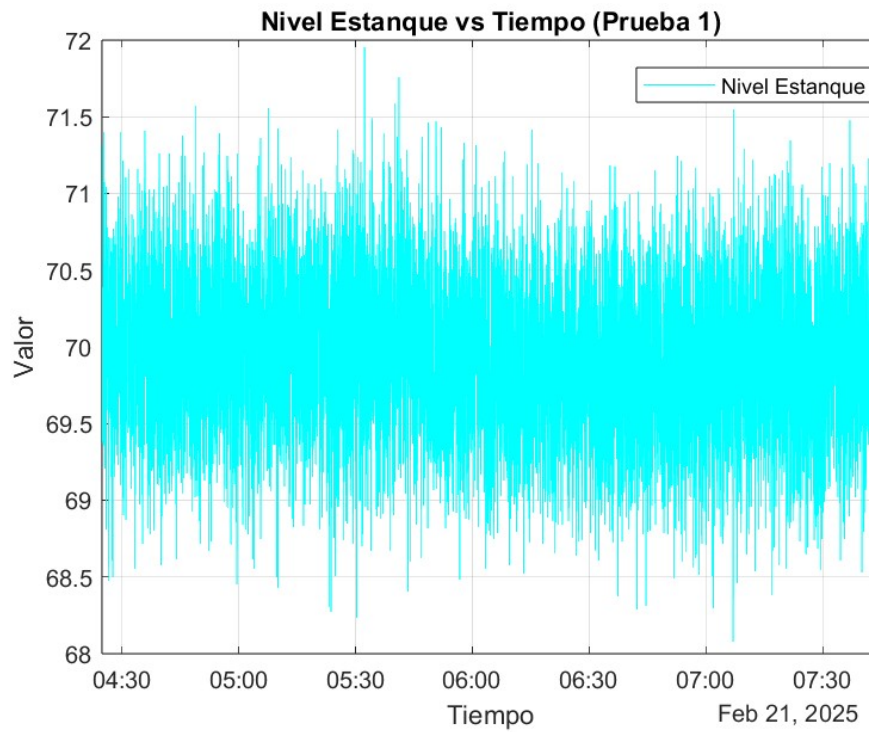


Figura 4.123: Comportamiento de la variable Nivel estanque.

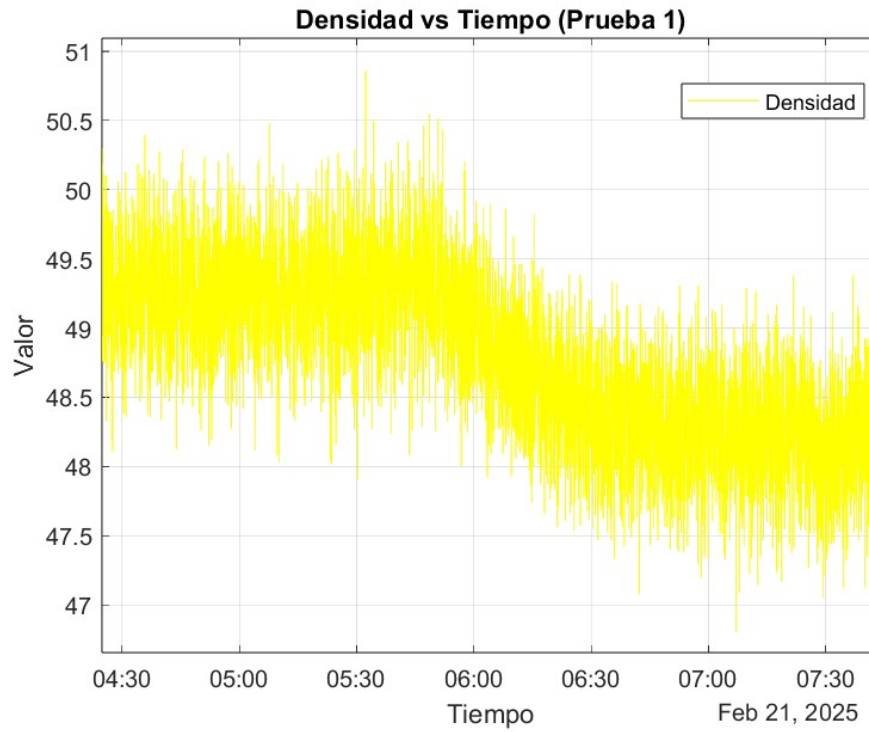


Figura 4.124: Comportamiento de la variable Densidad de salida.

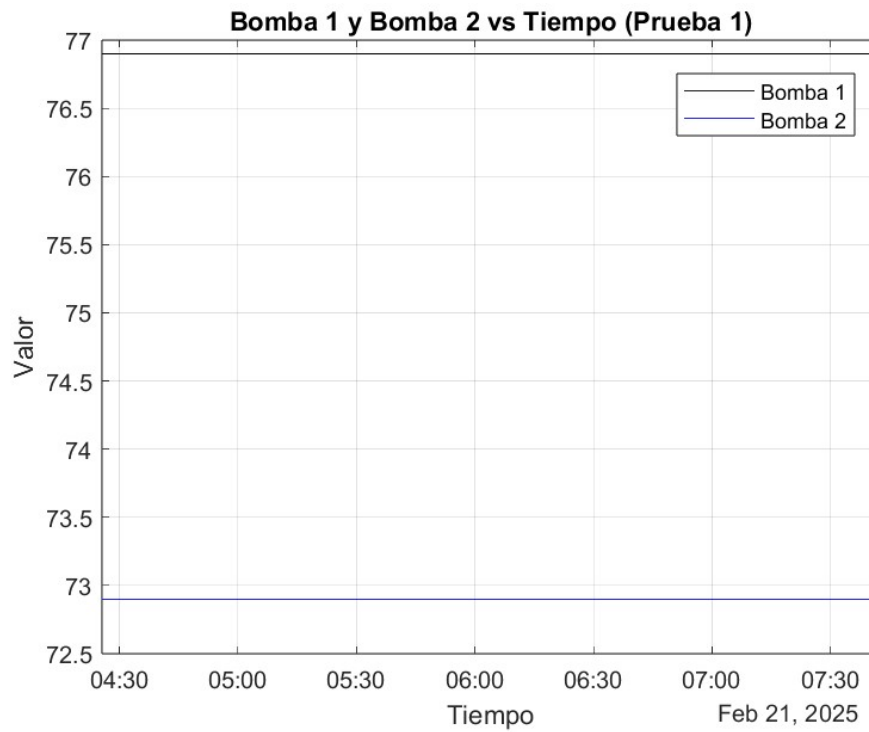


Figura 4.125: Comportamiento de las Bombas de salida.

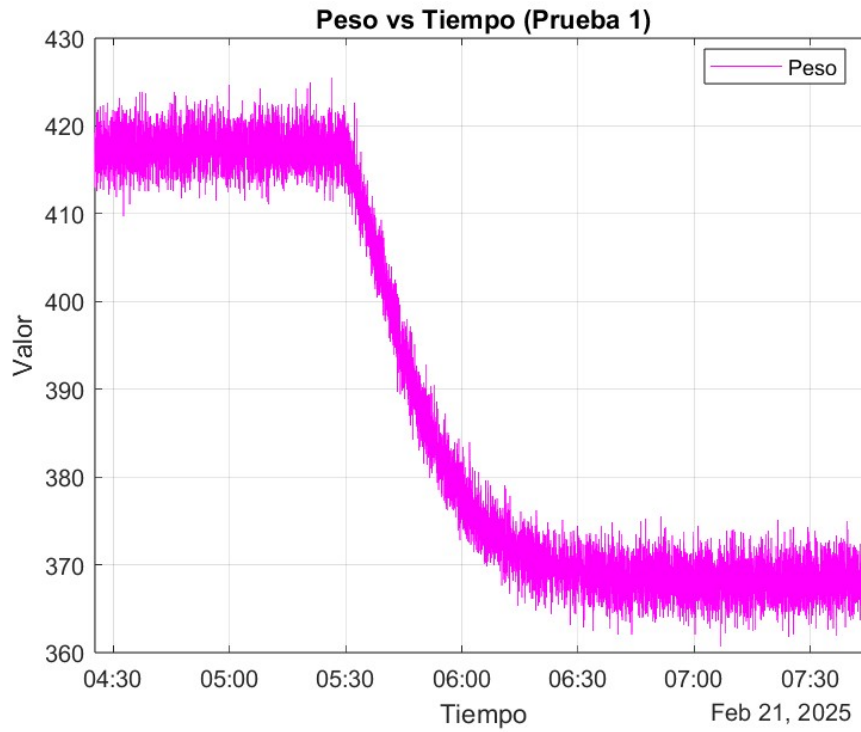


Figura 4.126: Comportamiento de la variable *Peso*.

Luego se aumenta el setpoint de los feeders a 1650 t/h .

