

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:

Juan Pablo Segovia V.

Informe de Memoria de Título
para optar al título de:

Ingeniero Civil Electrónico

Desarrollo de software para inspección técnica de una
aplicación CPM

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Juan Pablo Segovia V.

Desarrollo de software para inspección técnica de una aplicación CPM

Diego Alonso Jara Cárdenas

Informe de memoria de título
para optar al título de

Ingeniero Civil Electrónico

Diciembre 2017

Resumen

En este documento se presenta el diseño e implementación de un programa de evaluación de comportamiento de lazos de control, como también las bases generales del monitoreo de rendimiento en lazos de control. La metodología del programa y su diseño son presentados y probados con el objetivo de auditar el comportamiento de una futura implementación de una aplicación CPM (Control Performance Monitoring) en la planta concentradora de Codelco Chuquicamata.

El programa resultante realiza una auditoría automatizada mediante índices para evaluar el comportamiento de 6 lazos de control de nivel mediante 8 indicadores, los cuales son conocidos en la literatura como: tiempo de asentamiento, razón de amortiguamiento, desviación estándar, integral del error absoluto, sobrepaso, tiempo de subida, método de Miao y Seborg y análisis espectral, de los cuales se determinarán sus valores para realizar una evaluación de rendimiento a través del índice unitario Jelali y los valores de un lazo de referencia.

La metodología de cálculo, implementación y evaluación del programa diseñado está incluida en este documento, llegando a resultados exitosos y cumpliendo con los objetivos de establecer el comportamiento actual de lazos de control señalados. En términos de rendimiento sobre la curva de error total, son analizados 6 lazos del área de flotación A-1 de planta concentradora. Se cuantifica que 5 de 6 lazos que presentan un rendimiento mayor que el 70%. Por otro lado, en términos de rendimiento sobre la respuesta transiente se observa que 4 de 6 lazos, poseen al menos 1 criterio con evaluación pobre, demostrando que 4/6 de los lazos de control analizados poseen un mal rendimiento transiente.

Finalmente, se observa que una vez obtenida la data, es totalmente factible realizar una evaluación cuantificable sobre el comportamiento dinámico de los lazos de control. El resultado es un software para evaluación automatizada del comportamiento de lazos, aplicable a la inspección técnica de mejoras sobre el sistema de control. En resumen, el software equivale a una herramienta útil, fácil de utilizar y de resultados cuantificables para la emisión de reportes y evaluación técnica de un sistema CPM, aportando y ayudando en sus tareas a un inspector técnico de obra.

Se propone el trabajo futuro como una evaluación post implementación, para comparar y evaluar la mejora luego de la futura implementación de un software CPM en la planta concentradora.



A los lectores del presente y futuro.

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a mi madre Argelia, a mi padre Juan Carlos y a mi hermano Alexander por darme siempre su apoyo y buenas energías para llevar una buena vida, sé que siempre puedo contar con ustedes en los buenos y malos momentos, y siempre les estaré agradecido por la formación, principios y recuerdos que me han hecho como soy actualmente.

Agradezco también a mi pareja Josefa, con quien he compartido felizmente estos últimos 3 años, quien me ha dado siempre buenos momentos emocionales, mucho amor y apoyo para llevar a cabo mis ideas y planes para el futuro. Gracias amor.

Agradezco a mi profesor guía Juan Pablo Segovia quien nos ha brindado su tiempo, conocimientos y dedicación en sus enseñanzas para el aprendizaje de los alumnos de la Universidad de Concepción en el área de control automático. Además de haber realizado siempre a tiempo y con dedicación todas las correcciones y sugerencias para este trabajo.

También agradezco a la empresa Codelco Chuquicamata, a mis tutores Carlos Ruiz y Mario Berna, y al equipo de electrónicos de la Superintendencia de Automatización y Electrónica (SAE) del área concentradora, quienes me dieron la oportunidad de realizar esta memoria y formar parte de su equipo en un ambiente grato.

Tabla de contenidos

LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
NOMENCLATURA.....	X
ABREVIACIONES.....	XII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	2
1.2.1. Método de adquisición de datos	2
1.2.2. Auto-sintonización e implementación.....	3
1.2.3. Monitoreo de fallas y análisis de rendimiento de lazos de control.....	4
1.2.4. Discusión	8
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO	9
1.4. OBJETIVOS	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos específicos	10
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	11
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA	11
CAPÍTULO 2. PRINCIPIOS DEL MONITOREO DE RENDIMIENTO DE LAZOS DE CONTROL.....	14
2.1. INTRODUCCIÓN	14
2.2. CAUSAS RAÍZ DE OSCILACIONES Y PROBLEMAS EN LAZOS DE CONTROL.....	15
2.3. PROCEDIMIENTO GENÉRICO PARA MONITOREO DE RENDIMIENTO DE CONTROL	17
2.4. MEDICIÓN DE RENDIMIENTO	19
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE AUDITORÍA DEL SOFTWARE CPM.....	21
3.1. INTRODUCCIÓN	21
3.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE RENDIMIENTO EN LAZOS DE CONTROL	21
3.2.1. Criterios generales sobre respuesta ante cambios de Set-Point.....	23
3.2.2. Desviación estándar	24
3.2.3. Integral del error absoluto (IAE).....	25
3.2.4. Promedio del error absoluto (AAE).....	27
3.2.5. Miao y Seborg.....	28
3.2.6. Detección de peak's en la distribución espectral de potencia	31
3.3. REFERENCIAS DE EVALUACIÓN	32
CAPÍTULO 4. DISEÑO DEL PROGRAMA DE AUDITORÍA	37
4.1. INTRODUCCIÓN	37
4.2. DISEÑO DEL PROGRAMA.....	37
4.3. DISEÑO DE INTERFAZ GRÁFICA (HMI)	42
4.3.1. Referencia y lectura.....	43
4.3.2. Índices obtenidos	43
4.3.3. Tendencias.....	45
4.3.4. Comparación y Evaluación	46
CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE AUDITORÍA EN SIMULACIÓN (FAT)	48
5.1. INTRODUCCIÓN	48
5.2. IMPLEMENTACIÓN SOBRE DATOS DE SIMULACIÓN	48
5.2.1. Resultados de índices.....	48
5.2.2. Evaluación en simulación.....	52
CAPÍTULO 6. IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE AUDITORÍA EN PLANTA.....	55

6.1.	INTRODUCCIÓN	55
6.2.	PROCESO DE FLOTACIÓN DEL COBRE.....	55
6.3.	IMPLEMENTACIÓN DE AUDITORÍA SOBRE LAZOS DE CONTROL DE NIVEL DE PULPA EN PLANTA DE FLOTACIÓN	56
CAPÍTULO 7. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS SOBRE COMPORTAMIENTO DE LAZOS...66		
7.1.	LAZO DE NIVEL DE PULPA 1.....	66
7.2.	LAZO DE NIVEL DE PULPA 2.....	69
7.3.	LAZO DE NIVEL DE PULPA 3.....	71
7.4.	LAZO DE NIVEL DE PULPA 4.....	74
7.5.	LAZO DE NIVEL DE PULPA 5.....	75
7.6.	LAZO DE NIVEL DE PULPA 6.....	77
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES		81
8.1.	SUMARIO	81
8.2.	CONCLUSIONES.....	82
8.3.	TRABAJO FUTURO.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....		84
ANEXO A.	CÓDIGO MATLAB DE PROGRAMA DE AUDITORÍA	86
ANEXO B.	FORMATO DE REPORTE DE COMPORTAMIENTO DE LAZO DE CONTROL	101



Lista de tablas

TABLA 2.1 Productos CPM industriales disponibles en el mercado.	15
TABLA 3.1 Índices basados en curva de respuesta ante cambios de SP.	22
TABLA 3.2 Índices basados en curva de respuesta total.	22
TABLA 3.3 Evaluación en criterios generales sobre índice unitario η	33
TABLA 3.4 Evaluación de desviación estándar sobre índice unitario η	34
TABLA 3.5 Evaluación en AAE sobre índice unitario η	34
TABLA 5.1 Comparación de índices de rendimiento entre simulación y referencia.	53
TABLA 6.1 Índices de referencia establecidos por lazo en mejores condiciones.	59
TABLA 6.2 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 1.	60
TABLA 6.3 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 2.	61
TABLA 6.4 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 3.	62
TABLA 6.5 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 4.	63
TABLA 6.6 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 5.	64
TABLA 6.7 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 6.	65



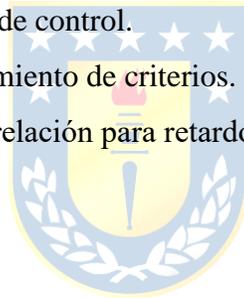
Lista de figuras

Fig. 2.1 Efecto del rendimiento de control pobre en la industria.	17
Fig. 2.2 Diagrama general de evaluación y acción sobre comportamiento de lazos de control.....	17
Fig. 3.1 Metodología de auditoría de sistema CPM.	21
Fig. 3.2 Caso ejemplo de Integral de Error Absoluto (IAE).	26
Fig. 3.3 Curvas de error y auto-correlación para cálculo de índice de disminución.	30
Fig. 4.1 Diseño general de programa de auditoría.	38
Fig. 4.2 Diseño de estructura interna de programa de auditoría.	40
Fig. 4.3 Diseño de interfaz gráfica de programa de auditoría.	42
Fig. 4.4 Sección referencia y lectura de interfaz gráfica.	43
Fig. 4.5 Sección de índices obtenidos en interfaz gráfica.	44
Fig. 4.6 Sección de tendencias en interfaz gráfica.	46
Fig. 4.7 Ejemplo de sección de comparación y evaluación en interfaz.	47
Fig. 4.8 Descripción de evaluaciones en programa.....	47
Fig. 5.1 Curvas de respuesta y error para simulación de lazo de flujo desintonizado.	49
Fig. 5.2 Curvas de respuesta y error ante cambio de SP en simulación de lazo.	49
Fig. 5.3 Ejemplo de determinación de IAE sobre curvas en simulación.	50
Fig. 5.4 Curvas de error y auto-correlación en simulación de lazo de flujo desintonizado.	51
Fig. 5.5 Espectro de frecuencias de señal de error en simulación.....	52
Fig. 5.6 Programa de auditoría operando sobre datos de simulación.....	54
Fig. 6.1 Diagrama líneas de flotación 1 y 2.	56
Fig. 6.2 Diagrama P&ID de una línea de flotación.....	57
Fig. 6.3 Diagrama P&ID de una celda de flotación.	58
Fig. 6.4 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 1.....	60
Fig. 6.5 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 2.....	61
Fig. 6.6 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 3.....	62
Fig. 6.7 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 4.....	63
Fig. 6.8 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 5.....	64
Fig. 6.9 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 6.....	65
Fig. 7.1 Resumen de evaluación lazo de nivel 1.	68
Fig. 7.2 Resumen de evaluación lazo de nivel 2.	71
Fig. 7.3 Resumen de evaluación lazo de nivel 3.	74
Fig. 7.4 Resumen de evaluación lazo de nivel 4.	74
Fig. 7.5 Resumen de evaluación lazo de nivel 5.	77
Fig. 7.6 Resumen de evaluación lazo de nivel 6.	80

Nomenclatura

J_{act}	: Valor actual de índice de rendimiento
J_{des}	: Valor de referencia de índice de rendimiento.
T_d	: Tiempo derivativo de controlador PID.
T_i	: Tiempo integrativo de controlador PID.
T_s	: Tiempo de subida de respuesta de control.
$T_{s_{opt}}$: Valor de tiempo de subida de referencia.
T_{set}	: Tiempo de asentamiento de respuesta de control.
$T_{set_{opt}}$: Valor de tiempo de asentamiento de referencia.
d_{opt}	: Valor de razón de amortiguamiento de referencia.
k_c	: Ganancia proporcional de controlador PID.
t_{total}	: Tiempo total en la ventana analizada.
\bar{y}	: Valor medio de señal 'y'.
α_{opt}	: Valor de sobrepaso de referencia.
$\eta_{\mathcal{R}}$: Índice de rendimiento unitario para índice de disminución de Miao y Seborg.
η_d	: Índice de rendimiento unitario para razón de amortiguamiento.
η_s	: Índice de rendimiento unitario para tiempo de subida.
η_{set}	: Índice de rendimiento unitario para tiempo de asentamiento.
η_{α}	: Índice de rendimiento unitario para sobrepaso.
η_{σ}	: Índice de rendimiento unitario para desviación estándar
σ_{opt}	: Valor de desviación estándar de referencia.
σ_y	: Desviación estándar de 'y'.
\mathcal{R}	: Índice de disminución de Miao y Seborg.
AAE_N	: Promedio muestral de error absoluto sobre señal de error.
AAE_t	: Promedio temporal de error absoluto sobre señal de error.
IAE	: Valor de integral de error absoluto sobre curva de error total.
J	: Índice de rendimiento general.
M	: Orden de filtro media móvil.
N	: Cantidad total de muestras.

$PV_{filt}(k)$: Variable de proceso filtrada.
$PV(k)$: Valor de variable de proceso en el instante discreto 'k'.
$PV(t)$: Valor de variable de proceso en el instante de tiempo t.
$SP(t)$: Valor de Setpoint en el instante de tiempo t.
a	: Distancia 'a' en método de Miao y Seborg.
b	: Distancia 'b' en método de Miao y Seborg.
d	: Razón entre dos primeros sobrepasos en respuesta de control (Razón de amortiguamiento).
$e(t)$: Error en el instante de tiempo 't'.
k	: Instante de tiempo discreto.
t	: Tiempo.
v	: Varianza.
$y(k)$: Elemento en posición 'k' de función 'y'.
α	: Sobrepaso en respuesta de control.
η	: Índice unitario de rendimiento de criterios.
$\rho(k)$: Coeficiente de auto-correlación para retardo 'k'.



Abreviaciones

CPM	: Monitoreo de rendimiento de control (Control Performance Monitoring).
DC	: Corriente continua (Direct Current).
DCS	: Sistema de control distribuido (Distributed Control System).
FAT	: Prueba de aceptación de fábrica (Factory Acceptance Test).
IMC	: Control de modelamiento interno (Internal Model control).
KPI	: Indicador clave de rendimiento (Key Performance Index).
MIMO	: Múltiples entradas y múltiples salidas (Multiple Inputs and Multiple Outputs).
NGI	: Coeficiente de no-gaussianidad (Non Gaussianity Index).
NLI	: Coeficiente de no-linealidad (Non Lineality Index).
OLE	: Protocolo de incrustación y enlazado de objetos (Object Linking and Embedding).
OPC	: OLE para control de procesos (OLE for Process Control).
PC	: Computador personal (Personal Computer).
PID	: Controlador proporcional integral derivativo (Proportional Integral Derivative).
PLC	: Controlador lógico programable (Programmable Logic Controller).
PV	: Valor actual del proceso (Process Value).
SISO	: Una entrada y una salida (Single Input and Single Output).
SP	: Set point de control.



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción general

El continuo progreso y evolución de la industria minera ha incrementado la necesidad de automatización de plantas en todo el mundo. Cada vez se requieren de sistemas de control automáticos más robustos, rápidos y precisos que puedan cumplir con las necesidades de producción de la industria minera [7]. Estos sistemas de control implementados en la industria actual a través de PLC's y DCS están basados en distintos algoritmos de control, los que se han probado en distintos escenarios y observado sus ventajas y desventajas, uno de los algoritmos más usados es el PID (Proportional Integrative Derivative).

A gran escala, plantas con alta integración tecnológica, como refinerías, plantas de energía y mineras, incluyen cientos o a veces miles de lazos de control. Un lazo de control mal sintonizado o con fallas puede resultar en la detención de la producción, disminución de la calidad del producto o mayor consumo de material o energía, disminuyendo la rentabilidad de la planta [9]. Es por esto, que los lazos de control han sido cada vez más reconocidos como un capital importante que debe ser monitoreado y mantenido continuamente. Tanto el rendimiento de los controladores, como otros componentes de los lazos, pueden ser monitoreados y mejorados continuamente a través de software industrial de monitoreo y auto-sintonización de lazos, llamados software's CPM (Control Performance Monitoring), asegurando el alto rendimiento de una planta industrial.

Con este enfoque, se procederá a evaluar un conjunto de índices de medición del comportamiento de lazos, para así a futuro poder calcular la mejora de comportamiento lograda por un software de monitoreo de oscilaciones, fallas y auto-sintonización de lazos de control en plantas industriales (CPM). En este informe se presenta el caso específico de la planta concentradora de Codelco Chuquicamata, en donde hay presente una gran cantidad de lazos de control.

La evaluación de comportamiento actual de los lazos se realizará mediante un programa de auditoría, el cual será diseñado, implementado y utilizado para la evaluación a través de índices de rendimiento propuestos en la literatura.

1.2. Revisión bibliográfica

La siguiente revisión bibliográfica está basada en el estudio y comprensión de sistemas para el monitoreo de lazos de control, denominados como CPM, dentro de los ámbitos de adquisición de datos, análisis de rendimiento de lazos de control y en los distintos métodos de auto-sintonización que podría utilizar el software CPM a implementar en la planta concentradora de Codelco Chuquicamata.

Por otro lado, en esta revisión se analizará la literatura que abarca los tópicos para la evaluación de rendimiento de lazos de control. De esta forma se implementarán índices de rendimiento en el diseño de un programa de auditoría, y posteriormente realizar una evaluación actual del comportamiento de lazos, para una futura medición de mejora de rendimiento y contrastación de posterior puesta en marcha de un sistema CPM.

1.2.1. Método de adquisición de datos

- ❖ W. Silva and R. Fernandes. “Análise de Sistema de Aquisição de dados para controle de procesos,” Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2016, [1].

Este trabajo tiene por objetivo analizar diferentes plataformas de adquisición de datos para utilización en las disciplinas del control de procesos por computadora. En este trabajo se comparan cuatro plataformas de adquisición de datos para diferentes procesos de control, para un caso particular que es el sistema de control para un motor DC. Este documento permite diferenciar distintos software de auto-sintonización y control de fallas, tanto para laboratorio como para ambiente industrial, describiendo características, ventajas y desventajas de los software's CPM.

- ❖ I. Herrera, G. Gómez, J. Rodríguez, E. Lugo and J. Pacheco. “Aplicación para el Monitoreo y Control de Procesos Industriales Basada en el Estándar de Comunicaciones OPC,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 15, no 3, pp. 7-18, 2008, [2].

En este trabajo se desarrolló una aplicación de software tipo cliente capaz de realizar actividades de monitoreo y control de procesos industriales empleando el protocolo de comunicación “OLE para control de procesos”, OPC. Se utilizó el lenguaje C# y la metodología Extreme Programming (XP). El software permite al usuario interactuar con datos que pueden

provenir de un proceso real o de una simulación, a través de algoritmos de control personalizados realizados en un lenguaje de fácil manejo (VBScript y JavaScript), y adicionalmente genera un registro histórico de variables OPC que puede ser recuperado en cualquier momento. Al fundamentarse en el estándar OPC, es posible agregar dispositivos de diferentes fabricantes a medida que estos son adquiridos e incorporados al proceso. Este trabajo es de utilidad para la obtención de una base en la que se fundamenta un software de monitoreo y control de procesos, tanto en su interfaz, protocolos de comunicación y objetivos.

1.2.2. Auto-sintonización e implementación

- ❖ V. Bobál, J. Bohm, J.Fessl and J. Macháček, *Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Applications*. Germany: Springer Science & Business Media, Mar. 2006, [3].

Este libro acerca de controladores auto-sintonizantes presenta los problemas de distintos tipos de sistemas de control adaptativos, en donde se explican método de modelamiento de procesos e identificación para uso de controladores auto-sintonizantes. Dentro de la información relacionada con controladores auto-sintonizantes se analiza el apartado de controladores PID auto-sintonizantes, y de ésta forma, analizar y fundamentar el método usado por el software CPM. Dentro de los algoritmos de auto-sintonización, se proponen distintos algoritmos para los controladores PID, que pueden ser programados e incorporados para simulación e implementaciones en tiempo real. En conjunto con el análisis teórico y matemático de los algoritmos, es posible analizar el comportamiento dinámico de estos controladores en simulación

- ❖ O'Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. London: Imperial College Press, 2009, [4].

Este libro presenta los más grandes métodos de sintonización de controladores PID y sus derivados, brindando una notación unificada y un resumen de cada uno de estos métodos. El libro explora los rangos de las distintas estructuras de controladores PI y PID propuestas en la literatura. Se estudian las distintas estructuras que puede tener un controlador PID dependiendo de los diferentes fabricantes, lo que equivale a que algunas reglas de sintonización pueden funcionar bien en una estructura determinada y en otras, trabajar pobremente, además se detallan los modelos de procesos usados para definir las reglas de sintonización de controladores. Finalmente se detalla el

cálculo analítico de la ganancia y margen de fase de un largo set de controladores PI y PID, determinando sus distintas reglas, cuando un proceso es modelado con retardo u otras variaciones.

Este libro brinda información esencial para la identificación y cálculo analítico de las reglas de sintonización utilizadas en los software CPM actuales, siendo de utilidad en el trabajo futuro de este informe.

- ❖ K. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. USA: Instrument Society of America, 1994, [5].

Este libro está orientado a contribuir a una mejor comprensión del control PID. Una de las razones que motivan a la elaboración de este libro es que la información sobre control PID está dispersa en la literatura del control. Este libro incluye contenidos sobre el modelamiento de procesos, nuevos métodos de sintonización (métodos a través de espectros, respuesta a escalón, entre otros) y evaluación de rendimiento de lazos. Además, este libro posee información sobre técnicas adaptativas, métodos basados en la modelación, y productos comerciales de diagnóstico y sintonización como lo es el software de Expertune.

Este libro complementa el ámbito de análisis de productos comerciales y de las técnicas en las cuales se basan estos software. La principal utilidad recae en el análisis de estos productos comerciales para la justificación de una implementación futura de estos sistemas.

1.2.3. Monitoreo de fallas y análisis de rendimiento de lazos de control

- ❖ M. Jelali. “Control System Performance Monitoring: Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance in Industrial Automation”, Doctor’s thesis, University Duisburg-Essen, Duisburg, Germany, 2010, [6].