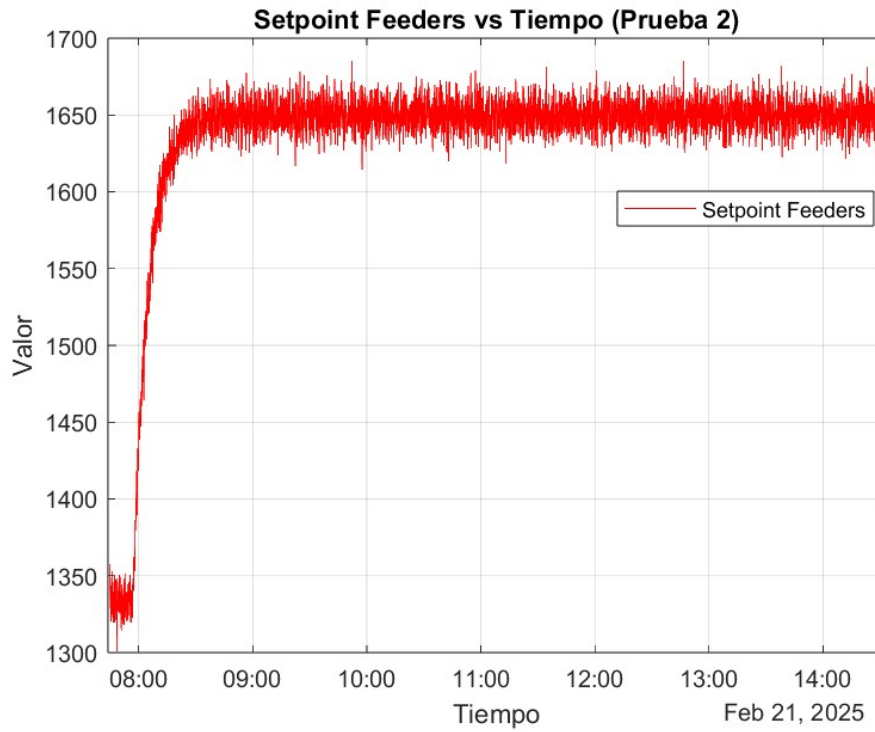


Figura 4.127: Comportamiento seguimiento Setpoint Feeders.

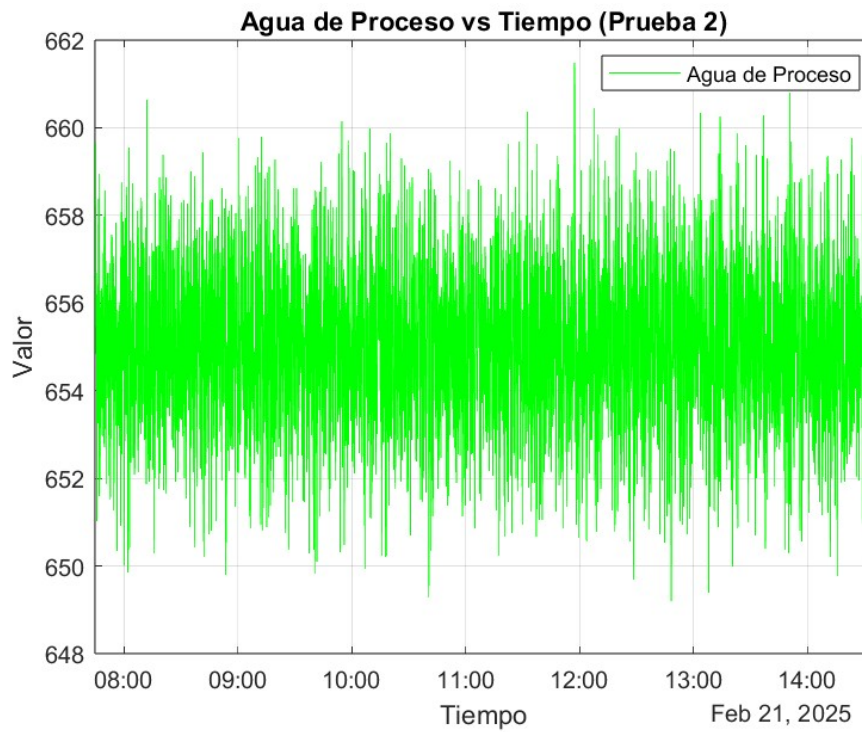


Figura 4.128: Comportamiento flujo Agua de proceso.

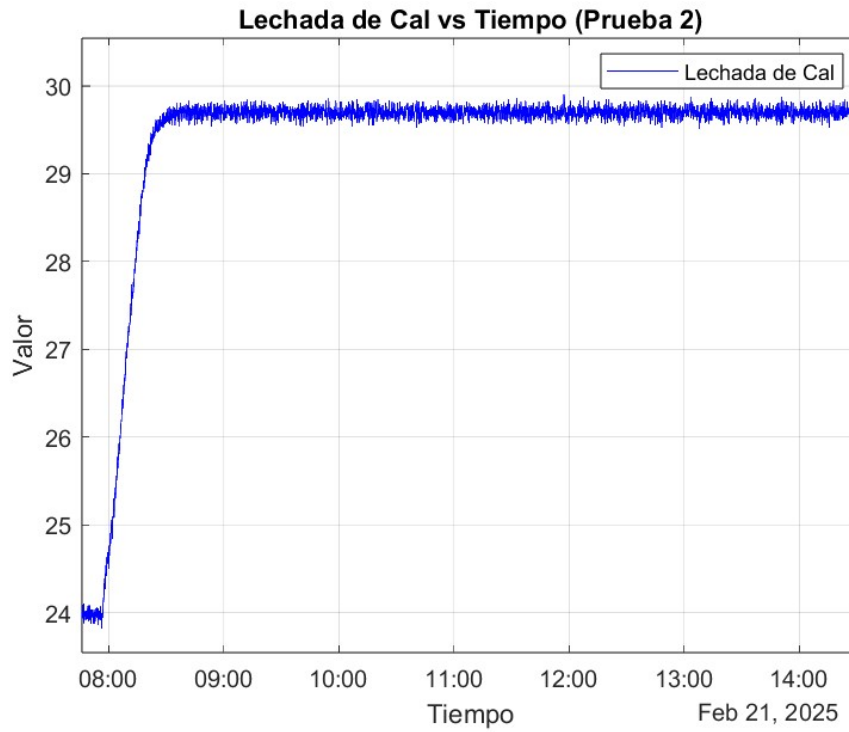


Figura 4.129: Comportamiento flujo Lechada de cal.

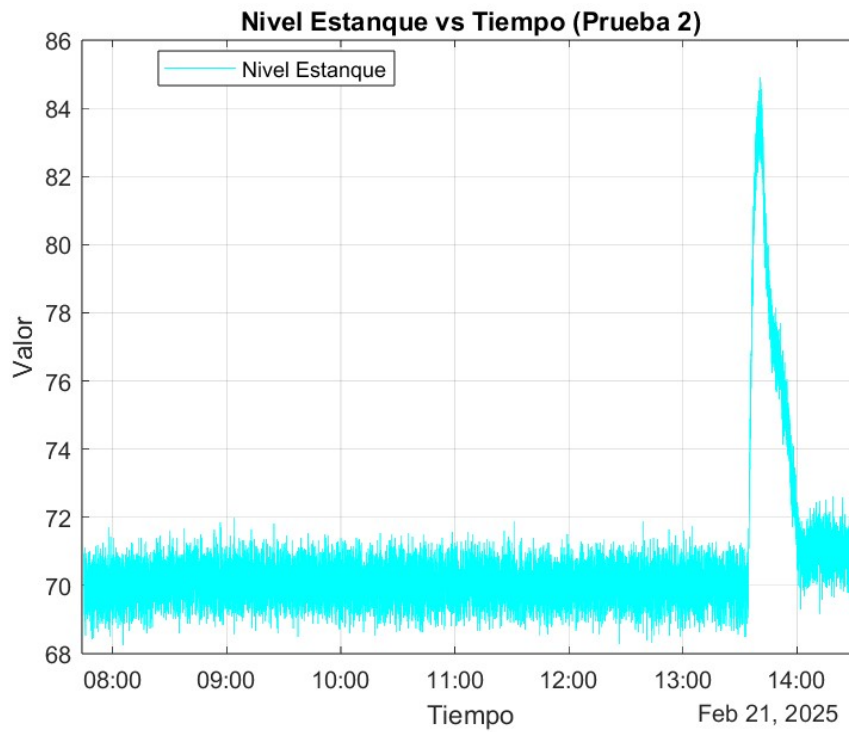


Figura 4.130: Comportamiento de la variable Nivel estanque.

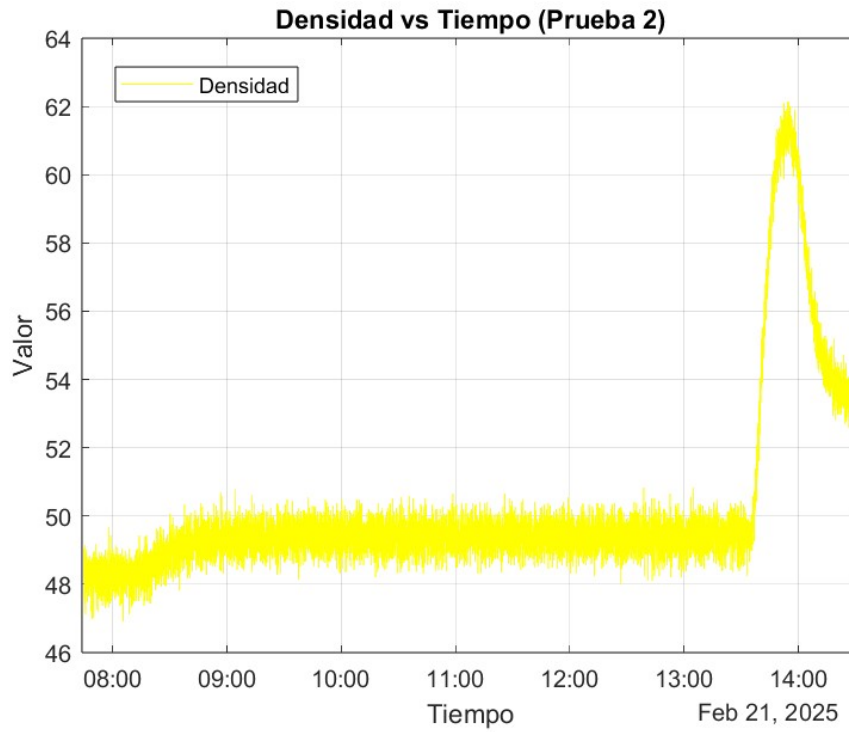


Figura 4.131: Comportamiento de la variable Densidad de salida.

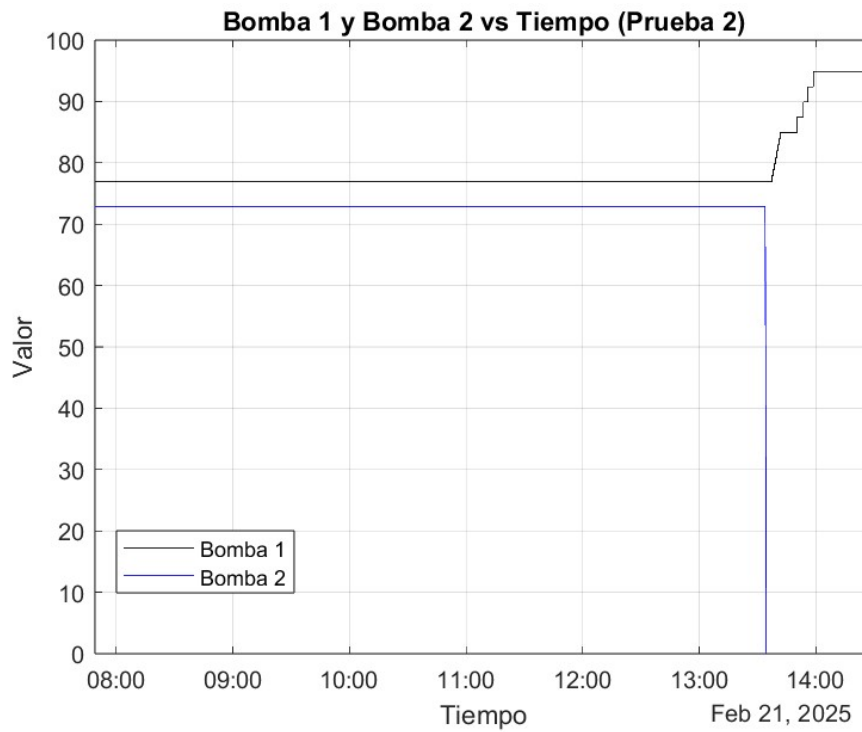
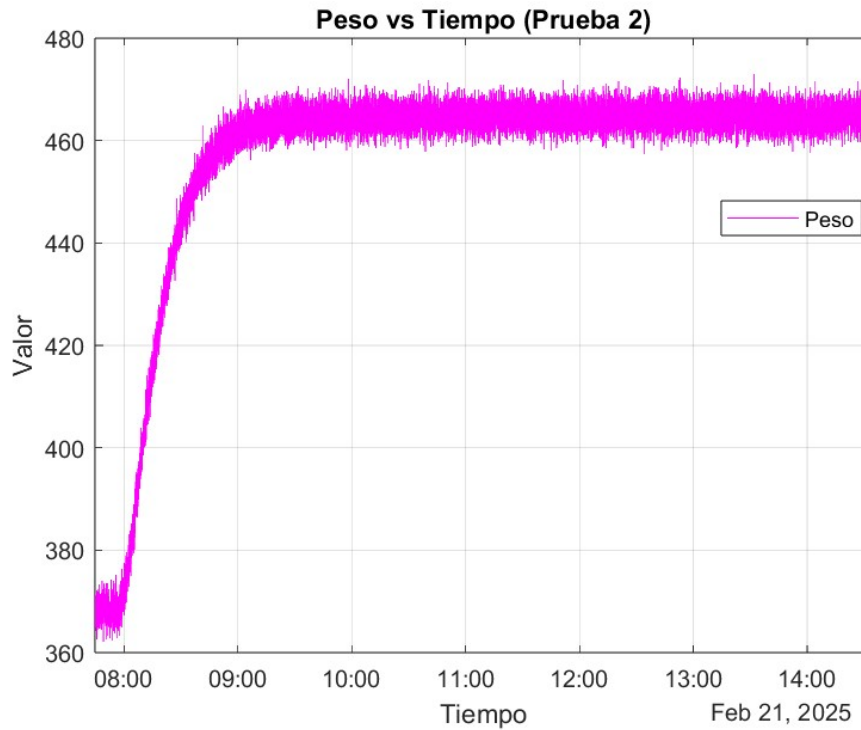


Figura 4.132: Comportamiento de las Bombas de salida.

Figura 4.133: Comportamiento de la variable *Peso*.

Al igual que en la sección anterior [4.3.4.1](#), no se alcanza la densidad de pulpa de salida deseada [56-60] %. Por ello, en la última hora de simulación, se cierra la línea 2 de descarga del estanque para evaluar su impacto en la densidad del flujo de salida. Como resultado, esta aumenta al 53 %, mientras que la bomba de la línea 1 incrementa su operación al 95 %.

Finalmente, se presentan las gráficas de ambas pruebas, incluyendo todas las señales registradas.

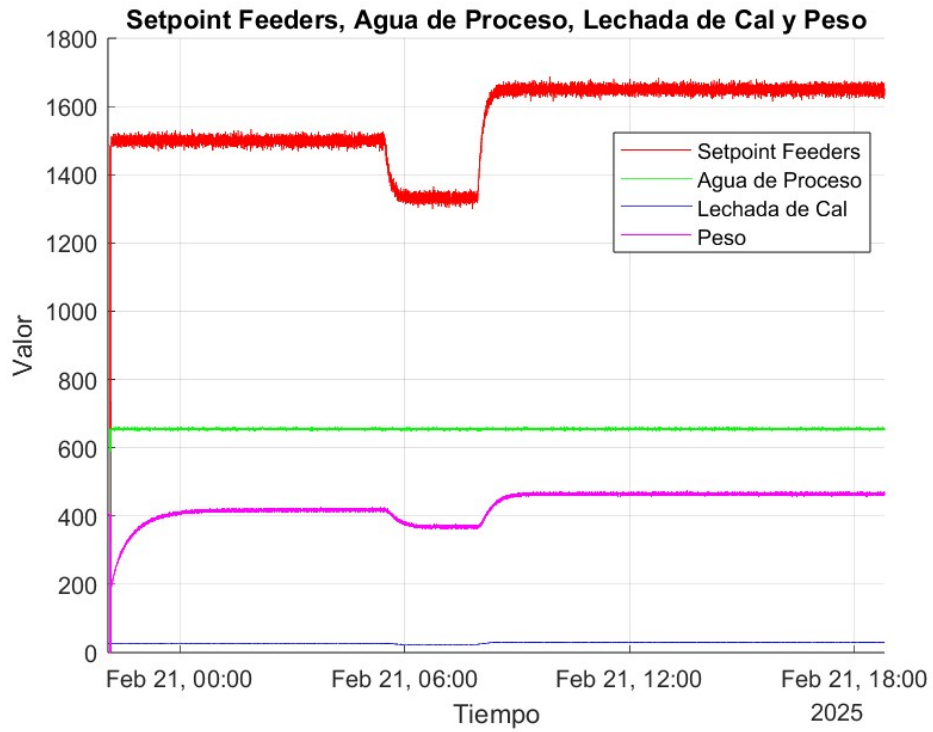


Figura 4.134: Comportamiento de las señales Setpoint feeders, Agua de proceso, Lechada de cal y Peso.