Esta tesis de doctorado posee material clave para el estudio de sistemas de monitoreo de rendimiento de control (CPM) como lo es el software PlantTriage. Esta tesis está motivada en acelerar el diseño de éstos sistemas, compartiendo la estructura para el monitoreo de rendimiento de sistemas de control, diagnóstico y optimización. El objetivo de este documento es contribuir a cambiar las prácticas de mantenimiento de los sistemas de control en los procesos industriales cambiando las prácticas de mantención programadas o reactivas a la anticipación, centrándose alrededor de la continua evaluación y predicción del rendimiento y degradación de los sistemas de control.

A partir de este documento se obtiene información acerca de los algoritmos y fundamentos matemáticos que realiza un software de monitoreo de rendimiento de lazos de control (CPM) para detectar oscilaciones, causas raíces, detección de no linealidades de lazo, diagnóstico de problemas de actuador y un completo diagnóstico de oscilación basado en el modelamiento de Hammerstein. Por otro lado, esta tesis describe los distintos software industriales con tecnología CPM y sus distintas aplicaciones en los tipos de plantas de producción industrial.

- ❖ M. Jelali and B. Huang, *Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops*. Germany: Springer Science & Business Media, Mar. 2009, [7].

En este libro, el cual posee el mismo autor que la tesis de doctorado anterior, se plantea que las causas del mal rendimiento de los sistemas de control no está limitada al diseño del controlador o a la sintonización, otros elementos del sistema de control, como sensores y actuadores, son comúnmente responsables por el mal rendimiento. Se reconoce que el rendimiento del 42% en el promedio de plantas industriales, según un reciente estudio de Paulonis y Cox, entran en las categorías de “justo” o “pobre”.

Se muestra como una de las principales fallas mecánicas en sistemas de control que involucran lazos de flujos es provocada por la fricción estática antes de ejecutar el cambio de posición para la válvula. Esta falla se puede detectar automáticamente a través de la modelación de este fenómeno. El documento plantea los modelos de Choudhury y Kano para el fenómeno de fricción estática en válvula, en los cuales se basan en los parámetros de sintonización S y J para detección de fricción, los cuales consiste en una banda de pegado y una banda de resbalamiento. Estos algoritmos analizan los casos en que una válvula está entre el rango de apertura de 0% a 100% (no está saturada).

Por otro lado, en este libro se abarcan los mismos temas sobre sistemas CPM, y los principales indicadores para medir rendimiento en lazos de control, por lo que al igual que el documento anterior, será una fuente de material clave para la elaboración de la metodología de la auditoria diseñada en este informe.

- ❖ T. Miao and E. Seborg. “Automatic Detection of Excessively Oscillatory Feedback Control Loops”, International Conference on Control Applications, USA, Aug 22-27, 1999, [8].

En este artículo, se propone un nuevo método de monitoreo de rendimiento, basado en los datos normales de operación, como lo son el setpoint y la variable del proceso. El procedimiento está basado en el análisis de la función de auto-correlación del error o la variable controlada. El diseño de este método fue realizado durante los años 1993 a 1995 y patentado el año 1998. Si bien, para la utilización de este método de detección de oscilaciones se requiere una estimulación en la entrada (SP), las necesidades para realizar el análisis solo requieren de datos de operación que estén disponibles.

La implementación de este método sobre datos de simulación y datos de planta en este trabajo, demuestra el buen funcionamiento de la detección de oscilaciones a través de un método basado en la curva de auto-correlación, siendo uno de los criterios principales a considerar para la evaluación de rendimiento del lazo de control. Es recomendado usar este método en futuros programas CPM en caso de trabajos futuros.

- ❖ N. Vatanskia, S-L. Jämsä-Jounelaa, A. Rantalac and T. Harjub. “Control Loop Performance Measures In The Evaluation of Process Economics”, Laboratory of Process Control and Automation Kemistintie 102150 Espoo, Finland, 2005, [9].

En este trabajo se presenta una discusión acerca del análisis de los aspectos económicos según el rendimiento de los lazos de control en una planta de producción industrial. El trabajo menciona como se pueden obtener beneficios económicos realizando una mejor gestión de mantención en los lazos de control de una planta industrial. Se propone una estrategia para evaluar la importancia económica que se deriva a partir del rendimiento de los lazos de control operativos, usando medidas de rendimiento de los lazos. Además se menciona un caso de estudio sobre un proceso industrial, en donde se llega a la conclusión de que los mayores beneficios aportados por el uso de éstos métodos de análisis son obtenidos cuando el número de lazos de control es alto (mayor que 200).

Esta información es importante al analizar la importancia económica de la implementación de estos sistemas sobre la planta, mejorando el rendimiento de una gran cantidad de lazos de control, cuantificando los efectos, si es posible, de la implementación de un sistema CPM.

- ❖ J. Stoustrup, M. Grimble and H. Niemann. “Design of Integrated Systems for the Control and Detection of Actuator/Sensor Faults,” *Sensor Review*, pp. 138-149, 1997, [10].

Esta publicación, al considerar que los sistemas de control operan bajo potenciales condiciones de falla, discute el problema de diseño de una unidad funcional que no solo toma las acciones de control requeridas, sino que también identifica fallas en los actuadores y sensores. El trabajo presenta una completa caracterización para éstos casos y entrega un procedimiento de diseño sistemático para unidades de diagnóstico. Se muestra cómo un sistema para la realización de control y diagnóstico puede ser diseñado, el cual es capaz de seguir referencias y reconocer perturbaciones de manera robusta, reduciendo el número de falsas alarmas e identificando cuales fallas han ocurrido. En este documento se puede encontrar el desarrollo matemático de los fundamentos de un filtro detector de errores en actuadores y sensores, aportando con la descripción y definición de las funciones de un software CPM.

- ❖ N.F. Thornhill, B. Huangb and H. Zhangc. “Detection of multiple oscillations in control loops,” *Journal of Process Control*, vol. 13, pp 91–100, 2003, [11].

Este artículo introduce a la detección de oscilaciones en mediciones de procesos industriales, incluyendo el caso cuando dos o más oscilaciones a distinta frecuencia están presentes simultáneamente. La presencia de oscilaciones en los distintos rangos de frecuencia es determinada usando un método basado en la regularidad de cruce por cero de funciones de auto-covarianza filtradas. Este artículo presenta situaciones prácticas con datos de tipo industrial, cuantificando la irregularidad de un lazo de control en donde se puede realizar una acción de corrección. Este método de cuantificación es interesante desde el punto de vista del análisis que realiza un software de monitoreo de lazos de control, como lo es el software Expertune PlantTriage, el cual analiza las variables medidas.

Un punto a destacar de este artículo es que se observan resultados positivos del método de detección de oscilaciones basado en el cruce por cero de la auto-covarianza (ACF), además de complementar la teoría matemática de estos tipos de detectores en los que se profundiza con otros documentos. Aunque en la auditoría no se utilizará el método de detección de cruces por cero de la auto-covarianza, es un punto interesante a estudiar para un trabajo futuro relacionado.

- ❖ M. Choudhury, L.Shah and N. Thornhill, “Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics,” *Automatica*, vol. 40, pp 1719-1728, 2004, [12].

Este trabajo presenta análisis estadísticos de alto orden para monitorear los datos de un lazo

cerrado de control, con el objetivo de identificar las causas de un rendimiento pobre de un lazo cerrado. Las principales contribuciones de este trabajo están en la utilización de herramientas HOS (Higher-order Statistical) como “cumulants”, bi-espectro y bi-coherencia para diseñar dos nuevos índices: el índice no-gaussianidad (NGI) y el índice de no-linealidad (NLI) para detectar y cuantificar la no-gaussianidad y la no-linealidad que hay presente en sistemas regulados y para identificar la fuente de la no-linealidad. Los nuevos índices, junto a la elaboración de algunos gráficos, son útiles para el diagnóstico de las causas de un mal rendimiento de los lazos de control. En este trabajo se proponen algunas aplicaciones exitosas usando el método propuestos, las cuales han sido demostradas y simulada en data histórica industrial.

Este estudio muestra claramente que los métodos basados en estadísticas de alto orden (HOS) son prometedores para el monitoreo de lazos de control cerrados, por lo que es considerada esta referencia para la recomendación del trabajo futuro, implementando más índices.

- ❖ R. Burch, “Monitoring and Optimizing PID Loop Performance,” in ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society Expo, Houston, 2004, [13].

Este paper plantea los beneficios derivados específicamente de algunos de los esfuerzos en la tarea de mantención como lo son: el monitoreo y optimización de rendimiento de los lazos de control PID. Comenzando con una discusión sobre la investigación en control regulatorio, este artículo define los desafíos y oportunidades relacionadas a la mantención de lazos, como a las medidas requeridas para una correcta optimización. Se plantea una estrategia para integrar la mantención de los lazos PID a largo plazo y un software de rendimiento que incluye identificación por modelación de procesos, además de una simulación de lazo y prueba de optimización de sintonización para cumplir con los objetivos de control.

Este trabajo proporciona información de importancia para explicar las consecuencias y beneficios del monitoreo de rendimiento en los lazos de control sobre las tareas de mantención y sintonización.

1.2.4. Discusión

La revisión realizada muestra que la implementación de un sistema auto-sintonizante y de monitoreo es una medida efectiva para cambiar progresivamente las prácticas de mantención programadas y reactivas en los procesos industriales, a prácticas anticipatorias, centradas en la

continua evaluación y predicción del desgaste de los sistemas de control en plantas, como se analizó en los documentos [12] y [13], a través de los distintos métodos de medición de rendimiento sobre plantas reales. La comparación de costo-beneficio puede ser realizada a través de la implementación del programa de auditoría en el tiempo y a través de la comparación con los costos del servicio mencionados en una propuesta formal para mejora de rendimiento. A partir de estimaciones según documentos Expertune, se logra una recuperación del 100% de retorno de la inversión en 6 meses.

En este trabajo se tendrá en cuenta modelos de auto-sintonización PID propuestos por los documentos [3], [4] y [5] de los cuales se extrae información sobre algoritmos auto-sintonizantes de controladores PID y comprensión de controladores PID comerciales. Estos algoritmos están basados en métodos de identificación de modelos del sistema, como identificación de parámetros a través de la respuesta a escalón en lazo cerrado.

Jelali, autor de libros y artículos enfocados en el monitoreo de rendimiento de lazos de control [6], [7], presenta la necesidad y los fundamentos de un software CPM industrial y el aumento de confiabilidad, robustez y garantías que conlleva su implementación.

La literatura muestra que un sistema auto-sintonizante con obtención y modificación de datos mediante el servidor OPC resulta en un sistema no-invasivo sobre la intervención y operación de los lazos de control en funcionamiento, [1] y [2].

Finalmente, los documentos analizados en la revisión bibliográfica demuestran una gran cantidad de fundamentos para la elaboración de algoritmos de monitoreo y medición de rendimiento en lazos de control, los principales son los documentos [6] y [7]. Estos algoritmos son usados ampliamente para la elaboración de un programa de evaluación de comportamiento y evaluación de rendimiento de lazos de control, antes de una puesta en marcha de un sistema CPM en Codelco. En este informe se presenta la evaluación, diseño e implementación del programa de evaluación de comportamiento de lazos de control, pre puesta en marcha de un software de monitoreo y auto-sintonización para en el futuro evaluar su viabilidad de la implementación.

1.3. Hipótesis de trabajo

- El programa de auditoría a diseñar se implementa, realizando tareas de análisis, cálculo de índices y evaluación, para así establecer las condiciones actuales de comportamiento de lazos de control de la planta concentradora, estableciendo una base para la futura evaluación de mejora de comportamiento de lazos. Con esta implementación, será posible comprobar la mejora

producida luego de la implementación de algún software de monitoreo y auto-sintonización de lazos, demostrando la suficiencia del software a implementar para las tareas de identificación de fallas y sintonización a tiempo de los lazos de control en la planta.

- El programa de auditoría a diseñar calcula, analiza e indica el comportamiento de los lazos de control de la planta, a través de datos básicos de operación, como lo son el PV y el SP, leídos a través de un archivo Excel. El programa identifica que hay mejoras a realizar sobre los lazos de control analizados.
- La futura implementación del software CPM posee los beneficios de cambiar progresivamente las prácticas de mantenciones programadas y reactivas en los procesos industriales, a prácticas anticipatorias, centradas en la continua evaluación y predicción del desgaste de los sistemas de control de la planta Concentradora de Codelco Chuquicamata. Esto se logra identificando fallas en actuadores, sensores, oscilaciones y sintonizando lazos de control

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar, implementar y auditar las mejoras en el comportamiento de lazos tras la implementación de un software de monitoreo, análisis de rendimiento y auto-sintonización de lazos de control en la planta concentradora de Codelco Chuquicamata.

1.4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos a realizar se listan a continuación.

- Diseñar un programa que permita auditar el comportamiento de un software CPM y suficiencia en procesos de sintonización y mejora de rendimientos de lazos de control.
- Implementar el programa diseñado sobre datos de simulación (FAT) y sobre datos reales de lazos de control críticos en la planta concentradora de Codelco Chuquicamata.
- Evaluar y resumir condiciones actuales de los lazos de control analizados, para a futuro medir la mejora en el rendimiento de la planta concentradora posterior a la implementación del software industrial, a través del programa de auditoría diseñado.

1.5. Alcances y limitaciones

El análisis y desarrollo de los distintos ámbitos que abarca el sistema a diseñar, serán relacionados y documentados con la teoría establecida en la revisión bibliográfica de este informe.

Como se trabajará en un entorno industrial, datos e información privada de las empresas no podrán ser publicados, por lo que se incluirán datos e información general de Codelco Chuquicamata.

El software de auditoría y análisis de mejora se diseñará en base a la plataforma Matlab, implementando una interfaz gráfica a través del conjunto de herramientas Guide de Matlab, leyendo datos históricos de operación de lazos en un archivo Excel de extensión .xls o .xlsx, los cuales serán obtenidos a través del software PI (Plant Information) que dispone la planta.

1.6. Temario y metodología

El temario de este trabajo se resume a continuación:

- Capítulo 1: Introducción.

En este capítulo se da a entender una introducción general al tema, mencionando el objetivo general y específicos de este trabajo, como los alcances y limitaciones. Se define una hipótesis de trabajo y se realiza una revisión bibliográfica de los contenidos a abarcar.

- Capítulo 2: Principios del monitoreo de lazos de control.

Se explica y define el método general en el que se basa la evaluación y el monitoreo de lazos de control.

- Capítulo 3: Desarrollo de metodología de auditoría del software.

En este capítulo se desarrolla la metodología con la que se diseñará el programa de auditoría, describiendo la forma en que se adquirirán los datos y se determinarán los índices de rendimiento a evaluar.

- Capítulo 4: Diseño de programa de auditoría.

En este capítulo se propone el diseño para el programa de auditoría. Tanto la programación del código en Matlab, como la elaboración de la interfaz gráfica en Guide Matlab, son descritas.

Además se presenta el funcionamiento resultante del programa de auditoría, mediante un ejemplo de simulación.

- Capítulo 5: Implementación del programa de auditoría en simulación.

En este capítulo se muestra la implementación del programa de auditoría elaborado. Es realizada la implementación del programa sobre datos de simulación, abordando el análisis de manera detallada, especificando los resultados de los índices en la sección 6.2.1 y comparando y evaluando estos resultados en el punto 6.2.2., además de presentar la operación de la interfaz gráfica.

- Capítulo 6: Implementación del programa de auditoría en planta.

En este capítulo se implementa el programa de auditoría elaborado sobre datos reales en la planta de flotación de Codelco Chuquicamata. Se realiza la descripción general del proceso de concentración del cobre y la sub-etapa de flotación. Se realiza la implementación del programa en lazos de la planta de flotación, el análisis es realizado de forma más general en comparación a la simulación realizada en el capítulo 6. Se especifican los resultados de los índices por medio de la interfaz diseñada en la sección 7.3.1 y se comparan y evalúan los lazos por medio de la interfaz en el punto 7.3.2.

- Capítulo 7: Análisis de resultados sobre comportamiento de lazos.

En este capítulo se resumen los resultados de la planta de flotación, obtenidos en el capítulo 7. Es realizado un análisis general de la planta y resultados de línea base para la planta de flotación A-1 de Codelco Chuquicamata.

- Capítulo 8: Discusión y conclusiones.

Finalmente, se discuten los resultados finales y se generan conclusiones. En este capítulo se presenta un sumario del trabajo realizado y se formalizan propuestas para trabajo futuro en relación a la mejora de comportamiento de lazos de control posible, mediante un software de monitoreo y auto-sintonización de lazos de control.

En cuanto a la metodología a implementar, se realizará un análisis de las características principales de un software CPM mediante la teoría y algoritmos de algunos de los métodos

generales, incluyendo monitoreo, detección de fallas y oscilaciones y auto-sintonización, los cuales serán aportados por los documentos bibliográficos [3], [4] y [5]. Algunos de estos métodos para detección de oscilaciones y medición de rendimiento serán utilizados para la elaboración del programa de auditoría, especificando el método de operación, cálculo y análisis para implementarlos, para la realización del programa, los documentos [6] y [7] serán primordiales.

La evaluación de comportamiento de las condiciones actuales, para la futura inspección técnica, precisará de realizar evaluaciones de comportamiento sobre los lazos de control de la planta concentradora, a través del programa diseñado para auditoría y evaluación de rendimiento.

Finalmente, se realizarán conclusiones a partir de los resultados obtenidos, estableciendo una línea base a partir de la evaluación realizada, para la posterior evaluación de mejora debido a la implementación de software de monitoreo y auto-sintonización.



Capítulo 2. Principios del monitoreo de rendimiento de lazos de control

2.1. Introducción

Las oscilaciones y fallas de instrumentación en los lazos de control de procesos son un problema importante y muy común en la industria automatizada. Comúnmente, la presencia de este tipo de comportamiento en un lazo de control representa un incremento en la desviación con respecto al SP, operación en modo manual, o en la detención total del equipo con problemas, causando productos inferiores, incremento de la cantidad de energía consumida y una disminución del rendimiento general, condiciones evaluadas y demostradas en documentos como [6], [11] y [14].

Es importante señalar que generalmente los lazos de control de un proceso no están aislados entre otros lazos de control, por lo que si uno de los lazos presenta problemas u oscilaciones, provocará que estos problemas u oscilaciones alteren también la operación de los demás lazos que continúen en la cadena del proceso.

Es por esto que la medición y monitoreo de rendimiento de los lazos de control críticos, resulta en una solución efectiva, como se explica en [10], en la que es posible identificar rápidamente los lazos con problemas, y tomar decisiones tempranas de mantención u sintonización sobre la causa raíz del problema. Esto mejora el rendimiento, disminuyendo la cantidad de energía consumida y produciendo productos de mayor calidad.

El mercado ofrece una amplia gama de productos CPM, los cuales son presentados en la tabla 2.1.

TABLA 2.1 Productos CPM industriales disponibles en el mercado.

Empresa	Nombre del producto
Matrikon (matrikon.com)	ProcessDoctor
ExperTune (expertune.com)	PlantTriage
ProControl Technology (pctworld.com)	PCT Loop Optimizer Suite (PCT LOS)
ABB (abb.com)	Optimize Loop Performance Manager (LPM)
Honeywell (acs.honeywell.com)	Loop Scout
Emerson Process Management (emersonprocess.com)	Entech Toolkit, Delta V Inspect
ControlSoft (controlsoftinc.com)	INTUNE
KCL (kcl.fi)	KCL-Control Performance Analysis
OSIsoft (osisoft.com)	PI ControlMonitor
Aspentech (aspentech.com)	Aspen Watch
Control Arts Inc. (controlartsinc.com)	Control Monitor
Invensys (invensys.com)	Loop Analyst
PAS (pas.com)	LoopBrowser

2.2. Causas raíz de oscilaciones y problemas en lazos de control

La mayoría de las causas generales de un mal rendimiento en un lazo de control industrial están catalogadas y se pueden solucionar con la respectiva acción de mantenimiento, re-sintonización o re-diseño del lazo de control, como menciona el libro [7].

- Problemas en el diseño del sistema de control para el proceso.

En los procesos industriales, usualmente sistemas con factores opuestos están interactuando entre sí. Si la selección del controlador, parámetros de configuración y sintonización son inapropiadas es posible generar oscilaciones sostenidas sobre la variable de manipulada.

Un segundo caso de falla de diseño sobre sistemas de control es provocado debido a altas dinámicas de interacción, provocadas por un mal diseño de la estrategia de control. En estos casos es importante escoger en la etapa de diseño y dentro de lo posible, una estrategia de control que minimice la interacción de los distintos lazos de control que podrían interactuar entre sí.

Un tercer caso que puede provocar oscilaciones sobre las variables controladas, es la configuración de flujo en el proceso, por ejemplo, una fuente de fluido inestable, la cual requerirá sintonización constante. Una solución para este problema de diseño es usar algunos estanques de almacenamiento intermedios.

- **Problemas en la sintonización del controlador.**

Una de las razones posibles para el comportamiento oscilatorio de los lazos de control es usualmente una pobre sintonización del controlador. Si el controlador no posee los parámetros indicados para la dinámica del proceso a controlar con el lazo, o el lazo de control sufrió cambios de parámetros debido a cambios sobre instrumentación o dinámicas del proceso, serán producidas sostenidas oscilaciones sobre la variable de control.

- **No-linealidades en la instrumentación y hardware del lazo de control.**

Usualmente la causa más común de las oscilaciones de las variables en lazos de control, es la presencia de no-linealidades estáticas en el sistema. Estas no-linealidades pueden ser fricción estática, zona muerta, histéresis y saturación en la válvula de control.

La realización de tareas de mantenimiento sobre la instrumentación del lazo de control, en el tiempo apropiado, regularmente ayuda a la disminución de oscilaciones causadas por no-linealidades presentes en la instrumentación del lazo. Para ayudar al personal de mantenimiento a desarrollar estas tareas, un sistema de detección automática y diagnóstico de oscilaciones es esencial (sistema CPM).

- **Perturbaciones oscilatorias externas.**

Perturbaciones oscilatorias externas que están entrando continuamente al proceso pueden resultar en oscilaciones en el comportamiento del lazo de control. Estas perturbaciones pueden venir de distintas variables externas. Algunos ejemplos son: oscilaciones presentes en la vecindad u eventos cíclicos, como las fluctuaciones de la temperatura ambiente, fluctuaciones mecánicas de material y variaciones en la demanda de producción.

Si estas perturbaciones no son medidas y no son cuantificadas en la sintonización, configuración o diseño de la estrategia de control, afectarán adversamente a la operación de control del lazo.

Finalmente, las consecuencias sobre el rendimiento económico de estas causas, son presentadas gráficamente en la figura 2.1, mencionando que un rendimiento pobre en el sistema de control, conlleva un mal rendimiento sobre el proceso de la planta, produciendo consecuencias económicas.

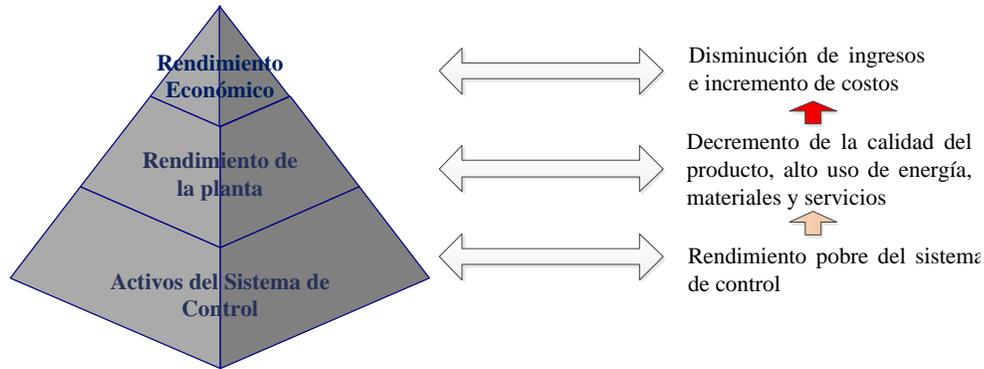


Fig. 2.1 Efecto del rendimiento de control pobre en la industria.

2.3. Procedimiento genérico para monitoreo de rendimiento de control

De manera de permitir una evaluación general para medir efectivamente el rendimiento de un lazo de control, se propone utilizar procedimiento Jelali [7], el cual describe de forma general los pasos a seguir para realizar la evaluación. Los pasos se describen a continuación

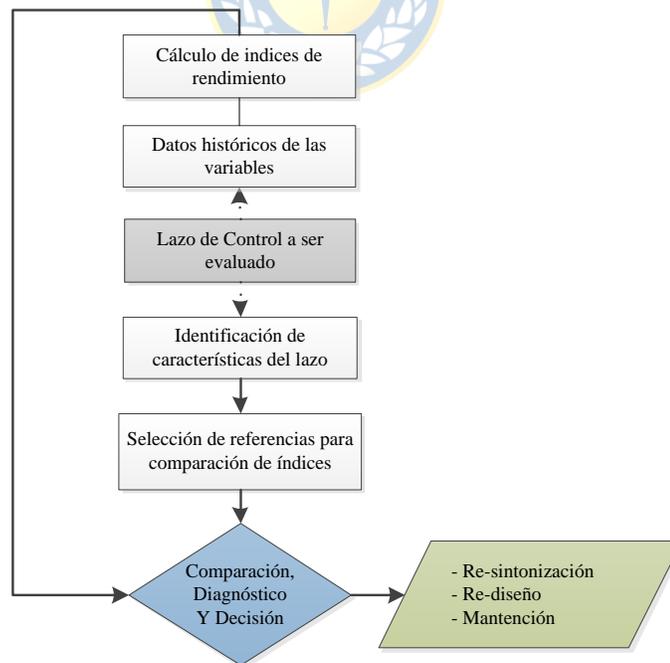


Fig. 2.2 Diagrama general de evaluación y acción sobre comportamiento de lazos de control.

- **Determinar la capacidad del sistema de control actual**

A partir de los datos de operación obtenidos del lazo de control, y teniendo en cuenta que índices de rendimiento utilizar, se debe calcular y cuantificar el valor del índice de rendimiento actual a utilizar sobre el lazo de control. Este índice debe ser calculado en función de un tiempo de muestreo y a partir de los datos históricos de las variables del lazo de control.

- **Elegir o diseñar la referencia para la evaluación de rendimiento**

En este paso se especifica la referencia con la cual se comparará y evaluará el rendimiento actual de control. Esta puede ser la mínima varianza, como un límite de mínimo de rendimiento, o cualquier otro criterio especificado por el usuario, que define el rendimiento deseado, o mejor posible, según la planta y el equipo de control actual.

- **Evaluación y detección de lazos de bajo rendimiento**

Por medio de cálculos realizados sobre los datos históricos medidos para los distintos criterios, se realiza una comparación con las referencias establecidas en los pasos anteriores. Los resultados de la comparación clasificarán el rendimiento en: “alto rendimiento”, “bueno”, “justo” y “pobre” del lazo de control medido, basado en el índice de rendimiento η . Una vez realizada la evaluación, dado que las plantas usualmente presentan gran cantidad de lazos de control, es necesario priorizar si es necesario, para un diagnóstico de rendimiento tanto del proceso, como del lazo.

- **Diagnóstico de causas subyacentes**

Cuando la evaluación y el análisis demuestran que el rendimiento de un lazo de control está fuera de un buen rendimiento, o del rendimiento deseado, es necesario solucionar las causas o fuentes del problema, las cuales pueden estar relacionadas con:

- Sintonización controlador inadecuado o falta de mantención.
- Falla de instrumentación/equipamiento o mal diseño del mismo.
- Estrategia de control inadecuada.
- Límites de la plataforma del sistema de automatización

- **Mejora de rendimiento u optimización**

Finalmente, luego de haber diagnosticado el mal comportamiento del lazo de control, se deben sugerir acciones correctivas para restaurar el buen rendimiento en el sistema de control, como por ejemplo, re-sintonizar o realizar cambio/mantenimiento a la instrumentación, entre otras acciones. Cuando el procedimiento de evaluación indica que el rendimiento de control deseado no es posible con la actual estructura y proceso de control, se deberán tomar modificaciones de mayor magnitud para mejorar el rendimiento del sistema de control, según requerimientos.

2.4. Medición de rendimiento

Un buen método de detección de oscilaciones debe ser robusto en el aspecto de detectar de forma precisa la presencia de oscilaciones en escenarios difíciles, como lo son sistemas con ruidos de alta frecuencia, variaciones lentas y múltiples oscilaciones. Los principios de una buena metodología de detección de oscilaciones para aplicaciones industriales deben poseer las siguientes características, según [7].

- Uso único de variables del proceso basados en el tiempo, con conocimientos limitados o sin conocimiento adicional del proceso.
- Ser robusto ante las mediciones con ruidos de alta frecuencia y perturbaciones.
- Habilidad de detectar la presencia de múltiples oscilaciones u oscilaciones intermitentes.
- Capacidad de completar la detección sin la intervención de trabajadores.

Un índice general (ecuación 2.1) para la evaluación de lazos de control es planteado a continuación. Este índice, a llamar índice unitario o índice Jelali, tiene como entradas el valor del índice medido y el criterio de referencia para cada índice específico.

$$\eta = \frac{J_{des}}{J_{act}} \quad (2.1)$$

Con,

J_{des} : Valor esperado o ideal para el índice de rendimiento dado.

J_{act} : Valor actual medido del índice de rendimiento dado.

Para casos realistas o evaluaciones menos severas se puede imponer la condición de aprobación de la ecuación 2.2.

$$J_{act} < j_{des} \quad (2.2)$$

Con,

J_{des} : Valor esperado o ideal para el índice de rendimiento dado.

J_{act} : Valor actual medido del índice de rendimiento dado.

En donde el índice de rendimiento η asumirá valores mayores a 1, para situaciones donde se cumpla la ecuación 2.2, indicando que el control actual está mejor que lo requerido en el aspecto que se está evaluando.



Capítulo 3. Desarrollo de metodología de auditoría del software CPM

3.1. Introducción

Para la futura auditoría de un software CPM, es necesario realizar una evaluación actual y futura del comportamiento de los lazos de control de la planta, para esta tarea es diseñado un programa de auditoría basado en la plataforma Matlab. En este informe, el programa de auditoría será utilizado para evaluar las condiciones actuales de los lazos, dejando como trabajo futuro la evaluación de comportamiento de las condiciones futuras de los lazos, midiendo la mejora de comportamiento de lazos de control, como se muestra en la figura 3.1.

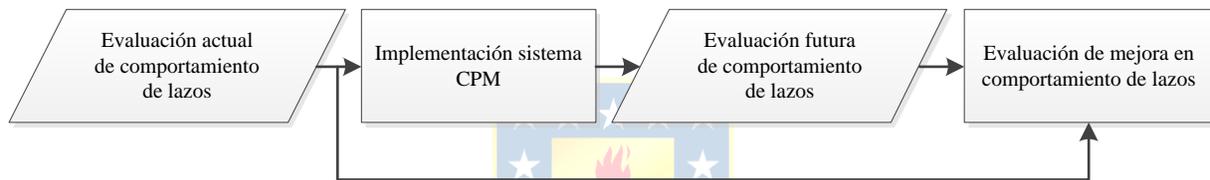


Fig. 3.1 Metodología de auditoría de sistema CPM.

Debido a que la metodología para auditar el correcto funcionamiento del software se basará principalmente en la evaluación pre y post puesta en marcha de comportamiento de lazos a través del programa de auditoría diseñado. Para esto es necesario definir los principales índices a utilizar y determinar el comportamiento de algunos lazos representativos de la planta Concentradora con el objetivo de medir una mejora en el comportamiento de los lazos, luego de la implementación de un sistema CPM.

3.2. Métodos de medición de rendimiento en lazos de control

Los métodos de medición de rendimiento normalmente se basan en índices calculados a partir de las curvas de datos obtenidas del lazo de control. Éstos índices de rendimientos son valores calculados para dar especificaciones de sintonización para los lazos de control, medir rendimiento actual del lazo con respecto a referencias establecidas y para determinar los cambios de rendimiento luego de un ajuste o acción mantenimiento correctivo en el lazo.

Los índices pueden estar basados en distintos tipos de análisis sobre la curva de respuesta del lazo. En la etapa de auditoría se definirán y aplicarán índices calculados a partir de tres tipos de análisis basados en los siguientes tipos de respuesta:

- Análisis basado en la curva de respuesta ante cambios de SP (Tabla 3.1).
- Análisis basado en la curva de respuesta total (Tabla 3.2).

TABLA 3.1 Índices basados en curva de respuesta ante cambios de SP.

Índice	Descripción
Tiempo de subida (T_s)	Tiempo de cambio en la salida, desde 10 a 90%
Tiempo de asentamiento (T_{set})	Tiempo que tarda la respuesta en asentarse entre un 1,2 o 5% del valor en S.S.
Razón de amortiguamiento (d)	Razón entre dos peak's de error consecutivos.
Sobrepaso (α)	Razón entre la diferencia del primer peak, y el valor en S.S. de la respuesta.
Miao y Seborg (\mathcal{R})	Método en base a medición de distancias máximas en curva de auto-correlación

TABLA 3.2 Índices basados en curva de respuesta total.

Índice	Expresión
Integral del error absoluto Integral of the absolute value of the error (IAE)	$\int_0^{\infty} e(t) dt$
Promedio muestral del error absoluto Average of the Absolute value of the Error (AAE_N)	$\frac{\int_0^{\infty} e(t) dt}{N}$
Error temporal del error absoluto Average of the Absolute value of the Error (AAE_t)	$\frac{\int_0^{\infty} e(t) dt}{t}$
Desviación Estándar (σ)	$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y(k) - \bar{y})^2}$

En este punto se definirán algunos de los índices de rendimiento a utilizar en el programa de auditoría. Estos índices serán comparados con referencias para definir el rendimiento en la operación de los lazos de control a analizar, en las etapas de pre y post puesta en marcha del sistema.

3.2.1. Criterios generales sobre respuesta ante cambios de Set-Point

A continuación se definirán algunos criterios básicos basados en la respuesta ante cambios de Set-Point utilizados universalmente para distintos métodos, los cuales se definirán a continuación. Estos criterios son utilizados en la literatura comúnmente como base para la realización sintonización, análisis de respuesta de control y evaluación de comportamiento de lazos.

Los criterios se incorporarán en la auditoría a realizar, y su método de evaluación de rendimiento estará sujeto a comparación con lazos de referencia de las mismas características.

- **Tiempo de subida T_s**

Este criterio se define como el tiempo que demora la variable del proceso en cambiar desde el 10% al 90% de su valor en estado estacionario. Un tiempo de subida muy alto, según los criterios de comparación y evaluación definidos por el evaluador técnico, normalmente evidencian problemas en la respuesta del lazo de control analizado.

Matemáticamente este tiempo es calculador como se describe en la ecuación

$$T_s = PV(t_{PV_{90\%}}) - PV(t_{PV_{10\%}}) \quad (3.1)$$

Donde,

$PV(t)$: Variable de proceso del lazo de control analizado.

$t_{PV_{90\%}}$: Tiempo en que la variable $PV(t)$ alcanza el 90% del SP fijado.

$t_{PV_{10\%}}$: Tiempo en que la variable $PV(t)$ alcanza el 10% del SP fijado.

- **Tiempo de asentamiento T_{set}**

El tiempo de asentamiento se describe como el tiempo que tarda en llegar la variable del proceso a su valor en estado estacionario ante una entrada de tipo escalón. Si el tiempo de asentamiento es mayor al deseado, las consecuencias sobre el proceso pueden resultar en ineficiente uso de recursos y menor calidad en el producto final del proceso.

- **Razón de amortiguamiento (d)**

Este criterio consiste en medir la proporción de dos errores máximos consecutivos. Un valor de razón de amortiguamiento muy alto, conlleva a visibles oscilaciones en la respuesta ante cambios de Set-Point.

En el caso de que la razón de amortiguamiento sea pequeña, se observará una respuesta con oscilaciones que son amortiguadas más rápidamente.

En la literatura es aceptable una razón de amortiguamiento de valor 0.25, sin embargo, en la mayoría de los procesos, ese valor aún es muy alto para su aceptación o uso en procesos reales.

- **Sobrepaso**

El sobrepaso de una señal, está definida como la razón entre el error absoluto en el instante del primer peak de la variable de proceso, y su valor en estado estacionario (S.S.). Comúnmente, un sobrepaso de máximo 8% o 10% es especificado en los lazos de control. Para otros casos en que es inaceptable poseer sobrepasos, el lazo es configurado de tal forma que la respuesta de la variable de proceso sea sobre-amortiguada sin sobrepaso.

La metodología matemática para calcular el sobrepaso se ve representada en la ecuación 3.2.

$$\alpha = \frac{|E_{peak1}|}{SP(t_{peak1})} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Donde,

E_{peak1} : Amplitud de primer peak de error, ante cambio de SP escalón.

$SP(t)$: Set-point establecido en el instante 't'.

t_{peak1} : Instante de tiempo en que ocurre primer peak de error, luego de cambio de SP.

3.2.2. Desviación estándar

La desviación estándar definida a partir de la ecuación 3.4, es una medida usada para medir la dispersión que poseen los datos del proceso, como el error, con respecto a su valor promedio y se define como al raíz cuadrada de la varianza mostrada en la ecuación 3.3.

$$v = \sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y(k) - \bar{y})^2 \quad (3.3)$$

Donde,

- k : Posición de elemento discreto de función 'y'.
- $y(k)$: Elemento en posición 'k' de función a analizar 'y'.
- \bar{y} : Valor promedio de función 'y'.
- N : Número total de muestras
- σ_y : Desviación estándar de 'y'.

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (y(k) - \bar{y})^2} \quad (3.4)$$

Donde,

- k : Posición de elemento discreto de función 'y'.
- $y(k)$: Elemento en posición 'k' de función a analizar 'y'.
- \bar{y} : Valor promedio de función 'y'.
- N : Número total de muestras.

Para el análisis del error de control, este puede ser realizado tanto en estado estacionario, como en la curva total de respuesta. En este informe se realizará principalmente pruebas de desviación estándar en estado estacionario, para de esta forma detectar oscilaciones constantes y evitar el cambio del valor promedio por errores instantáneos al cambiar de SP.

3.2.3. Integral del error absoluto (IAE)

El índice integral del error absoluto (IAE), junto con métodos basados en este índices, han sido unos de los parámetros más utilizados en la medición de rendimiento en lazos de control, debido a su fácil implementación y capacidad de medir la desviación de la variable del proceso (PV), en relación al set-point (SP), lo que permite caracterizar registros completos de datos en lazos de control.

La integral del error absoluto en su forma continua se define a partir de la ecuación 3.5 mostrada a continuación:

$$\int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (3.5)$$

Donde,

$e(t)$: Error de control en instante t .

Dado que se trabajará con controladores digitales, se define la integral del error absoluto en su equivalente discreto, dado por la ecuación 3.6.

$$\sum_{k=0}^N e(kT) \quad (3.6)$$

Donde,

$e(kT)$: Error de control en instante kT .

k : Instante de tiempo discreto.

T : Tiempo de muestreo del controlador.

N : Número total de muestras.

Un ejemplo de la aplicación de este índice se muestra a continuación.

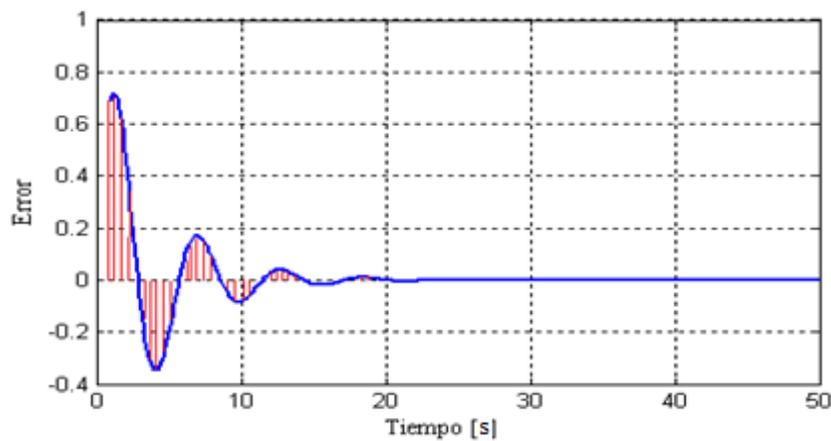


Fig. 3.2 Caso ejemplo de Integral de Error Absoluto (IAE).

Este índice se usará para identificar la variabilidad promedio de la curva de respuesta de control, en una ventana de tiempo definida.

La metodología para calcular el índice global IAE, a través de cálculo numérico es simple y se basa en los siguientes procedimientos:

- Leer datos de Set-point $SP(t)$ y variable de proceso $PV(t)$.
- Calcular error de control.
- Definir una ventana de tiempo para el cálculo de IAE.
- Calcular IAE a través de la sumatoria mostrada en la ecuación 4.6.

3.2.4. Promedio del error absoluto (AAE)

Como no siempre se compararán dos valores de IAE con el mismo muestreo y ventana de tiempo, con este índice se propone dividir el valor total de IAE por la cantidad de muestras realizadas a la señal o por el tiempo total de la ventana de tiempo seleccionada, quedando un nuevo indicador que es posible de comparar con señales de referencia para distintos tiempos de muestreo y largo de ventana de tiempo.

Al igual que la integral del error absoluto, el índice AAE_N toma la suma de todos los errores absolutos en una ventana de tiempo, representado por la ecuación 3.5. Luego el valor obtenido para IAE es dividido por el número total de muestras, como se puede observar en la ecuación 3.7.

$$AAE_N = \frac{IAE}{N} \quad (3.7)$$

Donde,

IAE : Integral del error absoluto de la señal.

N : Número total de muestras.

Si en lugar de la cantidad total de muestras, se considera el tiempo total de la ventana de tiempo analizada, es posible calcular el índice AAE_t , el cual se define en la ecuación 3.8.

$$AAE_t = \frac{IAE}{t_{total}} \quad (3.8)$$

Donde,

IAE : Integral del error absoluto de la señal.

t_{total} : Tiempo total de la ventana de tiempo analizada.

3.2.5. Miao y Seborg

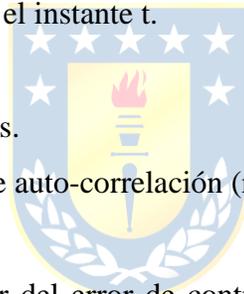
El método de Miao y Seborg [8], es un método basado en el análisis de la curva de error o en la curva de la variable del proceso, en respuesta a un cambio de SP. Este análisis se fundamenta en base de la función de auto-correlación sobre datos de operación normal de la variable de error de control.

Para la implementación de este método en la auditoría, se considerará la señal de error, a la cual, el método de Miao y Seborg propone, en primer lugar, determinar los coeficientes de auto-correlación, los cuales se definen en la ecuación 3.9.

$$\rho(k) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (E(t) - \bar{E})(E(t+k) - \bar{E})}{\sum_{t=1}^N (E(t) - \bar{E})^2} \quad (3.9)$$

Donde,

- E_t : Valor de error medido en el instante t.
- \bar{E} : Valor promedio del error.
- N : Cantidad total de muestras.
- k : Posición de coeficiente de auto-correlación (retraso).



En la ecuación, $E(t)$ es el valor del error de control medido en el tiempo t, \bar{E} es el error promedio para N muestras, y k representa el valor de retraso y posición del coeficiente de auto-correlación. Cada coeficiente de auto-correlación posee un valor dentro del rango $[-1, 1]$. Además, al graficar los coeficientes de auto-correlación de una señal oscilatoria, también son resulta en una señal oscilatoria.

La función de correlación juega un rol fundamental en las aplicaciones estadísticas, y, en este caso, brinda información útil para el monitoreo y detección de oscilaciones. Para este procedimiento Miao y Seborg definen un índice, definido como índice de disminución, tal que:

$$\mathcal{R} = a/b \quad (3.10)$$

Donde,

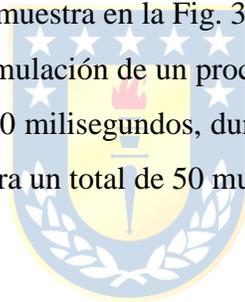
- a : Mínima distancia desde el primer peak de la señal hasta la línea recta que conecta los dos primeros peak's mínimos.

b : Mínima distancia desde el primer peak mínimo hasta la línea recta que conecta el coeficiente de correlación con retraso 0 y el primer máximo.