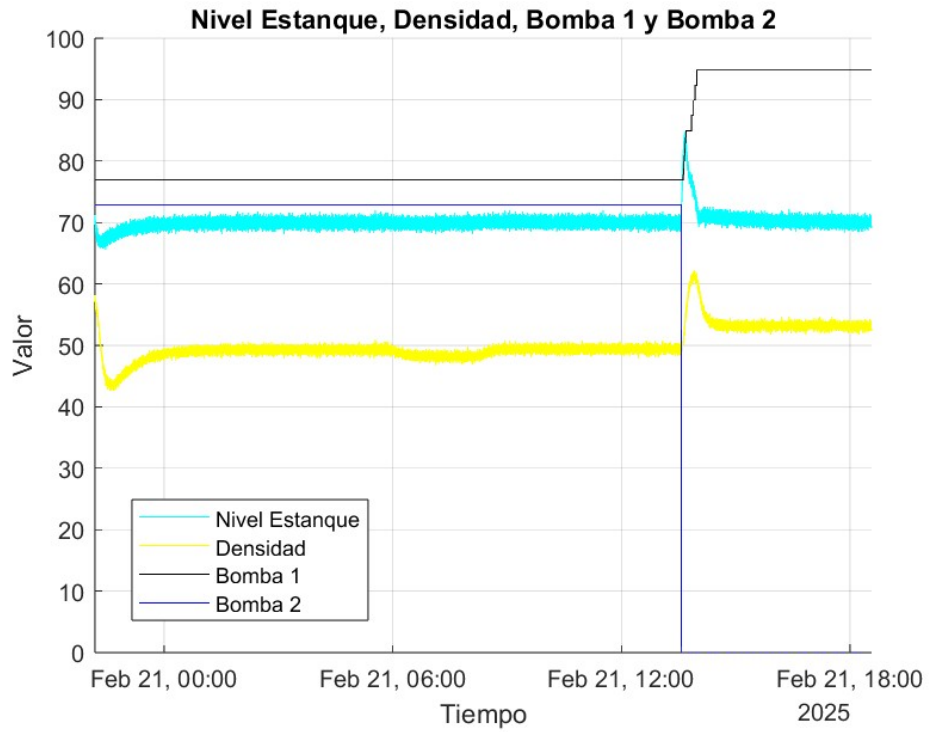


Figura 4.135: Comportamiento de las señales Nivel de estanque, Densidad y Funcionamiento de las bombas.

5 | Análisis de resultados y conclusiones

5.1. Análisis de resultados

Las pruebas realizadas en el estanque conectado al DCS PCS7 demuestran que es posible controlar su nivel de manera efectiva y se logra simular satisfactoriamente el comportamiento de un estanque simple.

Las pruebas realizadas al molino SAG aislado en Simulink en [4.3.2](#), logran los resultados esperados, lo que indica que el modelo ha sido correctamente parametrizado, pues logra simular con errores mínimos los procesos que ocurren dentro del molino, haciendo referencia a los submodelos que describe Amestica [\[14\]](#). Además, mediante pruebas experimentales, se determina que la capacidad mínima y máxima de procesamiento del molino en funcionamiento aislado son 250 t/h y 1750 t/h respectivamente.

Estos valores dependen en gran medida del porcentaje de llenado J , el cual debe mantenerse entre 0.25 y 0.4 para garantizar un rendimiento eficiente. Si J es demasiado bajo, la cantidad de carga dentro del molino es insuficiente para generar un proceso efectivo de conminución. Por el contrario, si J supera el umbral óptimo, la carga dentro del molino es excesiva, impidiendo la caída libre de las rocas y reduciendo la fragmentación por impacto.

Una forma matemática de ver el impacto de este fenómeno es en el resultado de la ecuación de potencia del molino [1.12](#). A medida que J aumenta, la potencia del molino comienza a disminuir por el factor $(1 - A \cdot J)$. Esto se debe a que un mayor volumen de carga reduce el espacio libre dentro del molino, limitando la altura de caída del material y, en consecuencia, disminuyendo los impactos efectivos en el proceso de conminución. Como resultado, el molino entra en un régimen de “sobrecarga”, donde la eficiencia de molienda se ve comprometida, y una fracción significativa de la energía se disipa en fricción en lugar de generar impactos útiles para la reducción del tamaño del material.

Además, se puede observar en las gráficas de las pruebas del molino SAG aislado en Simulink que el comportamiento de las señales M_P , J , P_ast y $Peso$ es muy similar. Esto se debe a que todas estas señales dependen de la variable $Hold\ up$ para su cálculo.

Al comparar el modelo de dimensión 12 con el reducido a 3 en la sección [4.3.2](#), se observa que la dinámica de las variables cambia y el modelo del molino se vuelve más rápido. Esto es esperable, ya que al limitar el modelo a tres granulometrías (grueso, intermedio y fino) se pierde información del proceso de molienda

5.1.1. Conexión SyncSiMa para sincronizar SHM con Matlab&Simulink

En la sección 4.3.3 se da a entender que al cambiar el paso temporal del solver de 0.1 a 0.58 al utilizar ambos programas en conjunto para acceder a la SHM, se produce un cambio significativo en las gráficas. Esto se debe a que el bloque Assertion introduce pausas constantes en la ejecución de Simulink, generando un delay en la simulación con respecto al tiempo real graficado en WinCC a partir de las señales de PCS7.

Este delay se ve agravado por el hecho de que, al trabajar el tiempo de simulación en segundos, se requieren más iteraciones para calcular las integrales en Simulink, lo que implica un mayor costo computacional. Sin embargo, este costo puede reducirse aumentando el paso del solver. Aunque esta decisión conlleva un riesgo, ya que ambos programas ejecutan cálculos y escrituras en la SHM de manera desfasada, resulta ser la mejor alternativa. Pues, al simular con un paso de 0.1, la simulación avanza solo siete minutos en un período de 20 minutos de tiempo real, provocando un desfase significativo en los valores del modelo.

El ajuste del paso temporal permite equilibrar el tiempo de cálculo con el tiempo necesario para ejecutar el siguiente paso de simulación, optimizando así el rendimiento del sistema.

En cuanto al control del estanque se puede analizar que el trabajar directamente con una simulación en SIMIT y no Simulink, es más sencilla la comunicación con PCS7 al no existir un tercer intermediario entre las aplicaciones.

5.1.2. Comparación de modelos aislados de molino SAG

En esta sección se comparan los resultados obtenidos por dos versiones del modelo dinámico del molino SAG: una con 12 granulometrías y otra con 3 granulometrías. Ambos modelos fueron simulados en condiciones idénticas para evaluar cómo afecta la simplificación del tamaño del sistema al comportamiento del proceso.

Ambos modelos logran representar adecuadamente la dinámica del molino y se estabilizan en los valores deseados del punto de operación. Sin embargo, se observan diferencias en la velocidad de estabilización y en algunos valores estacionarios clave. A continuación, se presenta una tabla comparativa con las principales variables monitoreadas, su valor final en cada modelo, el porcentaje de diferencia respecto al modelo de mayor resolución, y el tiempo aproximado en que cada modelo alcanza estabilidad:

Variable	12 x 12		3 x 3		Error %	12 x 12		3 x 3		Error %
	Tiempo inicial - s	Tiempo inicial s	Tiempo inicial - s	Tiempo inicial s		Tiempo estacionario - s	Tiempo estacionario s	Tiempo estacionario - s	Tiempo estacionario s	
M_P [kW]	6497	0	6499	0	0.0308	6500	3600	6499.8	2500	0.0031
J	0.4	0	0.399	0	0.25	0.4	3600	0.399	2500	0.25
H_m [t]	185	0	185.5	0	0.270	186	3600	187	2500	0.5376
R [t/h]	2600	0	3200	0	23.08	2935	3600	2940	2000	0.1703
P [t/h]	2250	0	2350	0	4.44	1332	3600	1333	2000	0.0751
Peso [t]	195	0	197	0	1.03	246	3600	246	3600	0
DW [t/h]	2320	0	2400	0	3.45	1550	3600	1580	3600	1.9355

Como se observa, el modelo 3x3 alcanza el estado estacionario en un tiempo aproximadamente un tercio menor que el modelo 12x12 (2500 s frente a 3600 s), debido a su menor complejidad

computacional. No obstante, esta simplificación conlleva una pérdida de precisión en variables como el volumen de llenado J , la potencia consumida M_P y el peso total del molino. Aun así, la tendencia general y el orden de magnitud de las variables se conservan, lo que valida el uso del modelo 3×3 en pruebas donde se priorice la velocidad de simulación por sobre la precisión detallada.

Tanto el uso de memoria compartida (SHM) para simular el modelo en Simulink como la creación de un objeto en SIMIT CTE presentan ventajas y limitaciones.