El cálculo de este índice, es aplicable a señales de error de tipo oscilatorias, como se muestra en la Fig. 3.2. (a). Para la correcta determinación del coeficiente de disminución “ \mathcal{R} ”, se observan los dos primeros peak’s de la señal de auto-correlación del error, y se calculan las distancias a y b , tal que a es la mínima distancia desde el primer peak, hasta la línea recta que conecta los dos primeros peak’s mínimos, y b es la mínima distancia desde el primer peak mínimo hasta la línea recta que conecta el coeficiente de correlación con retraso 0 y el primer máximo.

En la Fig. 3.2 se presenta un ejemplo de la determinación de estas distancias. En la Fig. 3.2 (b) se exhibe una curva de auto-correlación con las distancias a y b señaladas. Esta curva es obtenida a través del cálculo de los coeficientes de auto-correlación por medio de la ecuación 4.3 aplicado a una señal de error, la cual se muestra en la Fig. 3.2 (a).

El ejemplo corresponde a una simulación de un proceso de control de nivel desintonizado. El tiempo de muestreo de la señal es de 250 milisegundos, durante un tiempo total de 50 segundos y la señal de auto-correlación es obtenida para un total de 50 muestras (lags).



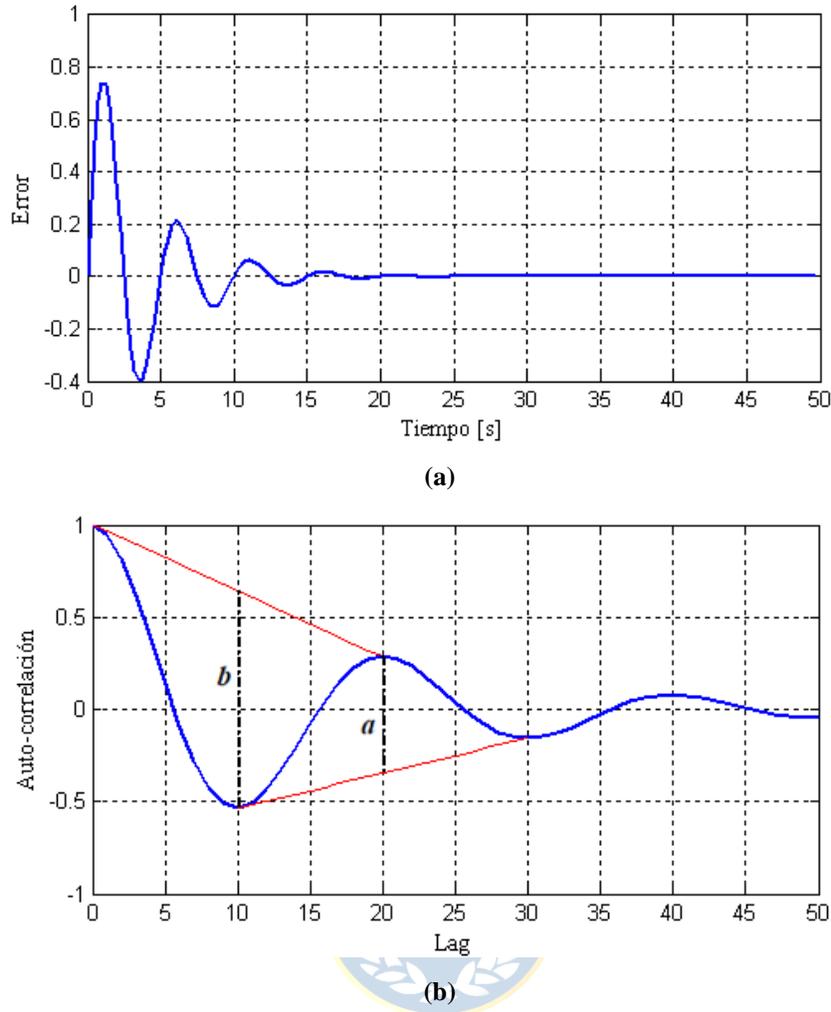


Fig. 3.3 Curvas de error y auto-correlación para cálculo de índice de disminución.

(a) Curva de error de control; (b) Curva de auto-correlación.

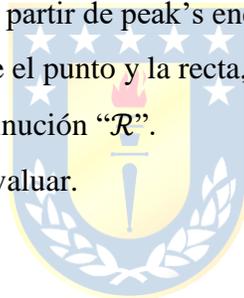
Una condición práctica para escoger el máximo de retraso para el cálculo de la auto-correlación, es seleccionar el máximo retraso igual a un cuarto del número de muestras de la señal de error. Para el ejemplo de la figura 3.3, se tiene la señal de error con 200 muestras, por lo que el retraso máximo en la auto-correlación fue escogido en 50, Fig. 3.3 (b).

Por otro lado, es conveniente aclarar que la distancia mínima "b", forma una línea perpendicular con la recta que conecta el coeficiente de correlación con retraso 0 y el primer máximo, y la distancia mínima "a", forma una línea perpendicular con la línea recta que conecta los dos primeros peak's mínimos. Esta perpendicularidad no se logra apreciar en la Fig. 3.3 (a), en

consecuencia del escalado gráfico que produce Matlab, debido a la diferencia de magnitudes de los ejes.

La metodología para calcular el índice de disminución \mathcal{R} en base a cálculo numérico no es trivial como para el caso del índice IAE, y se basa en los siguientes procedimientos diseñados en esta memoria de título:

- Cálculo de error de control $(SP(t) - PV(t))$.
- Ajuste de ventana de señal de error, para análisis de respuesta ante cambio de SP.
- Determinación de auto-correlación de la señal de error.
- Búsqueda y guardado de los primeros tres tiempos en que el error cambia de signo (t_1, t_2 y t_3).
- Búsqueda de máximos o mínimos en ventanas $t_1:t_2$, $t_2:t_3$ y $t_3:t_{final}$.
- Cálculo de rectas tangentes a partir de peak's encontrados.
- Busca mínima distancia entre el punto y la recta, para el caso de distancia a y b .
- Calcular coeficiente de disminución " \mathcal{R} ".
- Comparar con referencia y evaluar.



3.2.6. Detección de peak's en la distribución espectral de potencia

Detectar las oscilaciones en un lazo de control a través de la observación de peak's en el espectro de potencia es un clásico procedimiento para aproximar la presencia de oscilaciones.

La amplitud del mayor peak dentro del rango de las bajas frecuencias debe ser comparada con la energía total en esa área de frecuencia.

Algunas desventajas en la aplicación y el análisis de este método se pueden observar al analizar señales con oscilaciones intermitentes y periodos que varían en cada ciclo. Por otro lado, los beneficios de este método se ven reflejados al ser un método práctico, el cual puede ser certero si se poseen los conocimientos y experiencia necesarios en el análisis de estos gráficos.

3.3. Referencias de evaluación

No existe un criterio de aceptación general que evalúe y defina el grado certero de oscilación para los métodos nombrados en este capítulo. Como en cada uno de los métodos, la selección de la referencia es una decisión subjetiva e independiente de cada aplicación. A continuación se definirán algunas referencias para la evaluación por medio de los métodos nombrados en este capítulo.

En la mayoría de los criterios a implementar en la auditoría se definirán las referencias para la evaluación del lazo de control, las cuales pueden ser pobre, justo, bueno y óptimo, con respecto al rendimiento esperado. Esta evaluación se realizará mediante el cálculo del indicador de evaluación unitario mostrado, o índice Jelali, de la ecuación 3.11.

$$\eta = \frac{J_{des}}{J_{act}} \quad (3.11)$$

Con,

J_{des} : Valor esperado o ideal para el índice de rendimiento dado.

J_{act} : Valor actual medido del índice de rendimiento dado.

- **Referencias sobre criterios generales sobre respuesta ante cambios de SP.**

En esta sección es definido el indicador de evaluación unitario de la ecuación 3.11 para cada índice de rendimiento general presentado en este capítulo, los cuales son tiempo de subida, tiempo de asentamiento y razón de amortiguamiento, en las ecuaciones 3.12; 3.13; 3.14 y 3.15 respectivamente.

$$\eta_s = \frac{T_{s_opt}}{T_s} \quad (3.12)$$

Con,

T_s : Tiempo de subida de lazo a evaluar.

T_{s_opt} : Tiempo de subida de referencia.

$$\eta_{set} = \frac{T_{set_opt}}{T_{set}} \quad (3.13)$$

Con,

T_{set} : Tiempo de asentamiento de lazo a evaluar.

T_{set_opt} : Tiempo de asentamiento de referencia.

$$\eta_d = \frac{d_{opt}}{d} \quad (3.14)$$

Con,

d : Razón de amortiguamiento de lazo a evaluar.

d_{opt} : Razón de amortiguamiento de referencia.

$$\eta_\alpha = \frac{\alpha_{opt}}{\alpha} \quad (3.15)$$

Con,

α : Sobrepasso de lazo a evaluar.

α_{opt} : Sobrepasso de referencia.

Los indicadores unitarios serán necesarios para clasificar y evaluar el lazo para los distintos índices, en la tabla 3.3 se definen los rangos de referencias propuestos en los que se evaluará el lazo para cada criterio.

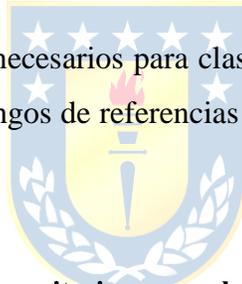


TABLA 3.3 Evaluación en criterios generales sobre índice unitario η .

Criterio	Evaluación			
	Pobre	Justo	Bueno	Óptimo
Tiempo de subida (T_s)	$\eta_s \leq 0.4$	$0.4 \leq \eta_s \leq 0.7$	$0.7 \leq \eta_s \leq 0.9$	$\eta_s \geq 0.9$
Tiempo de asentamiento (T_{set})	$\eta_{set} \leq 0.4$	$0.4 \leq \eta_{set} \leq 0.7$	$0.7 \leq \eta_{set} \leq 0.9$	$\eta_{set} \geq 0.9$
Razón de amortiguamiento (d)	$\eta_d \leq 0.4$	$0.4 \leq \eta_d \leq 0.7$	$0.7 \leq \eta_d \leq 0.9$	$\eta_d \geq 0.9$
Sobrepasso (α)	$\eta_\alpha \leq 0.4$	$0.4 \leq \eta_\alpha \leq 0.7$	$0.7 \leq \eta_\alpha \leq 0.9$	$\eta_\alpha \geq 0.9$

- **Referencia sobre desviación estándar**

Para la evaluación sobre los resultados de la desviación estándar, se realiza el mismo procedimiento de comparación con un lazo de referencia, calculando el índice unitario η presentado en la ecuación 3.16.

$$\eta_{\sigma} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma} \quad (3.16)$$

Con,

σ_{ref} : Desviación estándar en lazo de referencia.

σ : Desviación estándar en lazo a analizar.

TABLA 3.4 Evaluación de desviación estándar sobre índice unitario η .

Criterio	Evaluación			
	Pobre	Justo	Bueno	Óptimo
Desviación Estándar	$\eta_{\sigma} \leq 0.4$	$0.4 \leq \eta_{\sigma} \leq 0.7$	$0.7 \leq \eta_{\sigma} \leq 0.9$	$\eta_{\sigma} \geq 0.9$

- **Referencia sobre índice de Integral del Error Absoluto (IAE)**

La referencia de comparación para la integral del error absoluto (IAE), es definido a partir de la medición de IAE en un lazo de control de referencia del mismo tipo. Es necesaria la comparación en una misma ventana de tiempo y con el mismo tiempo de muestreo para la correcta evaluación de este criterio

- **Referencia sobre el promedio del error absoluto (AAE)**

Dado que el promedio del error absoluto puede ser calculado a partir de la cantidad total de muestras o del tiempo total de la ventana analizada, son definidas las referencias para ambos cálculos en la tabla 3.5.

TABLA 3.5 Evaluación en AAE sobre índice unitario η .

Criterio	Evaluación			
	Pobre	Justo	Bueno	Óptimo
Promedio muestral IAE (AAE_N)	$\eta_{AAE_N} \leq 0.4$	$0.4 \leq \eta_{AAE_N} \leq 0.7$	$0.7 \leq \eta_{AAE_N} \leq 0.9$	$\eta_{AAE_N} \geq 0.9$
Promedio temporal IAE (AAE_t)	$\eta_{AAE_t} \leq 0.4$	$0.4 \leq \eta_{AAE_t} \leq 0.7$	$0.7 \leq \eta_{AAE_t} \leq 0.9$	$\eta_{AAE_t} \geq 0.9$

- **Referencia sobre índice de Miao y Seborg**

Para calcular el índice " \mathcal{R} ", es necesario poseer por lo menos dos mínimos y un máximo en la función de auto-correlación del error. Calculando el retraso máximo de la función de auto-correlación es calculado como un cuarto del número total de datos, se tiene que 1.25 ciclos del correlograma corresponden a 5 ciclos de la señal de error en el tiempo. Es por esto que se define que si el algoritmo no detecta por lo menos 3 peak's en la curva de auto-correlación, se tendrá un controlador sin oscilaciones excesivas.

Por otro lado, para evaluar si el lazo es excesivamente oscilatorio para los casos en que es posible calcular el índice " \mathcal{R} ", es decir, los datos de error muestran por lo menos cinco ciclos de oscilaciones amortiguadas, la literatura muestra que un valor del índice sobre 0.5 es equivalente a una razón de amortiguamiento mayor a 0.35, demostrando oscilaciones excesivas. Sin embargo, para la evaluación en esta auditoría se utilizará un valor límite de 0.4, por lo que si $\mathcal{R} \geq 0.4$, el lazo de control será clasificado como excesivamente oscilatorio.

Esta referencia, descrito a partir del índice unitario, se tendrá la condición descrita por la ecuación 3.17.

$$\eta_{\mathcal{R}} = \frac{0.4}{\mathcal{R}} \quad (3.17)$$

Donde,

\mathcal{R} : Coeficiente de disminución actual de Miao y Seborg.

Luego, para lazos excesivamente oscilatorios se tendrá que $\eta_{\mathcal{R}} \leq 1$.

- **Referencia en la distribución espectral de potencia**

A partir de la observación de la distribución espectral de potencia de la señal de error, es posible concluir si el lazo de control posee un comportamiento oscilatorio debido a tres posibles razones:

- No-linealidad de la válvula de control.
- Mal sintonización del lazo.

- Perturbaciones externas, en forma de oscilaciones.

Un máximo en el espectro de frecuencia debe ser tomado en cuenta si es más de tres veces mayor que la amplitud promedio de su vecindad, de por ejemplo 10 muestreos.



Capítulo 4. Diseño del programa de auditoría

4.1. Introducción

Luego de haber realizado la metodología con la que se llevarán a cabo los cálculos de análisis, es diseñado el programa y su interfaz gráfica para su fácil operación e interpretación de resultados.

Dentro de este capítulo se llevarán a cabo la descripción y diseño de cada aspecto del funcionamiento del programa de auditoría, como lo son el programa ejecutado y su interfaz gráfica.

4.2. Diseño del programa

A continuación se muestra el diseño del programa, el cual se logra mediante la herramienta Matlab y la metodología de cálculo y análisis planteada en el capítulo 3 para la realización de la auditoría. Para el programa se plantean una serie de objetivos específicos, los cuales serán apropiadamente logrados mediante la implementación de este programa y de la interfaz gráfica HMI diseñada en la sección 4.3 de este documento. Los objetivos específicos del diseño son:

- Proporcionar valores de los indicadores de rendimiento para la situación actual del lazo de control analizado.
- Comparar indicadores de rendimiento con referencias establecidas.
- Establecer calidad de comportamiento de lazos a través de la evaluación de distintos criterios sobre las señales del lazo de control.
- Desplegar indicadores visuales, como tendencias generales y específicas, para el análisis visual del lazo.
- Desplegar en código de colores la evaluación determinada a partir de los índices y criterios de referencia establecidos.

Para cumplir con estos objetivos, se propone la siguiente estructura de operación del programa, la cual está definida en la figura 4.1.

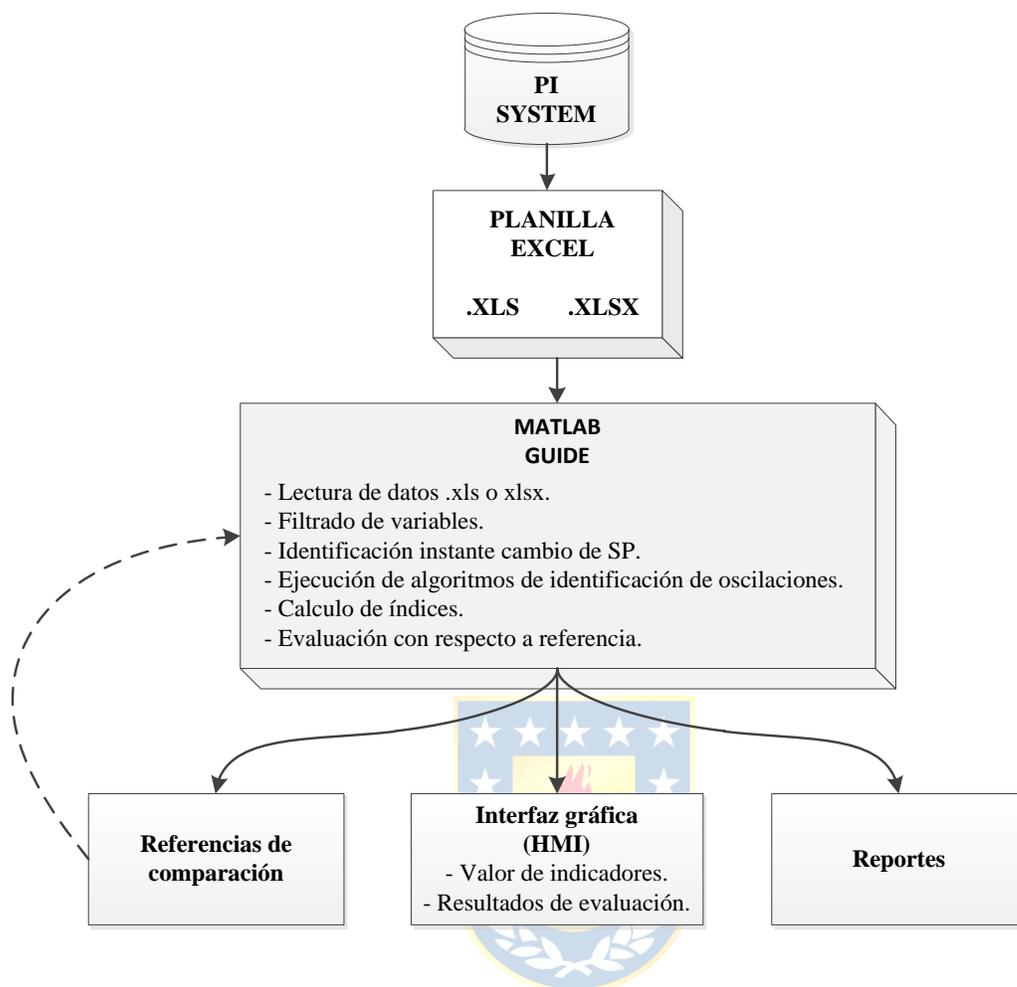


Fig. 4.1 Diseño general de programa de auditoría.

Como se muestra en la figura 4.1, el diseño del programa consta en primer lugar de una etapa de lectura de variables del proceso, esta lectura será realizada a través de un archivo Excel importado del programa de información de la planta PI System. La lectura del archivo Excel es ejecutada por el programa Matlab Guide, el cual es el encargado de ejecutar los códigos de cálculo de índices, despliegue de tendencias y evaluación, a través de una interfaz gráfica (HMI).

Por otro lado, los resultados de comportamiento obtenidos a través del programa diseñado pueden ser utilizados para establecer referencias de comparación, en el caso de que se haya observado buen comportamiento para un lazo de control.

A continuación se presenta la descripción para la operación del programa, a través de los bloques definidos en la figura 4.1.

Lectura PI System

En esta etapa, son guardados los datos históricos de las variables PV y SP de un lazo de control para una ventana de tiempo definida por el usuario. Es importante definir una ventana de tiempo en la que se encuentre al menos un cambio de set point de tipo escalón de amplitud sobre el 5%, para así analizar la dinámica de la respuesta del lazo de control a través del programa de auditoría.

Los datos históricos seleccionados deben ser exportados a un archivo Excel (.xls o .xlsx) a través de la extensión PI DataLink instalada para Microsoft Excel, guardando en los datos seleccionados en dos columnas en el archivo Excel.

Planilla Excel

Como se observa en la figura 4.1 y se detalló en la descripción anterior, la planilla Excel posee los datos de SP y PV obtenidos a través del programa PI System de la planta.

Este archivo será guardado como archivo .xls o .xlsx, con el nombre del lazo de control, para mayor orden en este proceso de evaluación

Programa para Matlab Guide

A continuación, luego de poseer el archivo Excel con los datos históricos del lazo de control a analizar, se realizará su lectura, análisis y evaluación a través de un programa diseñado para Matlab Guide.

La programación es realizada independientemente a la interfaz gráfica, para luego diseñar la interfaz y acoplar el código de ejecución creado, al código de funciones de la interfaz. El programa diseñado funciona en base a la secuencia de operación mostrada en la figura 4.2, en la cual cada bloque corresponde un segmento de código encargado de ejecutar los cálculos en base a la metodología mostrada en el capítulo 3.

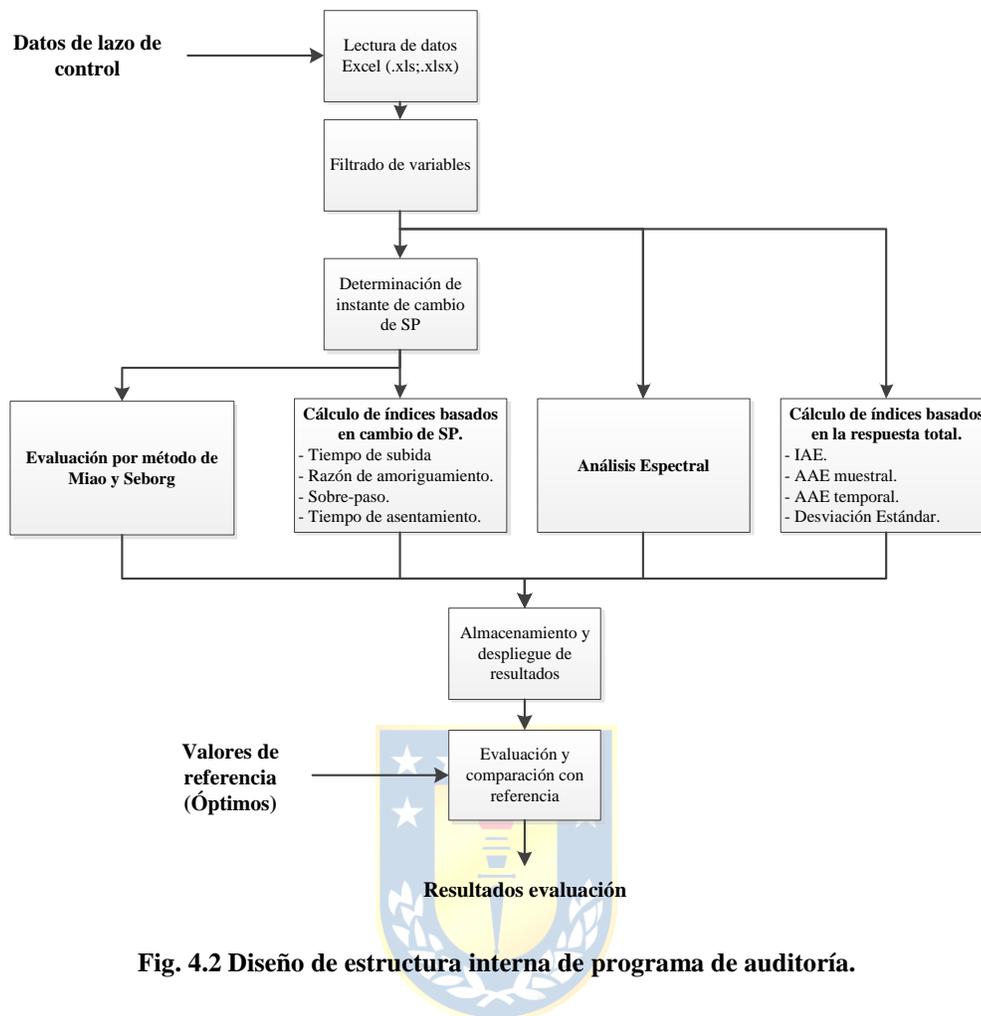


Fig. 4.2 Diseño de estructura interna de programa de auditoría.

A continuación se presenta el diseño de la estructura interna con la cual operará el programa a diseñar, como se observa en la figura 4.2, esta estructura se basa principalmente en: una etapa de lectura y filtrado, una etapa de identificación de cambio de SP y cálculo de índices, y finalmente una etapa de despliegue de resultados y evaluación final del lazo.

Comenzando con la lectura de datos, el programa es elaborado para leer archivos .xls y .xlsx, leyendo en la primera columna el PV y leyendo el SP en la segunda columna del archivo Excel. Estas variables son guardadas y usadas en los distintos algoritmos para el cálculo de índices.

Luego de la lectura de datos, el programa realizará un filtrado de la variable del proceso (PV), a través de un filtro media móvil de orden M, definido por la ecuación 4.1.

$$PV_{filt}(k) = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=0}^M PV(k - i) \quad (4.1)$$

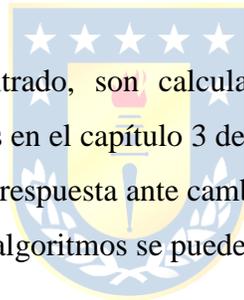
Con,

$PV(k)$: Valor de la variable de proceso en el instante discreto “k”.

k : Número de instante discreto de la función $PV(k)$.

M : Orden a seleccionar del filtro media móvil.

Este filtro es propuesto e implementado con el fin de reducir el ruido proveniente de la operación del sensor, facilitando la ejecución de los algoritmos detectores de oscilaciones, como lo son el cálculo de la razón de amortiguamiento y el método de Miao y Seborg. Tanto el orden del filtro, como la decisión de usarlo, son opcionales y a elección del evaluador. Un ejemplo de criterio para establecer el orden del filtro de la ecuación 4.1, es establecer el orden en función de la desviación estándar de la señal medida en estado estacionario, estableciendo un límite inferior para la desviación estándar.



Luego de la ejecución del filtrado, son calculados los índices, diseñando algoritmos equivalentes a los cálculos mencionados en el capítulo 3 de metodología de cálculo de índices. Estos algoritmos equivalen a un análisis de la respuesta ante cambio de SP del lazo, y de la respuesta total. La elaboración y fundamentos de estos algoritmos se pueden observar en el capítulo 3 y en el código del programa ubicado en el anexo A.

Luego del cálculo de índices, los resultados son almacenados y desplegados, además de presentar tendencias de distintos métodos, como el método de Miao y Seborg y análisis espectral. Estos resultados son comparados con valores de índices de referencias ingresados por el usuario, y es desplegado el resultado de la evaluación a través del índice de rendimiento de Jelali detallado en los capítulos anteriores.

Finalmente, es generado un reporte a partir de los resultados obtenidos por el programa, este reporte consiste en una planilla Excel, la cual es llenada por el programa con los datos numéricos y resultados de la evaluación del lazo de control. El formato de esta planilla es presentado en el anexo B. En este formato se dejan campos específicos a llenar manualmente por el evaluador, como lo son el nombre de la empresa, el área, nombre del lazo de control, notas, etc.

Debido a que la programación consta básicamente de los pasos descritos en la metodología de cálculo, es adjuntado el código utilizado para la utilización de la interfaz gráfica (HMI) y ejecución de la auditoría. Para mayor detalle de los métodos y programación de los algoritmos utilizados, es posible observar el algoritmo en el anexo A y metodologías de cálculo en el capítulo 3.

4.3. Diseño de interfaz gráfica (HMI)

La interfaz gráfica del programa de auditoría es creada en GUIDE del software de programación Matlab, con el objetivo general de aliviar en gran parte el procedimiento de ejecución de la auditoría y análisis al conjunto de datos ingresados.

La interfaz gráfica del programa de auditoría está dividida en 4 principales secciones, como se puede observar en la figura 4.3, las cuales están distribuidas de forma secuencial (de izquierda a derecha) con respecto al proceso de evaluación general de rendimiento, descrito en el capítulo 2. Las secciones incluyen la lectura de datos, cálculo de índices, representación visual de tendencias y finalmente la comparación con la referencia y evaluación.

Auditoría: Rendimiento lazos de control

PASO 1: REFERENCIA Y LECTURA

Lectura de datos:

 Archivo:

Configuración Referencia

Tiempo Asent. [s]:
 Amortiguamiento:
 Desviación Std:
 IAE:
 Periodo Muestreo [s]:
 Total Muestras [N]:
 Sobre-paso [%]:
 Tiempo de subida [s]:

PASO 2: ÍNDICES OBTENIDOS

Tiempo de asentamiento (Tset)
 Valor [s]: -

Razón de amortiguamiento
 Valor: -

Desviación Estándar
 Valor: -

Integral del Error Absoluto
 Valor: -

Promedio Muestral AAE
 Valor: -

Promedio Temporal AAE
 Valor: -

Sobre-paso
 Valor [s]: -

Tiempo de subida (Tr)
 Valor [s]: -
 Error [%]: -

Miao y Seborg
 Valor: -

PASO 3: TENDENCIAS

Tendencia
 Selección: SP y PV

axes1

Miao y Seborg
 Selección: Miao y Seborg

axes2

Análisis Espectral
 Selección: Curva total

axes3

PASO 4: COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN

Panel

Evaluación de respuesta ante cambio de SP

- Tiempo de Asentamiento: -
- Razón de amortiguamiento: -
- Sobre-paso: -
- Tiempo de subida: -

Evaluación de respuesta total

- IAE: -
- AAE Muestral: -
- AAE Temporal: -
- Desviación Estándar: -

Evaluación por método de Miao y Seborg

- Índice de Miao y Seborg: -

Fig. 4.3 Diseño de interfaz gráfica de programa de auditoría.

A continuación se procederá con la descripción y método de operación de cada una de estas secciones en la interfaz.

4.3.1. Referencia y lectura

Este apartado de la interfaz será el punto de inicio para la auditoría del lazo de control. En esta sección es posible seleccionar el archivo Excel (.xls o .xlsx) del cual se leerán los datos de operación del lazo (SP, PV y variable de control), para el análisis y evaluación que realizará el programa de auditoría. Además en esta sección será posible ingresar los valores de referencia para la comparación y evaluación de los índices del lazo analizado.

Un ejemplo es presentado en la figura 4.4, en donde se observa la sección 1, en la cual ya se han ingresado parámetros de referencia, obtenidos de una auditoría anterior de un lazo que opera correctamente, según criterio del evaluador.

PASO 1: REFERENCIA Y LECTURA

Lectura de datos

Archivo:
Datos.xlsx

Configuración Referencia

Tiempo Asent. [s]:

Decay Ratio:

Desviación Std:

IAE:

Periodo Muestreo [s]:

Total Muestras [N]:

Sobre-paso [%]:

Tiempo de subida [s]:

Fig. 4.4 Sección referencia y lectura de interfaz gráfica.

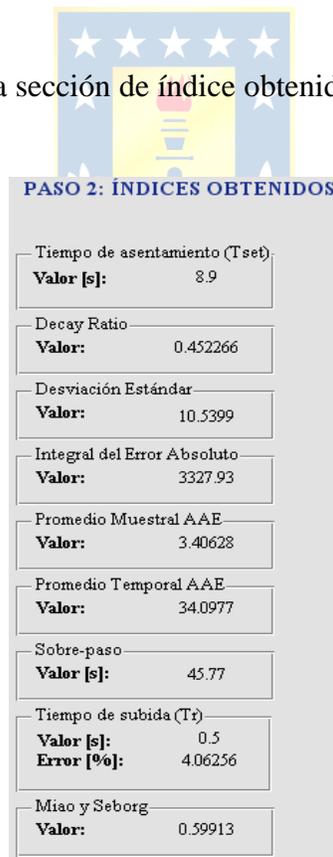
4.3.2. Índices obtenidos

En esta sección se despliegan distintos indicadores de rendimiento de lazos de control, calculados numéricamente por el programa de auditoría, a partir de los algoritmos presentados en el capítulo anterior. Los valores mostrados en esta sección corresponderán a los índices de la siguiente lista.

- Tiempo de asentamiento
- Razón de amortiguamiento
- Desviación estándar
- Integral del error absoluto (IAE)
- Promedio muestral del error (AAE_m)
- Promedio temporal del error (AAE_t)
- Sobre-paso
- Tiempo de subida
- Índice de disminución de Miao y Seborg

Es posible establecer los índices de referencia de un tipo de lazo, leyendo el archivo Excel de datos para el mejor lazo que se posea y guardar los índices obtenidos para la futura evaluación de otro lazo de control de características similares.

En la figura 4.5 se presenta la sección de índice obtenidos en la interfaz gráfica, para un caso de ejemplo.



PASO 2: ÍNDICES OBTENIDOS	
Tiempo de asentamiento (Tset)	Valor [s]: 8.9
Decay Ratio	Valor: 0.452266
Desviación Estándar	Valor: 10.5399
Integral del Error Absoluto	Valor: 3327.93
Promedio Muestral AAE	Valor: 3.40628
Promedio Temporal AAE	Valor: 34.0977
Sobre-paso	Valor [s]: 45.77
Tiempo de subida (Tr)	Valor [s]: 0.5 Error [%]: 4.06256
Miao y Seborg	Valor: 0.59913

Fig. 4.5 Sección de índices obtenidos en interfaz gráfica.

4.3.3. Tendencias

En esta sección son desplegadas las principales tendencias de los datos analizados, dentro de esta sección se incluye el espacio para la visualización de tres gráficos simultáneamente, divididos en paneles independientes.

El primer panel de tendencia, es creado con un menú desplegable para escoger entre las tendencias generales de las señales leídas, como son el conjunto SP y PV, solo SP, solo PV, error y error absoluto.

El segundo panel de tendencia, es creado para dar una representación gráfica del método de Miao y Seborg realizado por el programa, se representan las líneas rectas entre peak's y la distancia mínima para calcular la relación del índice de disminución. Con el menú desplegable es posible seleccionar entre la representación de Miao y Seborg y la curva de respuesta ante cambio de SP, sobre la cual se ha implementado el método automáticamente.

Finalmente, en el tercer panel de tendencia, es mostrada la gráfica de las distintas componentes en frecuencia sinusoidales a partir de la transformada rápida de Fourier. Con el menú desplegable es posible seleccionar entre el análisis en frecuencia de la curva total y el análisis en frecuencia de la respuesta ante cambio de SP de los datos leídos.

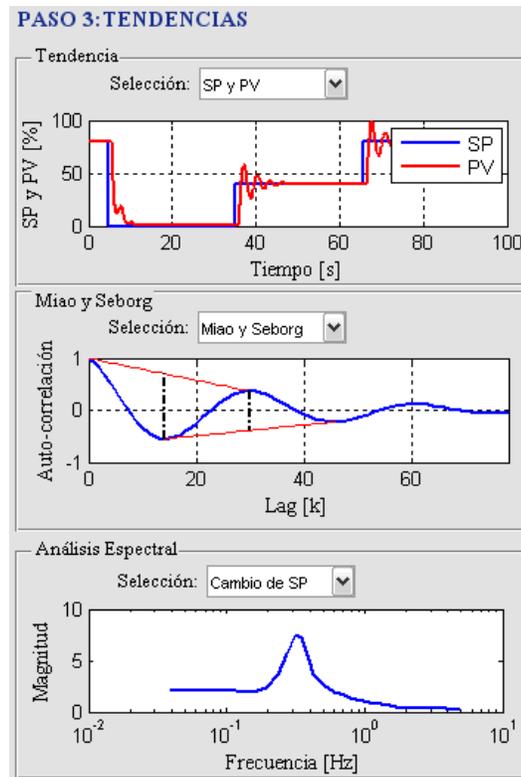


Fig. 4.6 Sección de tendencias en interfaz gráfica.

4.3.4. Comparación y Evaluación

Se presenta la última sección a desplegar en la interfaz gráfica, la cual es denominada como la sección de comparación y evaluación. En esta sección se evalúa el rendimiento del lazo de control a partir de distintos criterios y de la comparación con el lazo de referencia ingresado.

En la figura 4.7 se muestra un ejemplo de esta sección de la interfaz, en donde se puede observar la evaluación de los distintos criterios definidos en el capítulo 3 de este informe. La clasificación es realizada a partir de los rangos definidos en la sección 3.4 de referencias. Para cada criterio se clasificará como pobre, justo, bueno y óptimo, según el índice unitario Jelali de la ecuación 3.7.

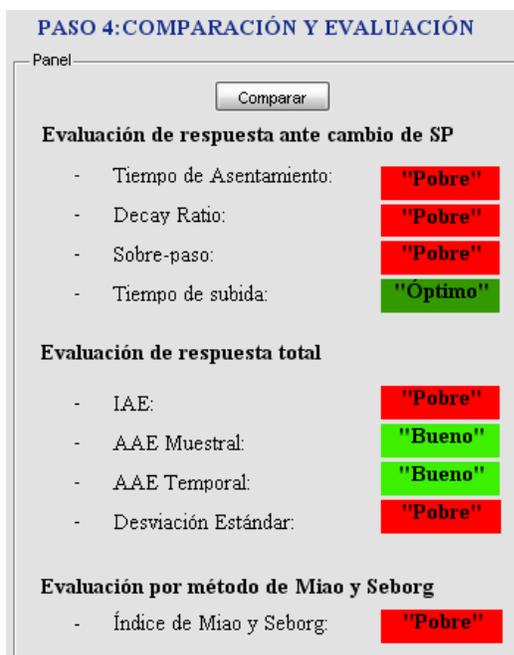
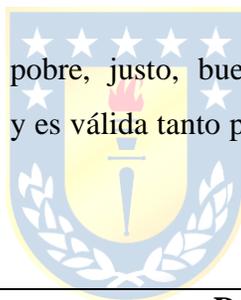


Fig. 4.7 Ejemplo de sección de comparación y evaluación en interfaz.

La evaluación realizada como pobre, justo, bueno y óptimo son interpretadas en las descripciones mostradas en la figura 4.8 y es válida tanto para criterios individuales, como para una evaluación general del lazo de control.



Evaluación (Color)	Descripción
Óptimo / Excelente (Verde oscuro)	El rendimiento del lazo es óptimo y no necesita atención por ahora. La variable controlada sigue al SP con desviaciones pequeñas o no significativas.
Bueno (Verde claro)	El lazo está trabajando adecuadamente, pero hay algunos componentes de rendimiento que pueden ser mejorados. El costo de beneficio para realizar mejoras es usualmente bajo.
Justo (Naranja / Amarillo)	El lazo no está trabajando a todo su potencial. El control es ejecutado, pero hay presente un claro potencial de mejora de rendimiento. Es recomendado realizar mejora a este lazo.
Pobre (Rojo)	El lazo típicamente tiene un serio problema de rendimiento, por ejemplo, grandes oscilaciones o frecuentes y largos errores de control. La investigación de la falla en estos lazos es primordial y promete mejorar substancialmente el rendimiento.

Fig. 4.8 Descripción de evaluaciones en programa.

Capítulo 5. Implementación del programa de auditoría en simulación (FAT)

5.1. Introducción

La implementación del programa de auditoría es realizada en diferentes escenarios, en este capítulo se presenta la implementación sobre datos de simulación para la comprobación del correcto funcionamiento en un escenario con condiciones preparadas (FAT).

5.2. Implementación sobre datos de simulación

A continuación es realizada la implementación del programa de auditoría diseñado, presentando el cálculo de índices y los resultados de evaluación que produce el programa de auditoría para datos de simulación.

5.2.1. Resultados de índices

Durante las pruebas del programa de auditoría en simulación, se obtienen datos de control (SP y PV) a partir de un modelo de un lazo de control de flujo ejecutado a través de la plataforma Simulink de Matlab.

El modelo de la válvula en esta simulación posee una F. de T. dada por la ecuación 5.1, presentada a continuación.

$$h_v(s) = e^{-0.5s} \cdot \frac{1.34}{0.51s-1} \quad (5.1)$$

El control y la adquisición de datos fueron efectuados mediante el programa RSLogix 5000, por medio de comunicación OPC con Simulink. Para controlar el lazo se utilizó un control PID, con parámetros de sintonización $k_c = 0.7$; $T_i = 0.8$ y $T_d = 0$. Además se le añadió una señal de ruido con distribución uniforme y amplitud 1.2 a la señal medida, obteniéndose finalmente, las curvas mostradas en la figura 5.1 (a) y (b) para el control del lazo con distintos valores de SP.

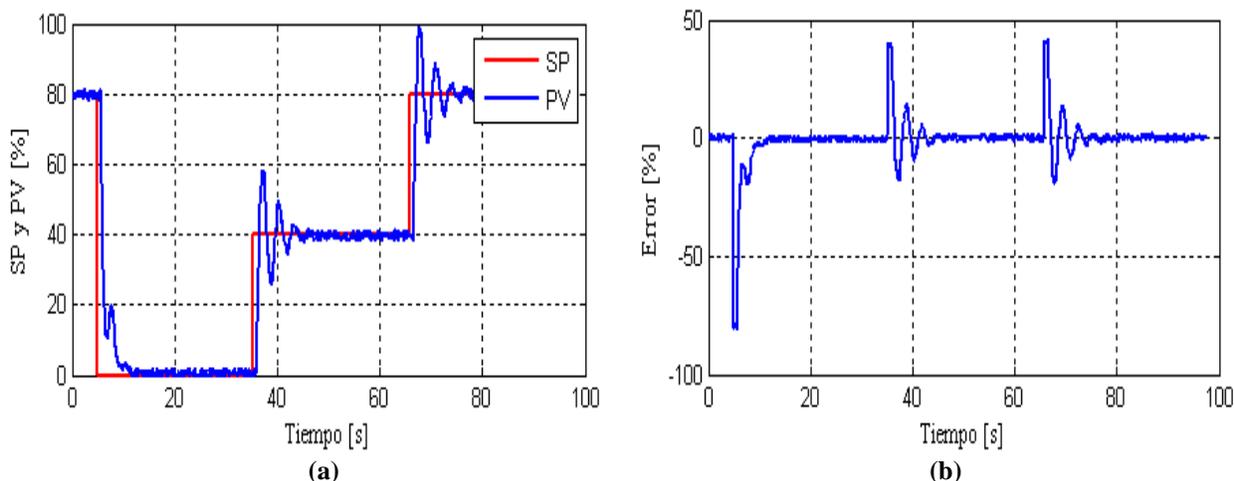


Fig. 5.1 Curvas de respuesta y error para simulación de lazo de flujo desintonizado.

(a) Curva de SP (rojo) y PV (azul); (b) Curva de error.

Luego de realizar una detección automática del instante de cambio de set-point a través del programa de auditoría, es graficada la curva de respuesta ante entrada escalón y el error del lazo de control simulado en la figura Fig. 5.2 (a) y (b). La detección muestra que en el instante $t = 35s$ hay un cambio de Set-Point y se puede realizar los análisis asociados a respuesta ante cambio de SP.

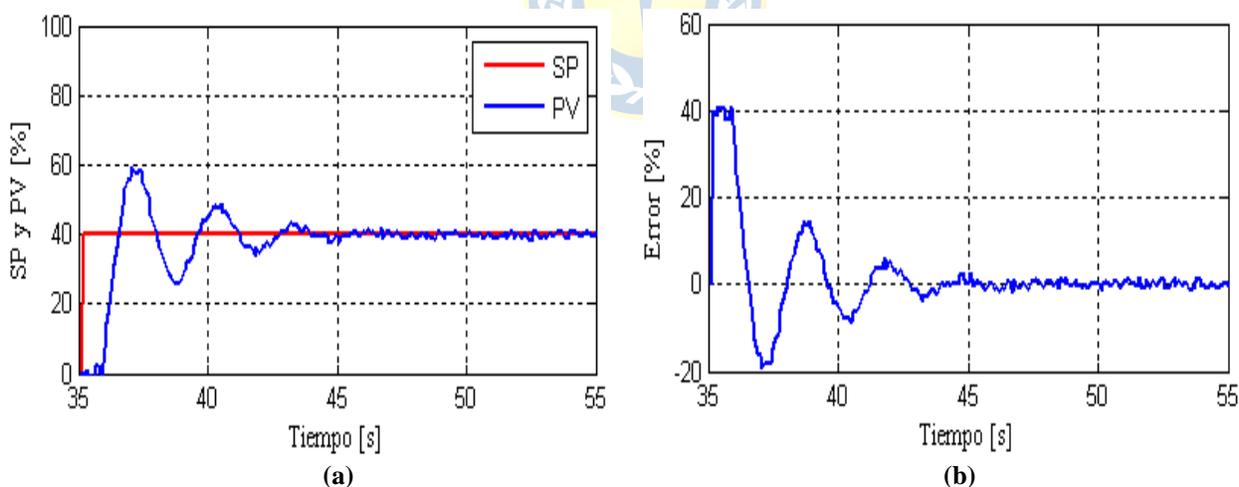


Fig. 5.2 Curvas de respuesta y error ante cambio de SP en simulación de lazo.