El uso de SHM permite una simulación precisa de la dinámica del molino SAG, pero está condicionado por restricciones en el tiempo de simulación debido a la complejidad computacional de los cálculos. En contraste, el componente desarrollado en SIMIT CTE logra estabilizarse en los puntos de operación adecuados, pero altera la dinámica del molino. La reducción del modelo implica la pérdida de información intermedia, lo que genera que el modelo se vuelva más rápido. Además, al trabajar con SIMIT CTE se limita la complejidad del modelo al permitir un número reducido de ecuaciones diferenciales.

Por lo tanto, la elección entre ambas soluciones dependerá del tipo de prueba a realizar. Para pruebas cortas que requieran evaluar características específicas del molino en un intervalo de tiempo determinado, la SHM es la opción más adecuada. Sin embargo, si se necesita una simulación de mayor duración, es preferible utilizar el componente desarrollado en SIMIT CTE.

5.1.3. Conexión del molino a la planta

Como se observa en las figuras de la sección 4.3.4, la planta es capaz de seguir los distintos setpoints asignados a los feeders, así como mantener el nivel del estanque dentro del rango establecido. Sin embargo, la densidad no se mantiene dentro del intervalo deseado, lo que indica la necesidad de ajustar los parámetros del interventor asignado.

Señal	Prueba 1: Simulink aislado			Prueba 2: SHM conectado a planta			Prueba 3: SIMIT CTE conectado a planta		
	Inicial	Final	Esperado	Inicial	Final	Esperado	Inicial	Final	Esperado
Set point feeder [t/h]	1500	1332	1332	1332	1650	1650	1650	1650	1650
Agua de procesos [t/h]	656	656	-	656	656	-	656	656	-
Lechada de cal [t/h]	27	24	-	24	29.5	-	29.5	29.5	-
Nivel estanque [%]	70	70	<70	70	70.5	>70	70.5	71	>70.5
Densidad pulpa [%]	60	48.5	56-60	48.5	49.5	56-60	49.5	53.5	56-60
Bomba 1 [%]	77	77	<77	77	77	-	77	95	-
Bomba 2 [%]	73	73	<73	73	73	-	73	0	0
Peso molino [t]	420	370	dism	370	464	aum	464	464	-

Tabla 5.1: Comparación de señales en las tres pruebas realizadas

Como se muestra en la tabla ??, las pruebas se centraron en evaluar la capacidad de la planta para seguir los setpoints asociados al feeder, al nivel del estanque y a la densidad de pulpa. En este contexto, hay señales para las que no se esperaba un valor exacto, como es el caso del flujo de agua de procesos. Sin embargo, esta señal presentó el comportamiento esperado: un caudal elevado para mantener el nivel del estanque, lo que a su vez impacta directamente en la densidad de pulpa.

Respecto a la señal de peso del molino, se anticipaba una variación del tonelaje, ya sea un aumento o una disminución, como respuesta al cambio en el setpoint de alimentación fresca. No

obstante, la respuesta del sistema ante las señales de entrada de líquidos no es completamente predecible, lo cual resalta la complejidad del comportamiento dinámico de la planta.

5.2. Conclusiones

El desarrollo de la simulación dinámica del molino SAG en SIMIT ha permitido alcanzar los objetivos establecidos. La simulación del molino, diseñada para calcular el peso a partir de los flujos de entrada y salida, fue validada mediante pruebas comparativas con datos reales, mostrando que el modelo reproduce el comportamiento del molino. En cuanto al flujo de pebbles, se logra identificar la señal de la planta que lo representa 3220WIT018S1, pues este se genera en el harnero.

La integración del molino con la planta concentradora digital desarrollada por Innomatics permitió verificar su interacción dentro del sistema completo, comprobando que el modelo funciona de manera coherente con los otros componentes de la planta. Asimismo, se logró configurar el esquema SIL (Simulation in the Loop) con el DCS PCS7, permitiendo evaluar el funcionamiento del sistema en lazo cerrado y confirmar que el control aplicado mantuvo las variables dentro de los rangos deseados, aunque se requieren algunos ajustes en el controlador de densidad.

Además, se logró ejemplificar el uso de simulación básica en SIMIT conectada a señales de planta usando un PCS7, al crear una simulación de estanque.

A lo largo del proyecto, se compararon dos enfoques para simular el molino: el uso de memoria compartida (SHM) y el componente desarrollado en SIMIT CTE. Ambos métodos presentan ventajas y limitaciones, siendo la elección entre ellos dependiente del tipo de pruebas a realizar, con la SHM siendo más adecuada para simulaciones de corto plazo y el modelo reducido en SIMIT CTE recomendado para simulaciones más largas.

También se logró desarrollar el componente del molino SAG mediante el uso de SIMIT CTE, lo cual establece una base sólida para futuras mejoras. Dado que esta aplicación es específica, se requiere un análisis más detallado de su implementación con el fin de optimizar su desempeño en futuras simulaciones. En cuanto al comportamiento del molino reducido a 3 granulometrías de 12, los resultados obtenidos en la sección 4.3.2.1 fueron los esperados. La simplificación del modelo resultó en una pérdida de información en el proceso de molienda, ya que, las piedras de mayor tamaño en lugar de pasar por 12 tamaños distintos, ahora solo atraviesan un máximo de 3 antes de ser descargadas. En consecuencia, el cambio en la dinámica de las gráficas y el aumento de la velocidad del molino son resultados esperables al reducir la dimensión del modelo. Es relevante destacar que, a pesar de estos ajustes, el molino continuó estabilizándose en los puntos correspondientes, lo que indica que los parámetros del molino fueron calculados correctamente.

En conclusión, el trabajo realizado demuestra que la simulación dinámica del molino SAG utilizando SIMIT es efectiva para modelar el comportamiento de este equipo dentro de una planta concentradora digital. Se logró validar la simulación aislada del molino, comparando sus resultados con datos experimentales obtenidos de 1 de la planta Chuquicamata, lo que confirma que el modelo es capaz de replicar los procesos que ocurren dentro del molino con un margen de error mínimo. Además, la integración del molino a la planta concentradora digital permitió comprobar su interacción con los sistemas de control existentes, destacándose

la capacidad de la planta para seguir los setpoints asignados y mantener el nivel del estanque dentro de los valores deseados, aunque se identificaron ajustes necesarios en el controlador de la densidad.

5.3. Trabajo futuro

El modelo del molino SAG fue desarrollado con el objetivo de generar la señal de peso del molino, por lo que los cálculos se limitan a las variables involucradas en su estimación. Esto deja espacio para futuras mejoras, como la incorporación de otros aspectos del molino, por ejemplo, la simulación de la posición de carga o la inclusión de variables adicionales, como el reemplazo de bolas.

Dado que este trabajo se centra en el desarrollo del modelo de un molino SAG y en la evaluación de la dinámica de la planta, un posible trabajo futuro podría enfocarse en el diseño del sistema de control para una planta simple, considerando este trabajo como base.

Por otro lado, el manual [16] menciona que la aplicación SyncSiMa es un programa de ejemplo diseñado para demostrar la sincronización entre SIMIT y MATLAB/Simulink, por lo que puede presentar fallas. Es posible que la interrupción de la simulación observada en este trabajo se deba a un problema con dicha aplicación. Por lo tanto, una línea de investigación futura podría centrarse en el estudio de la conexión entre SIMIT y MATLAB/Simulink, con el objetivo de desarrollar mejoras en SyncSiMa que permitan la simulación de modelos más complejos sin restricciones de tiempo, o incluso, generar una nueva solución para el uso de memoria compartida (SHM).

En cuanto al componente desarrollado en SIMIT CTE, se destaca que el código no es eficiente, por lo que existe una línea de estudio para centrar el aprendizaje en el uso de esta extensión y así se permita mejorar la eficiencia del código y lograr un mejor manejo de las ecuaciones diferenciales para así intentar ampliar el modelo de 3×3 a uno de 6×6 . También se podría añadir la señal de razón grueso/fino, lo que permitiría que la planta tenga un comportamiento más dinámico y dependa de esta variable de control, común en las líneas de molienda.

Finalmente, se recomienda obtener datos de la planta real de Quellaveco para parametrizar adecuadamente el molino y evaluar la filosofía de control implementada en la planta. Además, se sugiere expandir dicha filosofía de control, incorporando el controlador del molino SAG utilizando la señal del peso obtenida en este trabajo.

6 | Anexos

6.1. Diagrama de control de alimentación y descarga del molino SAG de la empresa

A continuación se presentan los esquemas que proponen el control de la línea 1 de molienda, considerando el sistema en dos partes: Alimentación y Descarga del molino SAG.