(a) Curva de SP (rojo) y PV (azul); (b) Curva de error.

Finalmente, se realiza el cálculo de cada uno de los criterios a través de las metodologías mencionadas en el capítulo 4, obteniéndose los siguientes resultados.

- **Criterios generales sobre respuesta ante cambios de Set-Point**

- El tiempo de subida calculado en la ventana de respuesta es de 0.60 segundos con un error de 9.85%.
- El tiempo de asentamiento calculado sobre la respuesta es de 8.9 segundos.
- La razón de amortiguamiento determinado en la respuesta es de 0.47
- El sobrepaso determinado en la respuesta fue del 46.50%.

- **Integral del error absoluto (IAE)**

Al calcular la integral de error absoluto de la totalidad de la señal muestreada, se obtiene la suma de las áreas que se observan en la fig. 5.3, con una integral de error absoluto igual a:

$$IAE = 3327.18$$

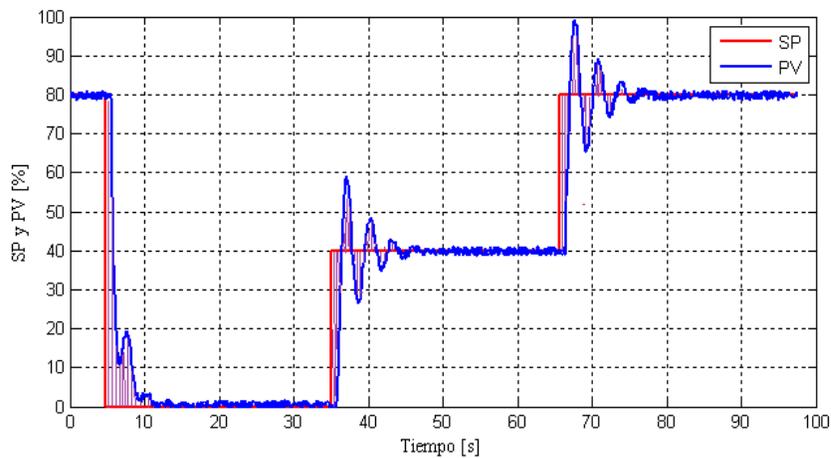


Fig. 5.3 Ejemplo de determinación de IAE sobre curvas en simulación.

- **Promedio del error absoluto (AAE)**

El promedio del error absoluto es calculado para los datos de simulación, obteniéndose el promedio temporal y el promedio muestral del error absoluto. El cálculo de estos errores es mostrado en las ecuaciones 5.2 y 5.3 para el error promedio muestral y temporal respectivamente, obtenidos a partir del valor de IAE calculado anteriormente.

$$AAE_N = \frac{IAE}{N} = \frac{3573}{977} = 3.406 \frac{\%}{muestra} \quad (5.2)$$

$$AAE_t = \frac{IAE}{t} = 34.09 \frac{\%}{s} \quad (5.3)$$

- **Miao y Seborg.**

En el caso de la aplicación del método de Miao y Seborg, es calculado el índice \mathcal{R} a través del análisis sobre la curva de auto-correlación que se muestra en fig. 5.4 (b), sobre la curva de error de la fig. 6.4 (a).

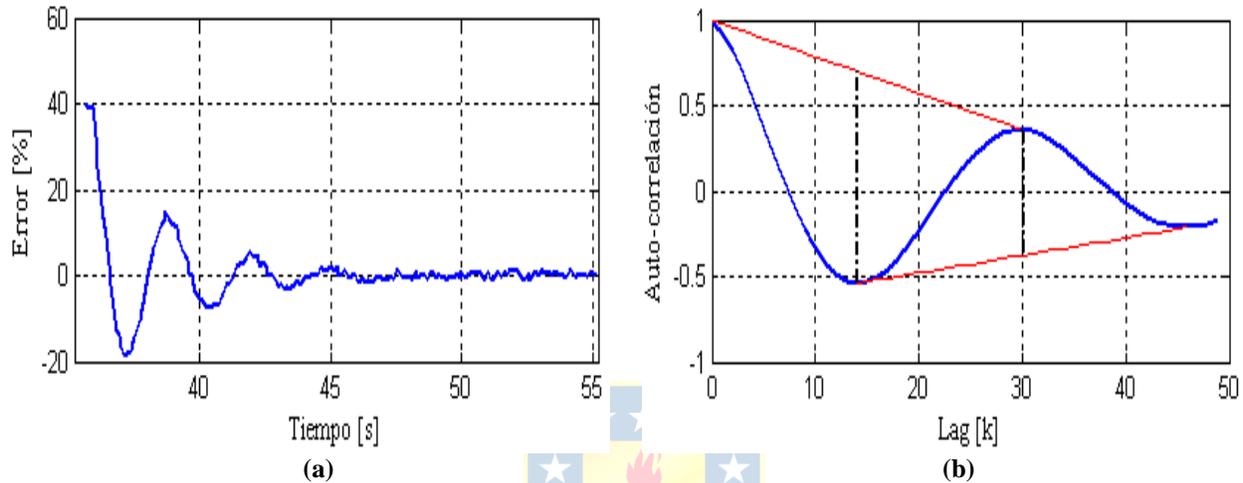


Fig. 5.4 Curvas de error y auto-correlación en simulación de lazo de flujo desintonizado.

(a) Curva de error; (b) Curva de auto-correlación con rectas para cálculo de " \mathcal{R} ".

Al determinar la distancia " a " y " b ", las cuales se pueden observar en la Fig. 5.4 (b) en negro, y definidas por el método de Miao y Seborg en el capítulo 4, es posible calcular el índice " \mathcal{R} ", para el cual se obtiene el valor:

$$\mathcal{R} = 0.60$$

- **Detección de peak's en la distribución espectral de frecuencias**

Aplicando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier sobre la curva de respuesta ante cambio de SP, es obtenido el espectro de frecuencias de la señal de error de la simulación, mostrado en la figura 5.5. Esta curva muestra la magnitud de cada componente sinusoidal de la ventana de tiempo de señal de error, proyectada periódicamente. Resulta conveniente analizar visualmente esta curva para identificación de oscilaciones.

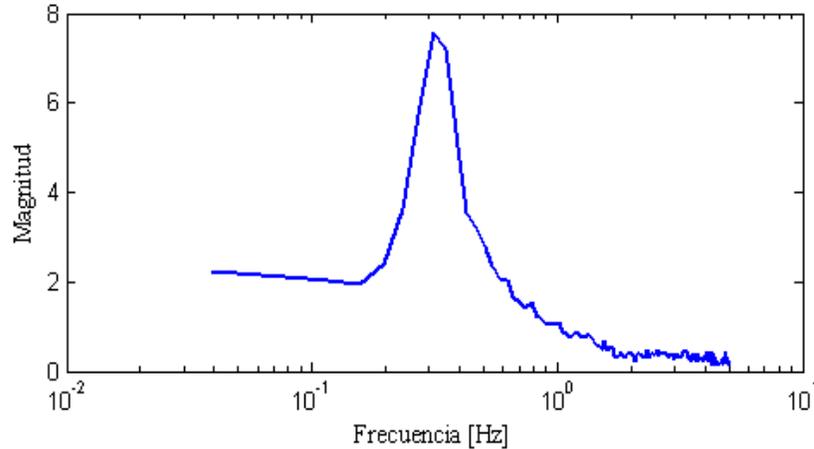


Fig. 5.5 Espectro de frecuencias de señal de error en simulación.

5.2.2. Evaluación en simulación

Considerando un lazo de flujo de referencia del mismo tipo, sintonizado con los valores $k_c = 0.45$; $T_i = 0.8$; $T_d = 0$, muestreado a 0.1 segundos, en un tiempo total de 56 segundos y operando en condiciones óptimas posee los siguientes resultados:

- *Rise Time* = 0.9 s
- *Tiempo asentamiento* = 2.7 s
- *Decay Ratio* = 0.07
- *Sobrepaso* = 7.85%
- *IAE* = 1381, en 56 segundos
- $AAE_N = 2.467$
- $AAE_t = 24.67$



Es realizada la evaluación de rendimiento a partir de los métodos señalados, comparando los valores del lazo de control a analizar con las referencias para cada método a través del índice de rendimiento unitario de la ecuación 3.2. El resumen de esta comparación se muestra en la tabla 5.1.

TABLA 5.1 Comparación de índices de rendimiento entre simulación y referencia.

Criterio	Índice Unitario	Evaluación de Rendimiento			
		Pobre	Justo	Bueno	Óptimo
J	$\eta_j = \frac{J_{ref}}{J_{act}}$				
Tiempo de subida (T_s)	1.50	$\eta < 0.5$	$0.5 \leq \eta < 0.7$	$0.7 \leq \eta < 0.9$	$\eta \geq 0.9$
Tiempo de asentamiento (T_{set})	0.55	$\eta < 0.5$	$0.5 \leq \eta < 0.7$	$0.7 \leq \eta < 0.9$	$\eta \geq 0.9$
Razón de amortiguamiento (d)	0.15	$\eta < 0.5$	$0.5 \leq \eta < 0.7$	$0.7 \leq \eta < 0.9$	$\eta \geq 0.9$
Sobrepaso (α)	0.17	$\eta < 0.5$	$0.5 \leq \eta < 0.7$	$0.7 \leq \eta < 0.9$	$\eta \geq 0.9$
Miao y Seborg (\mathcal{R})	0.67	$\eta \leq 1$	-	-	-
Integral de Error Absoluto (IAE)	0.41	-	-	-	-
Promedio muestral IAE (AAE_N)	0.72	$\eta < 0.5$	$0.5 \leq \eta < 0.7$	$0.7 \leq \eta < 0.9$	$\eta \geq 0.9$
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.72	$\eta < 0.5$	$0.5 \leq \eta < 0.7$	$0.7 \leq \eta < 0.9$	$\eta \geq 0.9$

Los resultados mostrados en la tabla 5.1 fueron determinados a partir de la ejecución del programa de auditoría diseñado, realizando los mismos cálculos, comparaciones y evaluación en la interfaz gráfica. Es importante aclarar que en la ejecución de la interfaz gráfica, los índices unitarios Jelali con los que se realiza la comparación de la tabla 5.1, son calculados internamente para la evaluación final, y no son mostrados en la interfaz. En la figura 5.6 se observa la operación del programa de auditoría para este caso.

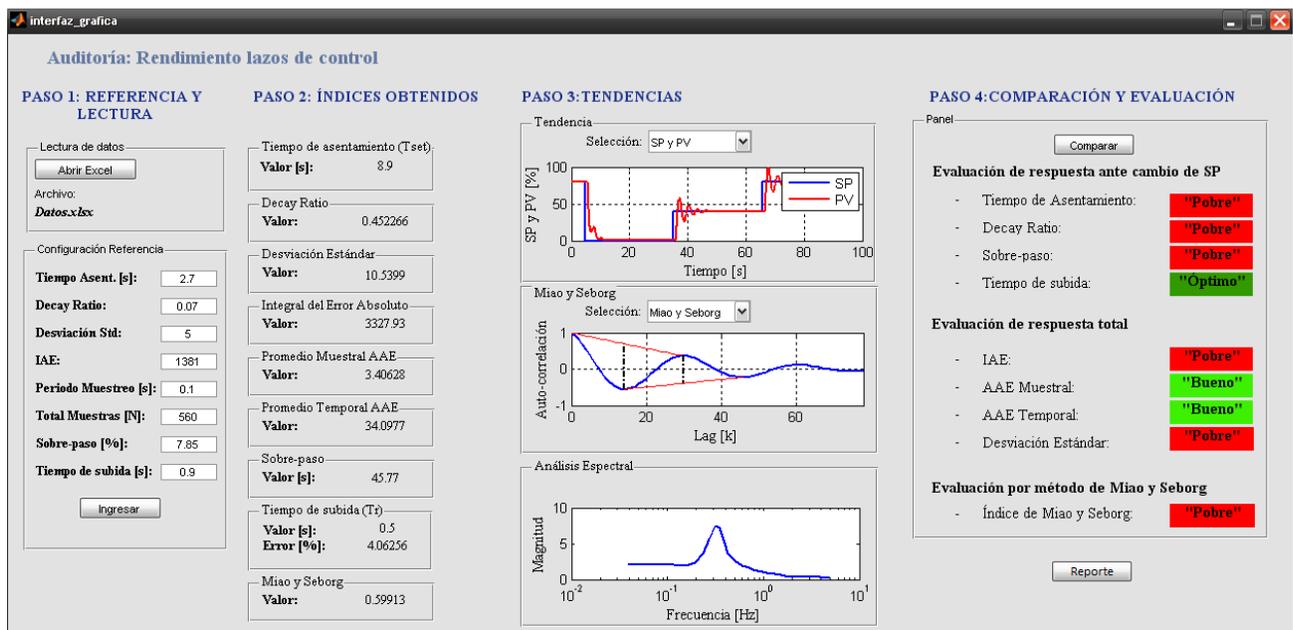
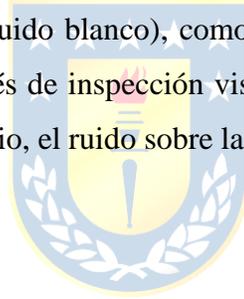


Fig. 5.6 Programa de auditoría operando sobre datos de simulación.

Como resultado de la evaluación, se observa en las tendencias que el lazo de prueba simulado posee oscilaciones y mala respuesta, lo que además es identificado a través de los valores de indicadores obtenidos. Al comparar los indicadores con la referencia establecida, a través del índice unitario de Jelali, se tiene que una gran cantidad de resultados están dentro de la categoría de rendimiento pobre para casi todos los criterios evaluados. Por otro lado, es posible realizar la evaluación tan solo observando el criterio de Miao y Seborg, el cual al estar en una condición pobre, se llega a la conclusión de que hay oscilaciones excesivas en el lazo, obviando los demás criterios. Esta evaluación demuestra que el lazo necesita una medida correctiva urgente sobre la causa raíz de las oscilaciones, la cual en este caso, es sintonización.

Por otro lado, a través de un análisis de la respuesta obtenida en estado estacionario (SP fijo y tiempo de asentamiento resuelto), es posible identificar un error residual correspondiente al ruido de distribución uniforme introducido (ruido blanco), como se observa en la figura 5.4 (a) desde el segundo 45. Esto demuestra que a través de inspección visual o a través de los índices globales en ventanas de tiempo de estado estacionario, el ruido sobre la señal de error es identificado.



Capítulo 6. Implementación del programa de auditoría en planta

6.1. Introducción

Para la implementación de la auditoría es necesario tener presente el entorno y el proceso al cual se le realizará. En este informe se presenta un caso de una planta concentradora de industria minera, específicamente la planta concentradora de Codelco división Chuquicamata. En este tipo de plantas se pueden identificar tres etapas principales del proceso de concentración, las cuales son las etapa de chancado, molienda y de flotación.

En este documento se realizará la evaluación de lazos por medio del programa de auditoría diseñado sobre la etapa de flotación, para así obtener una línea base en la que se podrá trabajar a futuro para la evaluación de un sistema CPM. En esta etapa, para realizar el análisis sobre los lazos de control de la planta, será necesario describir el proceso de flotación, realizar una identificación de lazos a analizar y evaluar los lazos de control a partir de los índices y comparaciones calculados.

6.2. Proceso de flotación del cobre

El proceso de flotación en una planta concentradora, como se observa en la figura 6.1, es la etapa que continúa a la molienda y consiste en primer lugar en la incorporación de reactivos necesarios sobre pulpa proveniente de la etapa de molienda, luego se introduce la mezcla en unos receptáculos llamados celdas de flotación para el proceso de separación del cobre (concentración).

En segundo lugar, y ya con la mezcla en la celda de flotación, se regula la adición de pulpa, reactivos y aire, además de la tarea de un agitador, para la producción de burbujas que contengan cobre. Dentro de las funciones de los reactivos añadidos, se tienen por objetivos producir burbujas resistentes, separar el cobre del agua y proporcionar el grado de acidez adecuado para efectuar la flotación, entre otras características. Para concentrar el cobre, se deben evacuar las burbujas con cobre en el nivel superior de la celda, y de esta forma, extraer únicamente el concentrado de cobre, dejando la pulpa bajo el nivel máximo del estanque.

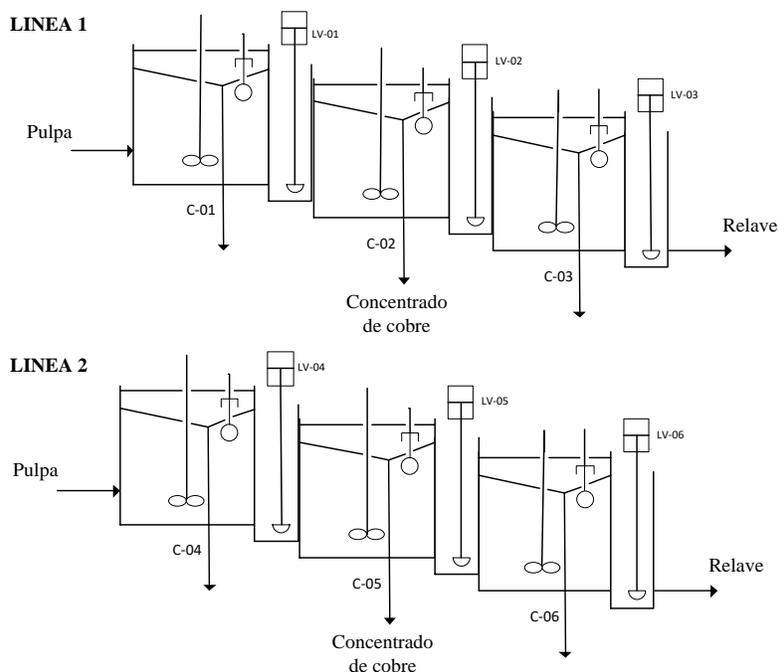


Fig. 6.1 Diagrama líneas de flotación 1 y 2.

Usualmente el proceso de flotación está distribuido en líneas, es decir, celdas de flotación interconectadas la parte inferior de las celdas, de esta forma se extrae la mayor cantidad de cobre a la pulpa, con la generación de burbujas concentradoras en distintas celdas.

6.3. Implementación de auditoría sobre lazos de control de nivel de pulpa en planta de flotación

Los lazos de control en la planta flotación de Codelco Chuquicamata a evaluar, serán los lazos de control de nivel de pulpa de dos líneas de flotación. En total son 6 lazos de control de nivel de pulpa, 3 lazos de nivel para la línea 1, y 3 lazos de nivel para la línea 2, midiendo el nivel de pulpa de cada banco de celdas, como se muestra en la figura 6.2.

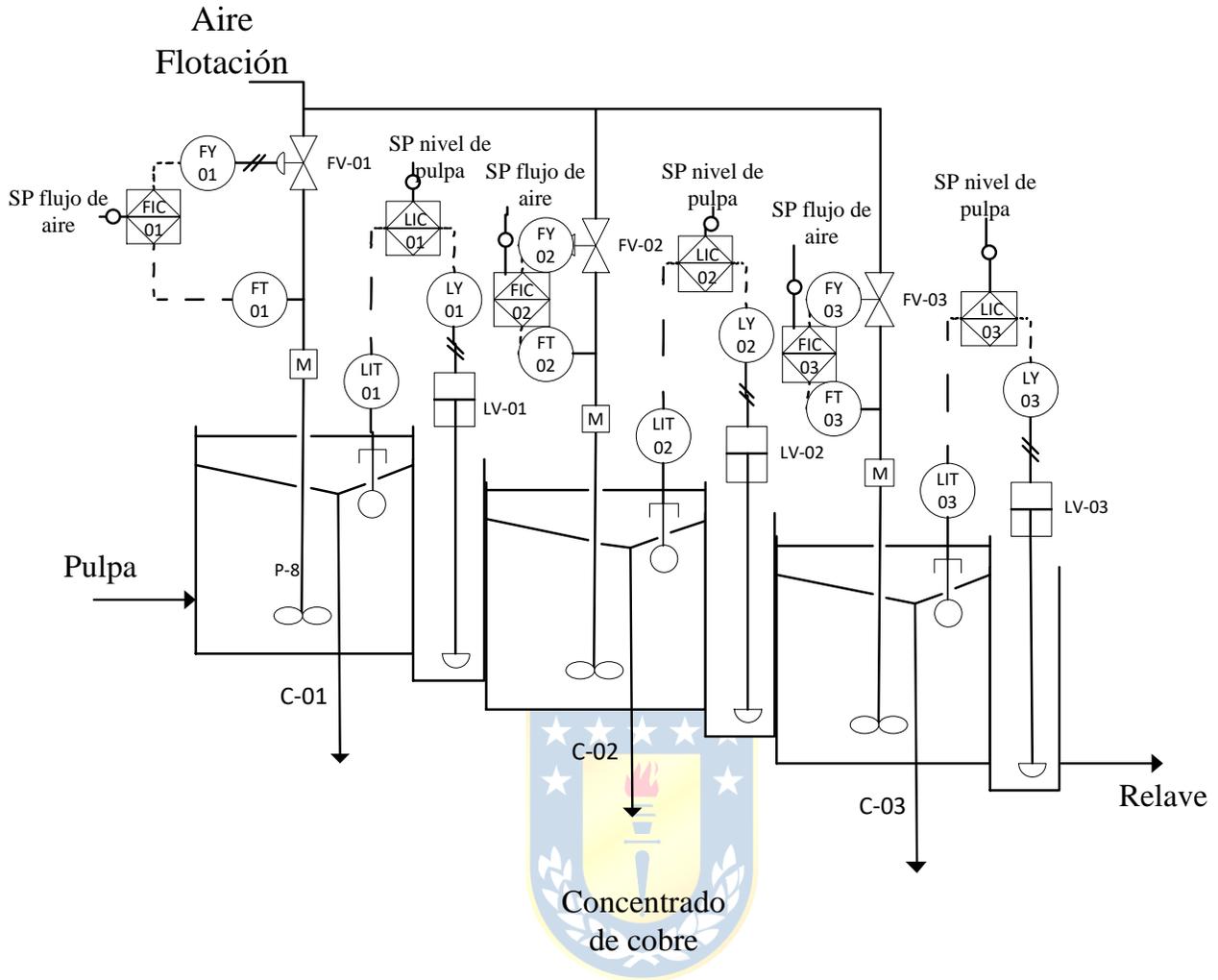


Fig. 6.2 Diagrama P&ID de una línea de flotación.