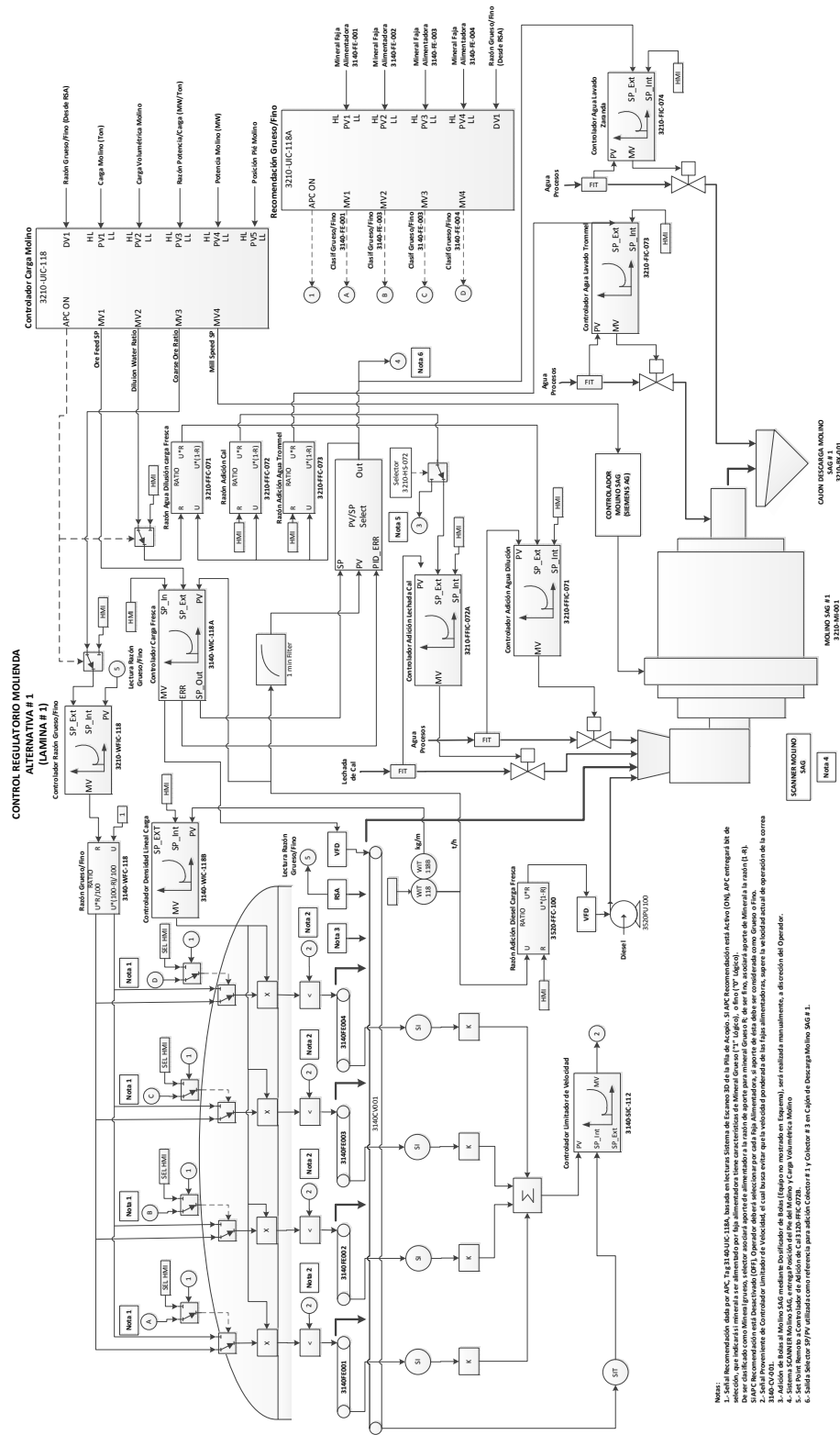


Figura 6.1: Lazos de control de entrada

6.2. Código de programación del Molino SAG en Simulink de 12 granulometrías

Se presenta el código utilizado en Simulink del bloque Matlab Function para el modelo de molino de 12 granulometrías.

```
function [dW_A, Peso, M_P, J, H_m, DW, dw, r, P_ast, P] = fc(GRIND, f, F_A, W_A,
    ↪ w)
% Parmetros del molino SAG de codelco
D = 9.75; % Diametro del molino (m)
L = 5.18; % Longitud del molino (m)
V_m = 359; % Volumen interno del molino (m^3)
k = 10.5523; % Parametro experimental del modelo de potencia
A = 1.1; % Recomendacion de Austin 1990
DivTemp = 3600; %variable para cambiar la unidad de tiempo a graficar
%% Masa mineral en el molino
H_m = sum(w);
H_m = max(H_m, 1); %Establecer un minimo para evitar indefinir ecuaciones

%% Submodelo molienda
%% Modelo de consumo de potencia

% Parmetros recomendados por Austin
eb = 0.4; % porosidad de la carga interna
ps = 2.7; % Densidad del mineral (t/m)
wc = 0.8; % Relacion masa agua/mineral
Jb = 0.08; % Fraccion de bolas en el molino
pb = 7.1; % Densidad de las bolas (t/m)
coef_crit_speed = 0.75; % Fraccion de velocidad critica

% Estimaciones de parmetros
J = (1 / (1 - eb)) * (H_m / (ps * V_m) + 0.6 * Jb); % Porcentaje de llenado del molino
J = max(J, 0.08); % Limite minimo del 8 % del volumen del molino

%% Modelo de Austin 1990
WV = (1 - eb) * (ps / wc) * J + 0.6 * Jb * (pb - (ps / wc)); % Ratio entre masa de
    ↪ carga interna y volumen del molino
M_P = k * D^2.5 * L * (1 - A * J) * (WV) * coef_crit_speed * (1 - (0.1 / (2^(9 - 10 *
    ↪ coef_crit_speed))));

%% Definir la matriz de tasa de molienda especifica
Grinding = (M_P / H_m) .* GRIND;

%% Submodelo Transporte de masa
%% Calculo de delta_s
delta_s = 312.782; % Tasa de descarga del molino

%% Transporte de agua
```

```
alpha_o = 3.77;
lambda_l = 0.71;
cte = (alpha_o + (lambda_l / H_m^4));
P_A = (cte * W_A) / DivTemp; %Descarga de agua en t/seg

%% Salidas submodelo transporte de masa
P_ast = delta_s * sqrt(H_m) / DivTemp; % Flujo descarga de la camara de molienda en t
    ↪ /seg

%% Clculo de p_ast
p_ast = (P_ast / H_m) .* w; % Vector salida camara molienda

%% Submodelo Clasificacion
%% Tasas de rechazo de mineral
ct = [1.00, 1.00, 1.00, 0.90, 0.4, 0.35, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.01, 0.00]; % Tasas de rechazo
    ↪ interno
c = ct';

%% Construccion I-C
ceros = zeros(12);
n = size(ceros);
I = eye(n);
C = diag(c);

%% Salidas submodelo de clasificacin
p = (I - C) * p_ast; % Material descarga molino por granulometria

% Flujo recirculante ajustado para las primeras tres granulometrias
r = zeros(size(p_ast)); % Inicializar flujo recirculante
for i = 1:length(r)
    if i <= 3 % Primeras tres granulometrias
        r(i) = 2 * f(i); % Para las primeras 3 granulometrias, 300% del flujo fresco
    else
        r(i) = c(i) * p_ast(i); % Tasas normales de clasificacin para el resto
    end
end
f_ast = f + r;

P = sum(p)*DivTemp; % Total material descarga molino en t/h
F_ast = sum(f_ast);
R=sum(r)*DivTemp; % Total material recirculante a camara de molienda en t/h
dH_m = F_ast - P_ast; % Balance dinamico del contenido de mineral en molino

%% Balance dinamico agua
dW_A = F_A - P_A; % Integrar

%% Balance dinamico mineral
dw = f + r - p_ast - Grinding * w; % Integrar
```

DW = P + P_A*DivTemp; % Descarga de molino en t/h

%% Peso molino en Ton

Peso = H_m + W_A; % Peso del molino

Listing 6.1: Función del molino SAG en Simulink.