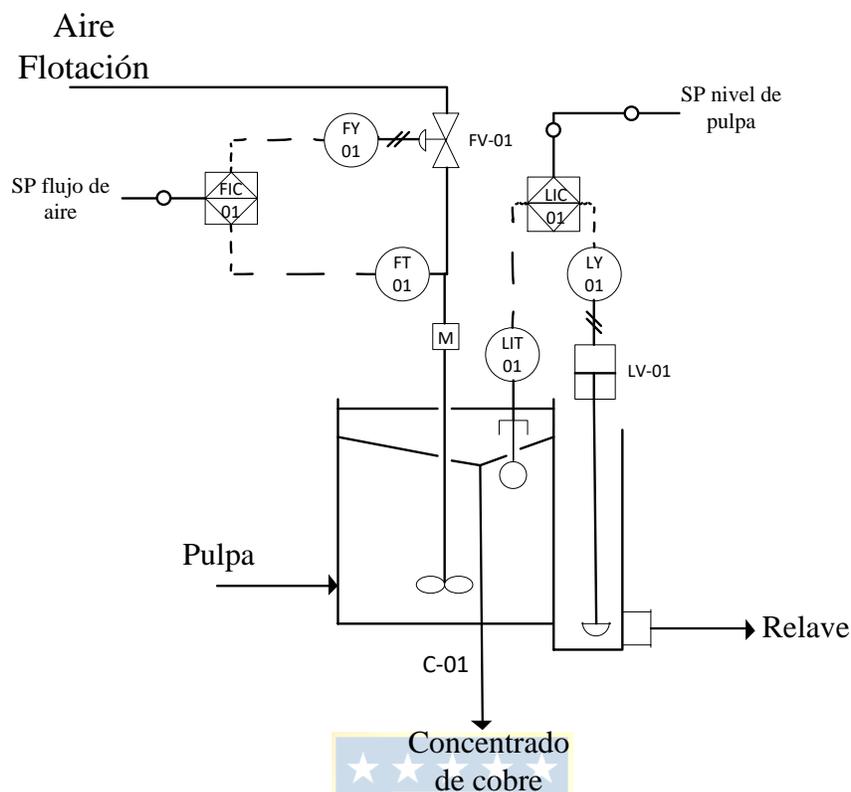


Fig. 6.3 Diagrama P&ID de una celda de flotación.

El control de nivel de pulpa es realizado mediante la apertura o cierre de la válvula de descarga hacia la celda siguiente, al igual que en la figura 6.2. El objetivo de controlar el nivel de pulpa es el de posicionar la espuma (concentrado de cobre) de la superficie en el punto de descarga de la celda, para estos casos prácticos, se asume que la diferencia entre el nivel máximo del estanque y el nivel de pulpa es el nivel de espuma o concentrado de cobre.

En este informe se considerará solo la medición de rendimiento de lazos de control de nivel de pulpa, debido a que estos poseen una constante de tiempo lenta, retardos y perturbaciones, además de ser de vital importancia en el rendimiento del proceso, en comparación a los lazos de control de aire, los cuales poseen una dinámica rápida, pocas perturbaciones y su rendimiento 100% óptimo no es de vital importancia en el proceso.

A continuación es realizada la implementación de la evaluación sobre los datos de planta, estableciendo una referencia promedio para este tipo de lazos de control de nivel, de la misma forma

en la que se realizaron las pruebas en simulación. Para la elección de los valores de referencia para la evaluación, es realizado el cálculo de los índices mediante el programa de auditoría, sin ingresar ningún valor de referencia, para así observar y comparar los resultados de índices, de todos los lazos. Los valores de referencia son establecidos considerando el lazo de mejor rendimiento dentro del conjunto analizado, considerando menores índices, priorizando el sobrepaso, tiempo de subida, tiempo de asentamiento e índice de Miao y Seborg. Para esta evaluación, el lazo de control de mejor rendimiento es el lazo de nivel 4, correspondiente a la primera celda de la segunda línea a analizar. Los valores de referencia fueron obtenidos a través de la evaluación mediante el programa de auditoría, definidos en la tabla 6.1.

Los lazos de control son muestreados cada 10 segundos, a través de la plataforma PI System, la fecha de las muestras corresponden al día 03 de octubre del 2017 y la cantidad de muestras tomadas para cada lazo fue arbitraria, con el objetivo de encontrar instantes de cambio de SP de forma escalón del 9%.

TABLA 6.1 Índices de referencia establecidos por lazo en mejores condiciones

Índice (J_n)	Valor Referencia
Tiempo de asentamiento (T_{set})	180 [s]
Razón de amortiguamiento (d)	0.631216
Desviación Estándar	2.4045
Integral de Error Absoluto (IAE)	1241.97 [%]
Promedio muestral IAE (AAE_N)	1.81183 [%]
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.181446 [%]
Sobrepaso (α)	4.243
Tiempo de subida (T_s)	70 [s]
Miao y Seborg (\mathcal{R})	-

Al realizar la lectura y evaluación de lazos a través del programa se obtienen los siguientes resultados, los cuales son ordenados en las tablas 6.2; 6.3; 6.4; 6.5; 6.6 y 6.7 de este capítulo y en las figuras 6.4; 6.5; 6.6; 6.7; 6.8; 6.9.

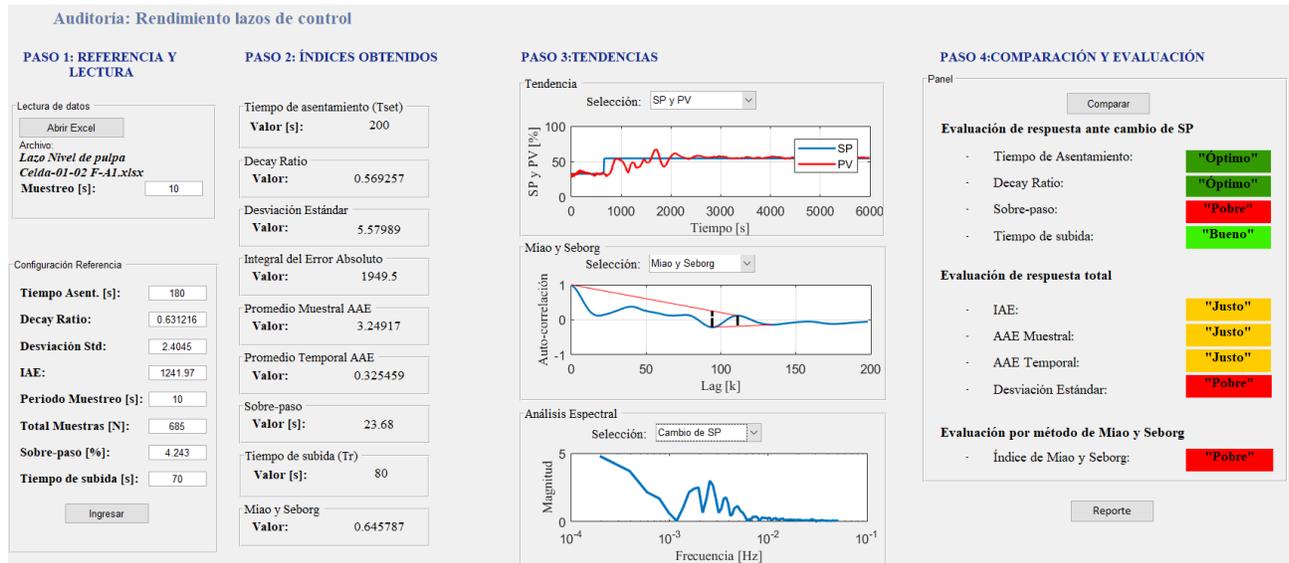


Fig. 6.4 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 1.

TABLA 6.2 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 1.

Índice (J_n)	Valor	Valor Índice Unitario (η_j)	Evaluación
Tiempo de asentamiento (T_{set})	200 [s]	0.9	Óptimo
Razón de amortiguamiento (d)	0.569	1.1088	Óptimo
Desviación Estándar	5.579	0.4309	Pobre
Integral de Error Absoluto (IAE)	1949.5 [%]	0.6371	Justo (*)
Promedio muestral IAE (AAE_N)	3.24917 [%]	0.5580	Justo
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.32546 [%]	0.5571	Justo
Sobrepaso (α)	23.68	0.1792	Pobre
Tiempo de subida (T_s)	80 [s]	0.8750	Pobre
Miao y Seborg (\mathcal{R})	0.645787	0.6194	Pobre

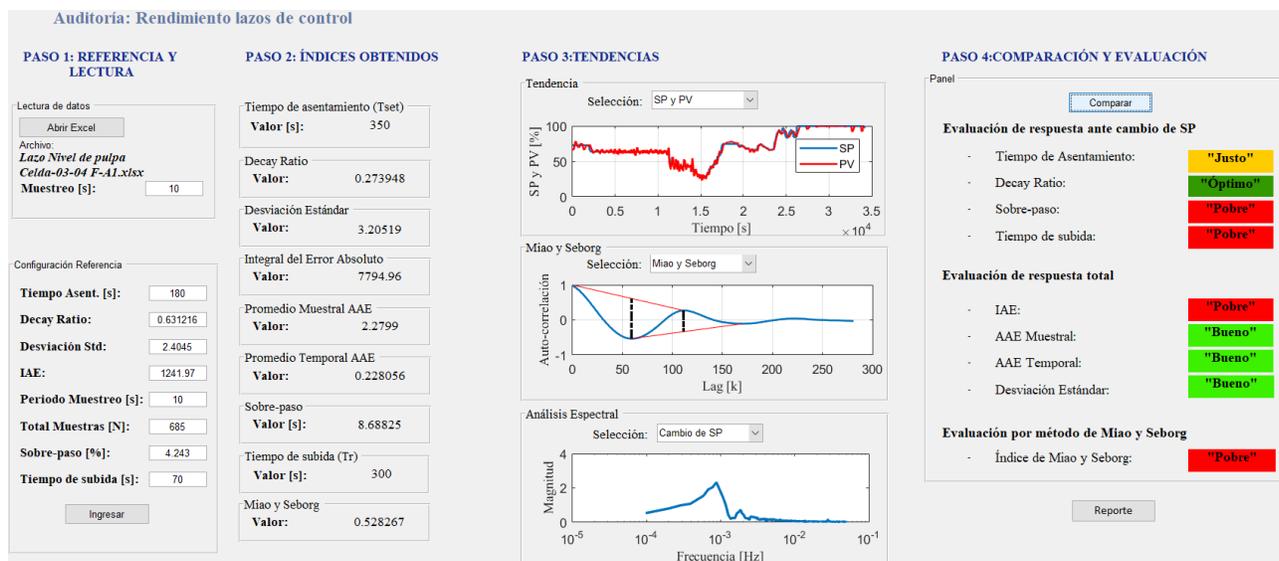


Fig. 6.5 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 2.

TABLA 6.3 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 2.

Índice (J_n)	Valor	Valor Índice Unitario (η_j)	Evaluación
Tiempo de asentamiento (T_{set})	250 [s]	0.72	Bueno
Razón de amortiguamiento (d)	0.27395	2.3041	Óptimo
Desviación Estándar	3.20519	0.7502	Bueno
Integral de Error Absoluto (IAE)	7794.96 [%]	0.1593	Pobre (*)
Promedio muestral IAE (AAE_N)	2.2799 [%]	0.7953	Bueno
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.228056 [%]	0.7950	Bueno
Sobrepaso (α)	8.68825	0.4884	Pobre
Tiempo de subida (T_s)	100 [s]	0.7	Bueno
Miao y Seborg (\mathcal{R})	0.528	0.7572	Pobre

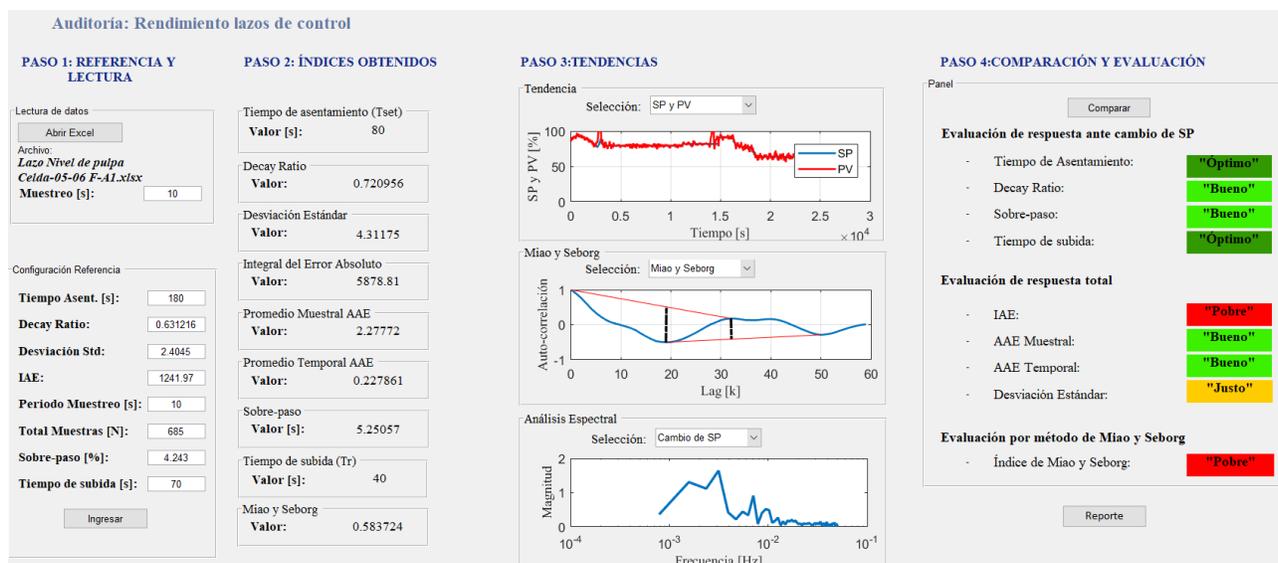


Fig. 6.6 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 3.

TABLA 6.4 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 3.

Índice (J_n)	Valor	Valor Índice Unitario (η_j)	Evaluación
Tiempo de asentamiento (T_{set})	80 [s]	2.25	Óptimo
Razón de amortiguamiento (d)	0.720956	0.8755	Bueno
Desviación Estándar	4.31175	0.5577	Justo
Integral de Error Absoluto (IAE)	5878.81 [%]	0.2113	Pobre (*)
Promedio muestral IAE (AAE_N)	2.2777 [%]	0.7960	Bueno
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.227861 [%]	0.7957	Bueno
Sobrepaso (α)	5.25057	0.8081	Bueno
Tiempo de subida (T_s)	40 [s]	1.75	Óptimo
Miao y Seborg (\mathcal{R})	0.583724	0.6853	Pobre

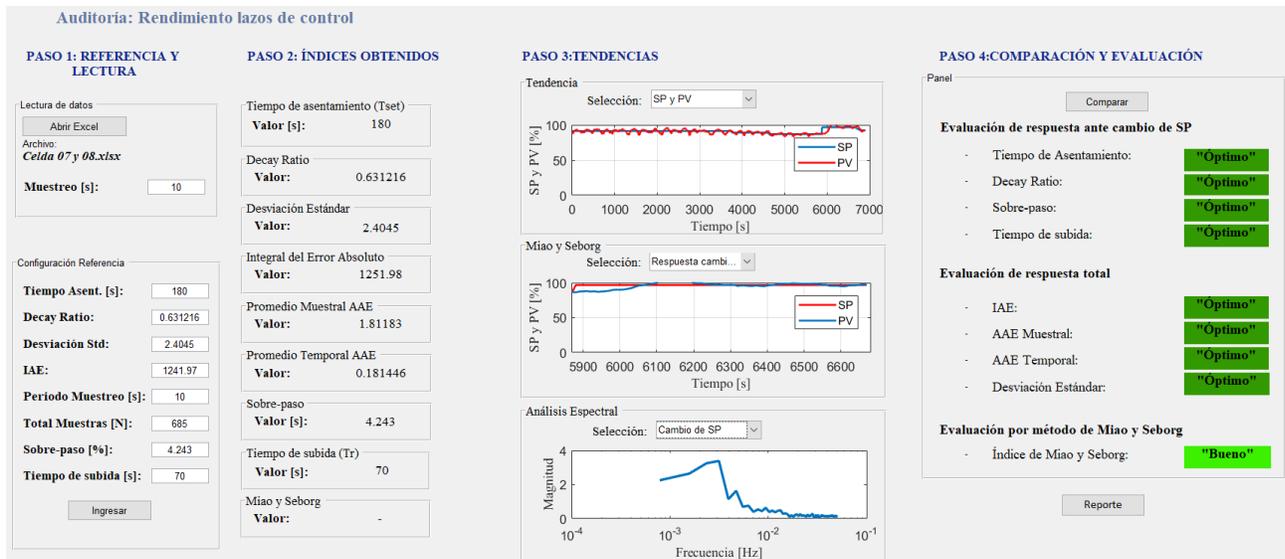


Fig. 6.7 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 4.

TABLA 6.5 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 4.

Índice (J_n)	Valor	Valor Índice Unitario (η_j)	Evaluación
Tiempo de asentamiento (T_{set})	180 [s]	1.0	Óptimo
Razón de amortiguamiento (d)	0.631216	1.0	Óptimo
Desviación Estándar	2.4045	1.0	Óptimo
Integral de Error Absoluto (IAE)	1241.97 [%]	1.0	Óptimo (*)
Promedio muestral IAE (AAE_N)	1.81183 [%]	1.0	Óptimo
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.181446 [%]	1.0	Óptimo
Sobrepaso (α)	4.243	1.0	Óptimo
Tiempo de subida (T_s)	70 [s]	1.0	Óptimo
Miao y Seborg (\mathcal{R})	-	-	Bueno

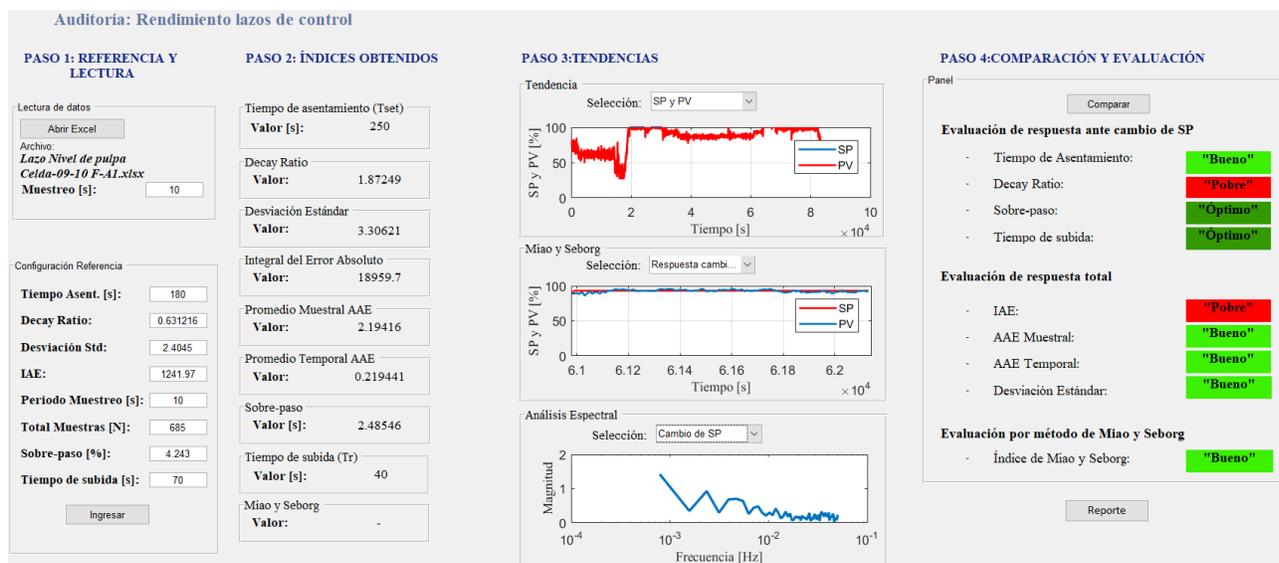


Fig. 6.8 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 5.

TABLA 6.6 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 5.