6.3. Código de programación del Molino SAG en Simulink de 3 granulometrías

Se presenta el código utilizado en Simulink del bloque Matlab Function para el modelo de molino de 3 granulometrías. En este código cambian las dimensiones de los vectores y la sección de código que representa el cálculo de r en comparación al código presentado en la sección anterior.

```
function [dW_A, Peso, M_P, J, H_m, DW, dw, r, P_ast, P] = fc(GRIND, f, F_A, W_A,  
    ↪ w)
```

```
% Parmetros del molino SAG de codeico
```

```
D = 9.75; % Diametro del molino (m)
```

```
L = 5.18; % Longitud del molino (m)
```

```
V_m = 359; % Volumen interno del molino (m^3)
```

```
k = 10.5523; % Parametro experimental del modelo de potencia
```

```
A = 1.1; % Recomendacion de Austin 1990
```

```
DivTemp = 3600; %variable para cambiar la unidad de tiempo a graficar
```

```
%% Masa mineral en el molino
```

```
H_m = sum(w);
```

```
H_m = max(H_m, 1); %Establecer un minimo para evitar indefinir ecuaciones
```

```
%% Submodelo molienda
```

```
%% Modelo de consumo de potencia
```

```
% Parmetros recomendados por Austin
```

```
eb = 0.4; % porosidad de la carga interna
```

```
ps = 2.7; % Densidad del mineral (t/m)
```

```
wc = 0.8; % Relacion masa agua/mineral
```

```
Jb = 0.08; % Fraccion de bolas en el molino
```

```
pb = 7.1; % Densidad de las bolas (t/m)
```

```
coef_crit_speed = 0.75; % Fraccion de velocidad critica
```

```
% Estimaciones de parmetros
```

```
J = (1 / (1 - eb)) * (H_m / (ps * V_m) + 0.6 * Jb); % Porcentaje de llenado del molino
```

```
J = max(J, 0.08); % Limite minimo del 8 % del volumen del molino
```

```
%% Modelo de Austin 1990
```

```
WV = (1 - eb) * (ps / wc) * J + 0.6 * Jb * (pb - (ps / wc)); % Ratio entre masa de
```

```
↪ carga interna y volumen del molino
```

```

M_P = k * D^2.5 * L * (1 - A * J) * (WV) * coef_crit_speed * (1 - (0.1 / (2^(9 - 10 *
    ↪ coef_crit_speed))));

%% Definir la matriz de tasa de molienda especifica
Grinding = (M_P / H_m) .* GRIND;

%% Submodelo Transporte de masa
%% Calculo de delta_s
delta_s = 312.782; % Tasa de descarga del molino

%% Transporte de agua
alpha_o = 3.77;
lambda_l = 0.71;
cte = (alpha_o + (lambda_l / H_m^4));
P_A = (cte * W_A) / DivTemp; % Descarga de agua en t/seg

%% Salidas submodelo transporte de masa
P_ast = delta_s * sqrt(H_m) / DivTemp; % Flujo descarga de la camara de molienda en t
    ↪ /seg

%% Clculo de p_ast
p_ast = (P_ast / H_m) .* w; % Vector salida camara molienda

%% Submodelo Clasificacion
%% Tasas de rechazo de mineral
ct = [0.96, 0.297, 0.09]; %tasas de rechazo
c = ct';

%% Construccion I-C
ceros = zeros(3);
n = size(ceros);
I = eye(n);
C = diag(c);

%% Salidas submodelo de clasificacin
p = (I - C) * p_ast; % Material descarga molino por granulometria

% Flujo recirculante ajustado para las primeras tres granulometrias
r = zeros(size(p_ast)); % Inicializar flujo recirculante
for i = 1:length(r)
    if i <= 1 % primera granulometria
        r(i) = 2.29 * f(i); % coeficiente calculado
    else
        r(i) = c(i) * p_ast(i); % tasas normales de clasificacin para el resto
    end
end
end
f_ast = f + r;

```

```
P = sum(p)*DivTemp; % Total material descarga molino en t/h
F_ast = sum(f_ast);
R=sum(r)*DivTemp; % Total material recirculante a camara de molienda en t/h
dH_m = F_ast - P_ast; % Balance dinamico del contenido de mineral en molino

%% Balance dinamico agua
dW_A = F_A - P_A; % Integrar

%% Balance dinamico mineral
dw = f + r - p_ast - Grinding * w; % Integrar
DW = P + P_A*DivTemp; % Descarga de molino en t/h

%% Peso molino en Ton
Peso = H_m + W_A; % Peso del molino
```

Listing 6.2: Función del molino SAG en Simulink.

6.4. Código de Cyclic Calculation del Molino SAG en SIMIT CTE

```
// Declaracion de variables globales
analog H_m, J, WV, cte, P_A, P_ast, INT_agua;
// Declarar las variables globales dw_1 a dw_3 para las derivadas
analog dw_1, dw_2, dw_3;
analog f_ast_1, p_ast_1, g1;
analog f_ast_2, p_ast_2, g2;
analog f_ast_3, p_ast_3, g3;
analog p_ast_local_1, p_ast_local_2, p_ast_local_3;
analog Grinding_1, Grinding_2, Grinding_3;
analog p_1, p_2, p_3;
analog r_local_1, r_local_2, r_local_3;

BLOCK
integer DivTemp = 3600;
// Definicion de vectores y matrices a utilizar
analog weights[3] = {0.8692, 0.1264, 0.0044};

// Matriz GRIND R_inv*K_E*R Dividida en 360 cada valor
analog GRIND[9] = {
    0.0000694722, 0, 0,
    -0.0000316944, 0.0000377778, 0,
    -0.0000377778, -0.0000377778, 0
};

// Matriz de rechazo C linealizada
analog C[9] = {
```

```
    0.96, 0.0, 0.0,
    0.0, 0.297, 0.0,
    0.0, 0.0, 0.09
};

// Matriz de Identidad
analog I[9] = {
    1.0, 0.0, 0.0,
    0.0, 1.0, 0.0,
    0.0, 0.0, 1.0
};

// Declaracion de variables locales
integer i, j;

// Calcular H_m (masa total de mineral en el molino)
H_m = W1+W2+W3;

// Verificar que H_m no sea menor que el lmite
if (H_m < 0.1) {
    H_m = 1; // Lmite inferior para evitar divisiones por cero
}
// Salida de H_m
H_mOut = H_m;

// Modelo de consumo de potencia (M_P)
J = ((1 / (1 - eb)) * (H_m / (ps * V_m) + 0.6 * Jb));
if (J >= 1.0) {
    J = 0.8; // Limite superior razonable para fraccion de llenado
} else if (J < 0.0) {
    J = 0.0; // Evitar valores negativos
}

Jout = J;

// Mill power draw Austin 1990
WV = (1 - eb) * (ps / wc) * J + 0.6 * Jb * (pb - (ps / wc));
M_P = K * _pow(D, 2.5) * L * (1 - A * J) * WV * coef_crit_speed * (1 - (0.1 / _pow
    ↪ (2, (9 - 10 * coef_crit_speed))));

P_ast = (delta_s * _sqrt(H_m)) / DivTemp;

// Calcular GRIND ponderada (M_P/H_m)*GRIND
analog GRIND_weighted[9];
for (i = 0; i < 3; i++) {
    for (j = 0; j < 3; j++) {
        GRIND_weighted[i * 3 + j] = (M_P / H_m) * GRIND[i * 3 + j];
    }
}
```

}

// Granulometria 1

```
Grinding_1 = GRIND_weighted[0] * W1 + GRIND_weighted[1] * W2 +  
    ↪ GRIND_weighted[2] * W3;  
p_ast_local_1 = (P_ast / H_m) * W1;  
p_1 = (I[0] - C[0]) * p_ast_local_1;  
r_local_1 = 2.29 * f * (weights[0] / DivTemp);  
f_ast_1 = (f * weights[0] / DivTemp) + r_local_1;  
dw_1 = f_ast_1 - p_ast_local_1 - Grinding_1;
```

// Granulometria 2

```
Grinding_2 = GRIND_weighted[3] * W1 + GRIND_weighted[4] * W2 +  
    ↪ GRIND_weighted[5] * W3;  
p_ast_local_2 = (P_ast / H_m) * W2;  
p_2 = (I[4] - C[4]) * p_ast_local_2;  
r_local_2 = C[4] * f * (weights[1] / DivTemp);  
f_ast_2 = (f * weights[1] / DivTemp) + r_local_2;  
dw_2 = f_ast_2 - p_ast_local_2 - Grinding_2;
```

// Granulometria 3

```
Grinding_3 = GRIND_weighted[6] * W1 + GRIND_weighted[7] * W2 +  
    ↪ GRIND_weighted[8] * W3;  
p_ast_local_3 = (P_ast / H_m) * W3;  
p_3 = (I[8] - C[8]) * p_ast_local_3;  
r_local_3 = C[8] * p_ast_local_3;  
f_ast_3 = (f * weights[2] / DivTemp) + r_local_3;  
dw_3 = f_ast_3 - p_ast_local_3 - Grinding_3;
```

// Asignar los valores de las derivadas a las variables globales correspondientes

```
dw1 = dw_1;  
dw2 = dw_2;  
dw3 = dw_3;
```

// Transporte de masa y agua

```
cte = (alpha_o + (lambda_1 / _pow(H_m, 4)));  
P_A = (cte * W_A) / DivTemp;
```

// Calcular R (flujo recirculante)

```
R = (r_local_1 + r_local_2 + r_local_3)*DivTemp;
```

// Calcular P

```
P = (p_1 + p_2 + p_3)*DivTemp;
```

// Seal descarga del molino en ton/h (el tiempo de graficar es en segundos)

```
DW = P + (P_A * DivTemp);
```

```
INT_agua = F_A / DivTemp;
```

```
END_BLOCK

$W_A = INT_agua - P_A;
// Correccion de estados para evitar valores negativos
#W_A = { @W_A < 0.0 : 0.0; ELSE @W_A };

// Integracion de la ecuacin diferencial de W_A (dW_A/dt = F_A - cte*W_A)
$W1 = dw_1;
#W1 = { @W1 < 0.0 : 0.0; ELSE @W1 };
$W2 = dw_2;
#W2 = { @W2 < 0.0 : 0.0; ELSE @W2 };
$W3 = dw_3;
#W3 = { @W3 < 0.0 : 0.0; ELSE @W3 };

BLOCK
    dW_A = W_A; // El valor actual de W_A es la tasa de cambio (dW_A/dt)
    dw = 0.0;
    dw = W1 + W2 + W3; // H_m
    // Aqu sumamos DW para obtener el peso final del molino
    Peso = dW_A + dw; // Peso =
END_BLOCK
```

Listing 6.3: Código de simulación del molino SAG en SIMIT CTE.

6.5. Código para graficar datos .csv de PCS7 en MATLAB del molino SAG

```
% Carga datos desde el archivo CSV
filename = '21-2-24h.csv'; % Cambia por el nombre correcto de tu archivo
opts = detectImportOptions(filename, 'Delimiter', ',', 'VariableNamingRule', 'preserve');

% Leer el archivo con encabezados originales
data = readtable(filename, opts);

% Ajusta el formato de las fechas al formato real del archivo
trend1_time = datetime(data{:,1}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
trend1_value = data{:,2};

trend2_time = datetime(data{:,3}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
trend2_value = data{:,4};

trend3_time = datetime(data{:,5}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
trend3_value = data{:,6};

trend4_time = datetime(data{:,7}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
trend4_value = data{:,8};
```

```
trend5_time = datetime(data{:,9}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
trend5_value = data{:,10};

trend6_time = datetime(data{:,11}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
trend6_value = data{:,12};

trend7_time = datetime(data{:,13}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
trend7_value = data{:,14};

curva1_time = datetime(data{:,15}, 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss,SSS');
curva1_value = data{:,16};

% Crear matriz de tiempos y valores
trend_times = [trend1_time, trend2_time, trend3_time, trend4_time, trend5_time,
    ↪ trend6_time, trend7_time, curva1_time];
trend_values = [trend1_value, trend2_value, trend3_value, trend4_value, trend5_value,
    ↪ trend6_value, trend7_value, curva1_value];

labels = {'Setpoint Feeders', 'Agua de Proceso', 'Lechada de Cal', 'Peso', 'Nivel Estanque', '
    ↪ Densidad', 'Bomba 1', 'Bomba 2'};
colors = {'r-', 'g-', 'b-', 'm-', 'c-', 'y-', 'k-', 'b-'};

% Graficar cada tendencia individualmente (excepto las bombas)
for i = 1:6
    figure;
    plot(trend_times(:,i), trend_values(:,i), colors{i}, 'DisplayName', labels{i});
    xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
    title([labels{i}, ' vs Tiempo']);
    grid on;
    legend('Location', 'best');
end

% Graficar las bombas juntas
figure;
plot(trend_times(:,7), trend_values(:,7), colors{7}, 'DisplayName', labels{7}); hold on;
plot(trend_times(:,8), trend_values(:,8), colors{8}, 'DisplayName', labels{8});
xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
title('Bomba 1 y Bomba 2 vs Tiempo');
grid on;
legend('Location', 'best');

%% DEFINIR INTERVALOS DE TIEMPO
start1 = datetime('21/02/2025 04:25:00', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss');
end1 = datetime('21/02/2025 07:45:00', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss');
start2 = datetime('21/02/2025 07:45:00', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss');
end2 = datetime('21/02/2025 14:34:40', 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy HH:mm:ss');
```

```
% Graficar intervalos de variables individuales
for i = 1:6
    mask1 = (trend_times(:,i) >= start1) & (trend_times(:,i) <= end1);
    mask2 = (trend_times(:,i) >= start2) & (trend_times(:,i) <= end2);

    % Intervalo 1
    figure;
    plot(trend_times(mask1,i), trend_values(mask1,i), colors{i}, 'DisplayName', labels{i});
    xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
    title([labels{i}, ' vs Tiempo (Prueba 1)']);
    grid on;
    legend('Location', 'best');

    % Intervalo 2
    figure;
    plot(trend_times(mask2,i), trend_values(mask2,i), colors{i}, 'DisplayName', labels{i});
    xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
    title([labels{i}, ' vs Tiempo (Prueba 2)']);
    grid on;
    legend('Location', 'best');
end

% Graficar intervalos de bombas juntas
mask1_b = (trend_times(:,7) >= start1) & (trend_times(:,7) <= end1);
mask2_b = (trend_times(:,7) >= start2) & (trend_times(:,7) <= end2);

% Intervalo 1 de bombas
figure;
plot(trend_times(mask1_b,7), trend_values(mask1_b,7), colors{7}, 'DisplayName', labels
    ↪ {7}); hold on;
plot(trend_times(mask1_b,8), trend_values(mask1_b,8), colors{8}, 'DisplayName', labels
    ↪ {8});
xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
title('Bomba 1 y Bomba 2 vs Tiempo (Prueba 1)');
grid on;
legend('Location', 'best');

% Intervalo 2 de bombas
figure;
plot(trend_times(mask2_b,7), trend_values(mask2_b,7), colors{7}, 'DisplayName', labels
    ↪ {7}); hold on;
plot(trend_times(mask2_b,8), trend_values(mask2_b,8), colors{8}, 'DisplayName', labels
    ↪ {8});
xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
title('Bomba 1 y Bomba 2 vs Tiempo (Prueba 2)');
grid on;
legend('Location', 'best');
```

```
% Gráfico con todas las señales
figure; hold on;
for i = 1:8
    plot(trend_times(:,i), trend_values(:,i), colors{i}, 'DisplayName', labels{i});
end
xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor'); title('Todas las señales vs Tiempo'); grid on;
legend('Location', 'bestoutside');

% Primera figura: Feeders, Agua de Proceso, Lechada de Cal y Peso
figure;
hold on;
for i = 1:4
    plot(trend_times(:,i), trend_values(:,i), colors{i}, 'DisplayName', labels{i});
end
xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
title('Setpoint Feeders, Agua de Proceso, Lechada de Cal y Peso');
grid on;
legend('Location', 'best');
hold off;

% Segunda figura: Nivel Estanque, Densidad, Bomba 1 y Bomba 2
figure;
hold on;
for i = 5:8
    plot(trend_times(:,i), trend_values(:,i), colors{i}, 'DisplayName', labels{i});
end
xlabel('Tiempo'); ylabel('Valor');
title('Nivel Estanque, Densidad, Bomba 1 y Bomba 2');
grid on;
legend('Location', 'best');
hold off;
```

Listing 6.4: Gráficas señales PCS7 en MATLAB.

Bibliografía

- [1] R. P. Orellana Araya, “Modelo, control y simulador de planta de molienda semiautógena y molienda secundaria,” 2010.
- [2] F. A. Guerrero Monsalves, “Simulación y control de un circuito de molienda,” 2014.
- [3] L. G. Austin, *Diseño y simulación de circuitos de molienda y clasificación*. CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 1994.
- [4] R. Amestica, G. Gonzalez, J. Menacho, and J. Barria, “A mechanistic state equation model for semiautogenous mills,” *International Journal of Mineral Processing*, vol. 44, pp. 349–360, 1996.
- [5] W. M. Tejada Estay, “Análisis dinámico de molino sag,” 2010.
- [6] C. A. Pinto Jiménez, “Simulador en estado estacionario de circuitos de molienda sag, para etapas tempranas de ingeniería,” 2021.
- [7] Siemens, *SIMIT Simulation V11.2 Getting Started*, 2024.
- [8] Siemens, *SIMATIC PCS7 Process Control System*, 2004.
- [9] M. C. da Silva, “Simit-overview,” informe técnico, 2023.
- [10] S. AG, *SIMIT Simulation Platform (V10.0): Operating Manual*, 2018. A5E44876196-AA, June 2018.
- [11] Siemens AG, *SIMATIC SIMIT Simulation Platform (V10.0) Operating Manual*, 2018.
- [12] J. Salazar, L. Magne, G. Acuña, and F. Cubillos, “Dynamic modelling and simulation of semi-autogenous mills,” *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 70–77, 2009.
- [13] L. G. Austin, “A mill power equation for sag mills,” *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 7, pp. 57–63, 1990.
- [14] R. Amestica, G. Gonzalez, J. Barria, L. Magne, J. Menacho, and O. Castro, “A sag mill circuit dynamic simulator based on a simplified mechanistic model,” in *Proceedings of XVIII International Mineral Processing Congress*, vol. 1, pp. 117–129, 1993.
- [15] A. Casali, “Simplificación del modelo de chancado de andersen / whiten.”
- [16] Siemens AG, *Realization of a SIMIT Shared Memory Coupling with MATLAB*. Siemens Industry Online Support, 2018.
- [17] S. AG, “Cte - one component in one hour,” 2022. Entry ID: 109781003, Version 1.1, February 2022.