Índice (J_n)	Valor	Valor Índice Unitario (η_j)	Evaluación
Tiempo de asentamiento (T_{set})	250 [s]	0.72	Bueno
Razón de amortiguamiento (d)	1.87249	0.3371	Pobre
Desviación Estándar	3.30621	0.7273	Bueno
Integral de Error Absoluto (IAE)	18959.7 [%]	0.655	Pobre (*)
Promedio muestral IAE (AAE_N)	2.19416 [%]	0.8263	Bueno
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.219441 [%]	0.8262	Bueno
Sobre-paso (α)	2.48546	1.7071	Óptimo
Tiempo de subida (T_s)	40 [s]	1.75	Óptimo
Miao y Seborg (\mathcal{R})	-	-	Bueno

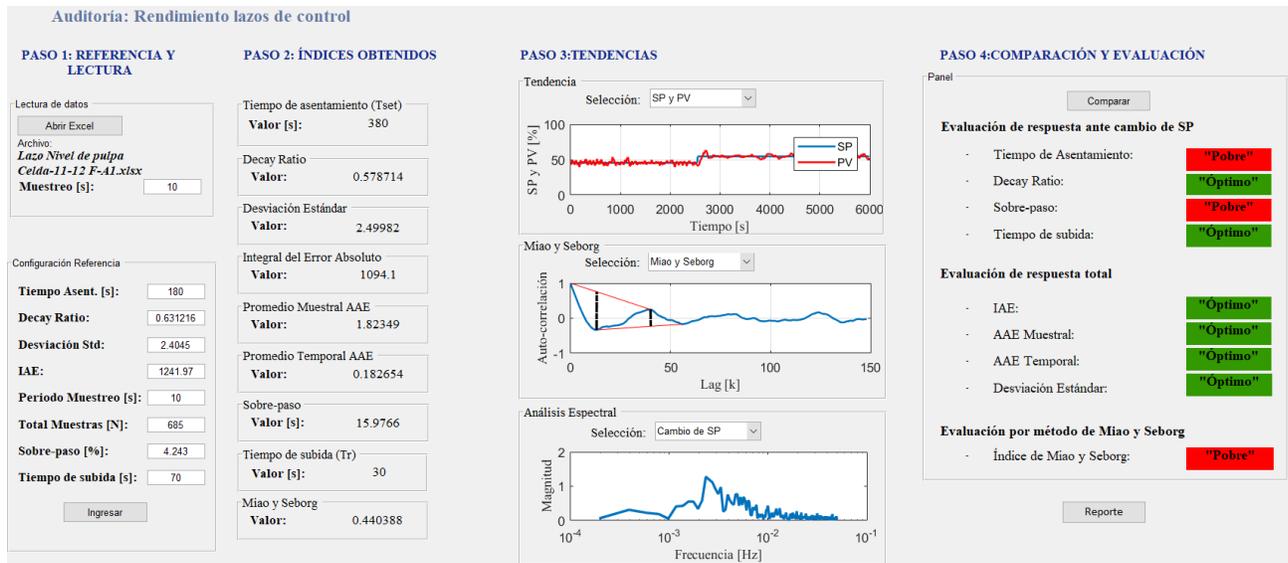


Fig. 6.9 Implementación programa de auditoría sobre lazo de control nivel 6.

TABLA 6.7 Índices obtenidos y evaluación de lazo nivel 6.

Índice (J_n)	Valor	Valor Índice Unitario (η_j)	Evaluación
Tiempo de asentamiento (T_{set})	380 [s]	0.4737	Pobre
Razón de amortiguamiento (d)	0.578714	1.0907	Óptimo
Desviación Estándar	2.49982	0.9619	Óptimo
Integral de Error Absoluto (IAE)	1094.1 [%]	1.1352	Óptimo (*)
Promedio muestral IAE (AAE_N)	1.82349 [%]	0.9943	Óptimo
Promedio temporal IAE (AAE_t)	0.182654 [%]	0.9926	Óptimo
Sobrepaso (α)	15.9766	0.2656	Pobre
Tiempo de subida (T_s)	30 [s]	2.3333	Óptimo
Miao y Seborg (\mathcal{R})	0.440388	0.9083	Pobre

(*) Para los resultados sobre el índice de Integral de Error Absoluto (IAE) se debe tener en cuenta que este valor es comparable en lazos que posean aproximadamente la misma cantidad de muestras en la prueba realizada. En la evaluación realizada, la cantidad de muestras tomadas para cada lazo son distintas, por lo que la evaluación en el índice IAE no es representativa de mejor o peor rendimiento a diferencia de los criterios promedio AAE.

Capítulo 7. Análisis y discusión de resultados sobre comportamiento de lazos

A continuación se realiza el análisis los resultados obtenidos de la evaluación por el programa de auditoría diseñado. El análisis se realizará para cada lazo de control de las dos líneas de flotación analizadas.

Para el análisis de rendimiento de celdas en líneas de flotación, es importante tener en cuenta la transmisión de oscilaciones debido a la alta dependencia de control entre las variables de las celdas de una línea, en relación a los lazos de control de nivel. Un ejemplo de éste fenómeno de transmisión de oscilaciones se produce, por ejemplo, si en la celda del nivel superior presenta mal rendimiento que ocasione que la válvula de salida se abra y se cierre de forma oscilatoria, provocará que el flujo de alimentación de la celda siguiente no sea constante, introduciendo dificultades para el control y produciendo oscilaciones, por lo que para realizar una corrección de los posibles problemas en la línea, es prioridad corregir las fallas en dirección desde la celda superior, hasta la celda final de la línea.



7.1. Lazo de nivel de pulpa 1

En primer lugar, es analizado el lazo de control de nivel de pulpa de la primera celda en la primera línea, con los valores obtenidos en la tabla 6.2; a continuación se revisarán los resultados de cada índice obtenidos del programa diseñado.

- Tiempo de asentamiento

El tiempo de asentamiento de este lazo de control en comparación al tiempo de asentamiento de la referencia establecida, es tan solo un 11% mayor en relación a la referencia. A través del índice unitario Jelali, se obtiene un valor de 0.9 calculado a través de la expresión de la ecuación 7.1.

$$\eta_{set} = \frac{T_{set_ref}}{T_{set_act}} = 0.9 \quad (7.1)$$

Donde,

T_{set_ref} : Tiempo de asentamiento de referencia.

T_{set_act} : Tiempo de asentamiento del lazo actual.

Lo que indica que este lazo de control, está en óptimo funcionamiento al evaluar con respecto a la referencia ($\eta_{set} \geq 0.9$), por lo que no se necesita mayor observación en este ámbito.

- **Razón de amortiguamiento**

La razón de amortiguamiento (relación entre dos sobrepasos de la respuesta) en este caso, corresponde al 90.14% del valor de referencia dado, lo que representa una mayor disminución de la magnitud de los sobrepasos en el tiempo, es decir, la respuesta posee una constante de amortiguamiento mayor para llegar así al estado estacionario.

El índice unitario Jelali para este criterio es de 1.1088, representando un rendimiento óptimo en relación a la referencia, por lo que no el lazo no necesita de mayor observación en este ámbito.

- **Desviación Estándar**

La desviación estándar determinada en este lazo es de características pobres, según el cálculo y comparación realizados con la referencia. Esto indica básicamente que el error, en promedio, está lejos de su valor medio. Este índice, en conjunto con los promedios del error AAE, servirá para identificar un mal rendimiento en la respuesta total del lazo de control.

- **Promedio muestral de error absoluto (AAE_N)**

El promedio muestral del error absoluto de la señal, muestra en términos de la respuesta total analizada, el rendimiento de la respuesta de control en el tiempo. Para este lazo, la evaluación para este índice fue determinada como “rendimiento justo”, es decir, que hay claramente mejoras para ejecutar en este lazo, observándolo en el contexto general promedio.

- **Promedio temporal de error absoluto (AAE_t)**

Al igual que el promedio muestral del error absoluto (AAE_N), el promedio temporal de error absoluto indica el rendimiento sobre la respuesta total analizada en el lazo de control actual. Al igual que el promedio muestral, la evaluación del promedio temporal indicó un rendimiento justo, indicando que hay mejoras por realizar en este lazo de control.

- **Sobrepaso**

En este lazo hay presente un sobrepaso del 23.68% del SP fijado, la literatura muestra que un

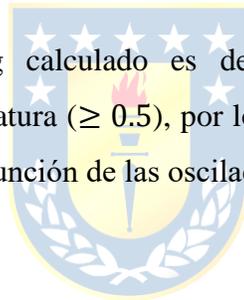
sobrepaso aproximadamente 4% u 8% es aceptado algunos lazos de control en los que se es permitido poseer sobrepasos. La referencia establecida posee un sobrepaso de 4.24%, provocando un resultado para el cálculo del índice unitario Jelali de sobrepaso de 0.18, equivalente a un rendimiento pobre y a un sobrepaso excesivo en la respuesta.

- **Tiempo de subida**

El tiempo de subida muestra el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar un valor cercano al SP, específicamente desde el 10% al 90%. Respuestas rápidas no siempre son equivalentes a un buen rendimiento en el control general, dado que usualmente conllevan una ganancia sobredimensionada, provocando un gran sobrepaso. Para este caso, el tiempo de subida es de 80 segundos, evaluado en un rendimiento “bueno”, evitando que se hagan más observaciones en este criterio.

- **Miao y Seborg**

El índice de Miao y Seborg calculado es de 0.646, correspondiente a una señal excesivamente oscilatoria según la literatura (≥ 0.5), por lo que el rendimiento es clasificado como “pobre” en relación a la estabilidad en función de las oscilaciones de la respuesta.



Resumen

t de asentamiento	Decay Ratio	Desviación Estándar	AAE_N	AAE_t	Sobrepaso	t de subida	Miao y Seborg
ÓPTIMO	ÓPTIMO	POBRE	JUSTO	JUSTO	POBRE	BUENO	POBRE

Fig. 7.1 Resumen de evaluación lazo de nivel 1.

Este lazo de control presenta buenas condiciones en los ámbitos de tiempo de asentamiento, tiempo de subida y razón de amortiguamiento, como se ve representado en la evaluación óptima de la tabla 6.2. Por lo que la respuesta se asienta en su valor de estado estacionario en un tiempo aceptable y amortiguadamente. Sin embargo, al observar la desviación estándar, promedios del error AAE, sobrepaso y tiempo de subida, se identifican otras características con rendimiento pobre o justo. A partir de estas características de mal rendimiento se demuestra que la respuesta de este lazo de control posee un sobrepaso excesivo correspondiente al 23.6%, y en promedio, posee más error que la referencia establecida.

Por otro lado, el índice de Miao y Seborg es de valor 0.646 e indica oscilaciones de gran

magnitud correspondientes a 5 ciclos oscilatorios de la señal de error en el tiempo, lo que es considerado una mala respuesta según la literatura, donde un índice de Miao y Seborg mayor a 0.5 no es aceptable (en este documento es ocupado 0.4 como límite).

El lazo necesita análisis de causa raíz para solucionar las oscilaciones identificadas. Por otro lado, al ser el primer lazo de la línea de flotación se debe dar mayor prioridad ya que sus oscilaciones podrían alterar el rendimiento de los lazos de control contiguos para dinámicas de reacción de control lentas, como lo son los lazos de nivel de pulpa en las celdas de flotación. La investigación de las fallas y problemas de rendimiento en este lazo promete mejoras en el rendimiento. Finalmente a partir de los resultados obtenidos es evaluado el lazo de forma general clasificando el rendimiento del lazo como “pobre”.

7.2. Lazo de nivel de pulpa 2

En segundo lugar, es analizado el lazo de control de nivel de pulpa de la segunda celda en la primera línea de flotación a partir de los valores obtenidos en la tabla 6.3; se estudiarán los resultados de cada índice obtenidos a partir del programa diseñado.

- **Tiempo de asentamiento**

El tiempo de asentamiento de este lazo de control en comparación al tiempo de asentamiento de la referencia establecida, es un 38.8% mayor. A través del índice unitario Jelali, se obtiene un valor de 0.72, indicando que el rendimiento en función del tiempo de asentamiento es bueno, lo que quiere decir que el lazo está operando adecuadamente en este aspecto, pero puede mejorarse. No hay mayores observaciones en este criterio.

- **Razón de amortiguamiento**

La relación entre los dos primeros sobrepasos consecutivos en la señal de respuesta, luego del cambio de SP, presenta condiciones óptimas de rendimiento para éste lazo. La razón de amortiguamiento para este lazo posee un valor de 0.274, correspondiente a un valor de índice unitario Jelali de 2.3041, valor que representa mejor rendimiento que la referencia establecida. Sin embargo, este índice debe ser analizado en conjunto con los demás criterios para una evaluación certera, debido a que la razón de amortiguamiento solo analiza los dos primeros sobrepasos.

- **Desviación Estándar**

La desviación estándar corresponde a la desviación promedio del error con respecto a su valor medio. En este lazo la desviación estándar tiene un valor de 3.205, valor similar a la referencia, y que al calcular el índice unitario, se obtiene un valor de 0.75, correspondiente a una evaluación de rendimiento “buena” con respecto a la referencia según los rangos planteados, por lo que no se realizarán mayores observaciones en este criterio.

- **Promedio muestral del error absoluto (AAE_N)**

Analizando el total de datos, se tiene que el promedio muestral del error absoluto es catalogado como “buen” rendimiento, a partir del índice unitario calculado y el valor de referencia establecido, por lo que no se realizarán mayores observaciones de este criterio.

- **Promedio temporal del error absoluto (AAE_t)**

El promedio temporal del error absoluto obtenido a partir de todos los datos muestreados posee un valor de 0.228 [%], correspondiente a un índice unitario de 0.79, evaluado en rendimiento “bueno”. En otras palabras, el lazo está operando adecuadamente, pero hay algunos componentes de rendimiento que pueden ser mejorados, a partir de este criterio.

- **Sobrepaso**

En este lazo hay presente un sobrepaso del 8.69% del SP fijado, la literatura muestra que un sobrepaso aproximadamente 4% u 8% es aceptado sobre algunos lazos de control en los que se es permitido poseer sobrepasos, sin embargo, la referencia establecida posee un sobrepaso de 4.24%, provocando un resultado para el cálculo del índice unitario Jelali de sobrepaso de 0.4884, equivalente a un rendimiento pobre y a un sobrepaso excesivo en la respuesta. Es necesario realizar análisis de causa raíz para la disminución de este criterio.

- **Tiempo de subida**

El tiempo de subida muestra el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar un valor cercano al SP, específicamente desde el 10% al 90%. Respuestas rápidas no siempre son equivalentes a un buen rendimiento en el control general, dado que usualmente conllevan una ganancia del controlador sobredimensionada, provocando un gran sobrepaso. Para este caso, el tiempo de subida

es de 100 segundos, evaluado en un rendimiento “bueno”, por lo que no se harán más observaciones.

- Miao y Seborg

El índice de Miao y Seborg es capaz de identificar oscilaciones durante más de dos periodos a diferencia de la razón de amortiguamiento, en este caso el índice calculado es de 0.528, correspondiente a una señal excesivamente oscilatoria según la literatura (≥ 0.5), por lo que el rendimiento es clasificado como “pobre” en relación a la estabilidad en función de las oscilaciones de la respuesta.

Resumen

t de asentamiento	Decay Ratio	Desviación Estándar	AAE_N	AAE_t	Sobrepaso	t de subida	Miao y Seborg
JUSTO	ÓPTIMO	BUENO	BUENO	BUENO	POBRE	POBRE	POBRE

Fig. 7.2 Resumen de evaluación lazo de nivel 2.

Este lazo de control de nivel presenta buenas condiciones en algunas características de su respuesta y de su curva general, como lo son el tiempo de asentamiento, razón de amortiguamiento, desviación estándar y promedios del error absoluto. Sin embargo, este lazo posee un mal rendimiento en relación a su sobrepaso excesivo (8.69%), tiempo de subida lento y oscilaciones continuas a lo largo del tiempo, demostrado a partir del índice de Miao y Seborg de valor 0.528. Si bien el lazo posee un tiempo de asentamiento aceptable o justo, el índice de Miao y Seborg indica que este asentamiento no perdura en el tiempo.

En términos generales, este lazo de control no está trabajando a todo su potencial. El lazo de control opera adecuadamente dentro de los rangos generales de rendimiento aceptables pero hay presente un claro potencial de mejora en término de oscilaciones. Por otro lado, es posible que esta evaluación esté dependiendo del rendimiento del lazo anterior, por lo que es necesario realizar una mejora sobre el lazo de nivel de pulpa anterior para determinar la causa raíz del problema de rendimiento de este lazo. La evaluación general de este lazo es clasificada como “justa”.

7.3. Lazo de nivel de pulpa 3

En tercer lugar, es analizado el lazo de control de nivel de pulpa de la tercera celda en la

primera línea de flotación a partir de los valores obtenidos en la tabla 6.4; se estudiarán los resultados de cada índice obtenido del programa diseñado.

- **Tiempo de asentamiento**

El tiempo de asentamiento de este lazo de control en comparación al tiempo de asentamiento de la referencia establecida, es un 44.45% menor. A través del índice unitario Jelali, se obtiene un valor de 2.25, indicando que el rendimiento en función del tiempo de asentamiento es óptimo, mejor que la referencia. El lazo está operando de manera óptima en este aspecto. No hay mayores observaciones en este criterio.

- **Razón de amortiguamiento**

La relación entre los dos primeros sobrepasos consecutivos en la señal de respuesta, luego del cambio de SP, presenta condiciones “buenas” de rendimiento para éste lazo. La razón de amortiguamiento para este lazo posee un valor de 0.72, correspondiente a un valor de índice unitario Jelali de 0.875, valor que representa un rendimiento cercano a la referencia establecida. Sin embargo, este índice debe ser analizado en conjunto con los demás criterios para una evaluación certera, debido a que la razón de amortiguamiento solo analiza los dos primeros sobrepasos del error, es posible que la razón de amortiguamiento tenga características óptimas, pero sin embargo el rendimiento total del lazo de control no sea óptimo.

- **Desviación Estándar**

La desviación estándar corresponde a la desviación promedio del error con respecto a su valor medio. En este lazo la desviación estándar tiene un valor de 4.31, casi el doble a la referencia, al calcular el índice unitario Jelali para este criterio, se obtiene un valor de 0.5577, correspondiente a una evaluación de rendimiento “justa” con respecto a la referencia según los rangos planteados. A partir de este resultado se concluye que el lazo no está trabajando a todo su potencial en términos de su respuesta total, la desviación promedio con respecto al error está fuera del rango óptimo, por lo que es recomendado analizar las causas raíces del problema para así mejorar el rendimiento.

- **Promedio muestral del error absoluto (AAE_N)**

El promedio muestral del error absoluto de la señal muestra el comportamiento del lazo de

control en términos de la respuesta total analizada. Para este lazo, la evaluación de este índice fue determinada como rendimiento “bueno” con un valor de 2.278%, siendo un valor cercano a la referencia. Se concluye que el lazo está trabajando adecuadamente con respecto a la curva de respuesta total.

- **Promedio temporal del error absoluto (AAE_t)**

El promedio temporal del error absoluto obtenido a partir de todos los datos muestreados en este lazo posee un valor de 0.22786 [%], correspondiente a un índice unitario de 0.796, evaluado en rendimiento “bueno” al igual que el promedio muestral del error. En otras palabras, el lazo está operando adecuadamente en el ámbito general, pero hay algunos componentes de rendimiento que pueden ser mejorados.

- **Sobrepaso**

Al determinar el sobrepaso en la curva de respuesta ante cambio de SP de este lazo, se obtiene un valor de 5.25057 de sobrepaso, el cual es muy cercano al valor de referencia establecido. A través del índice unitario Jelali, se evaluó el rendimiento de sobrepaso en este lazo de control como “bueno”, con un índice unitario de 0.8081, lo que muestra que el sobrepaso observado es aceptable con respecto a la referencia.

- **Tiempo de subida**

El tiempo de subida muestra el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar un valor cercano al SP, específicamente desde el 10% al 90%. Para este caso, el tiempo de subida es de 40 segundos, mucho menor que el tiempo de subida de referencia, lo que representa una respuesta rápida y de evaluación “óptima” para el valor de comparación fijado.

- **Miao y Seborg**

El índice de Miao y Seborg es capaz de identificar oscilaciones durante más de dos periodos, a diferencia de la razón de amortiguamiento. En este caso el índice calculado es de 0.584, correspondiente a una señal excesivamente oscilatoria según la literatura (≥ 0.5), por lo que el rendimiento es clasificado como “pobre” en relación a la estabilidad en función de las oscilaciones de la respuesta.

Resumen

t de asentamiento	Decay Ratio	Desviación Estándar	AAE_N	AAE_t	Sobrepaso	t de subida	Miao y Seborg
ÓPTIMO	BUENO	JUSTO	BUENO	BUENO	BUENO	ÓPTIMO	POBRE

Fig. 7.3 Resumen de evaluación lazo de nivel 3.

El lazo de control de nivel de pulpa 3 posee buen rendimiento en casi todos los criterios evaluados, excepto sobre el índice de Miao y Seborg, el cual posee un valor 0.584. Si bien el lazo posee buen rendimiento en los criterios sobre la curva total y sobre la respuesta ante cambio de SP, el índice de Miao y Seborg indica que la respuesta de control en este lazo presenta oscilaciones continuas, a pesar de las buenas evaluaciones en otros criterios.

En términos generales, este lazo de control está trabajando adecuadamente según las expectativas, pero no está trabajando a todo su potencial. Hay claramente presentes componentes oscilatorias sobre la respuesta del lazo, comprobables a través del índice de Miao y Seborg determinado. Dos alternativas de acción son formuladas, la primera alternativa es continuar con la situación actual del lazo sin modificar y mantener el rendimiento actual, la segunda alternativa es concentrar esfuerzos en determinar la fuente de las oscilaciones para alcanzar un rendimiento óptimo en el lazo. La evaluación general de rendimiento para este lazo es considerada como “buena”.

7.4. Lazo de nivel de pulpa 4

Al observar los índices para el lazo de nivel de pulpa 4, se concluye que es el lazo de mejor comportamiento transiente y estacionario. Si bien los índices no son los menores en cada criterio en comparación a los demás lazos, en promedio, es el mejor rendimiento general obtenido en los lazos analizados.

t de asentamiento	Decay Ratio	Desviación Estándar	AAE_N	AAE_t	Sobrepaso	t de subida	Miao y Seborg
ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	BUENO

Fig. 7.4 Resumen de evaluación lazo de nivel 4.

Los valores de los índices calculados en este lazo son establecidos como referencia para la evaluación de rendimiento de este informe, por lo que el rendimiento de este lazo será evaluado

como “óptimo” en todos los criterios de evaluación a través del programa diseñado. En la tabla 6.5 se pueden observar los valores de índices determinados de este lazo, siendo los mismos valores que la tabla 6.1 correspondiente a los valores de referencia.

7.5. Lazo de nivel de pulpa 5

A continuación es realizado el análisis, evaluación y conclusiones de rendimiento del lazo de control de nivel de pulpa 5, correspondiente a la segunda celda de la segunda línea de flotación, a través de los resultados entregados en el programa de auditoría diseñado. Los resultados obtenidos son analizados a partir de la tabla 6.6.

- **Tiempo de asentamiento**

El tiempo de asentamiento determinado por el programa de auditoría es de 250s, el cual es un 38.889% mayor que el tiempo de asentamiento de referencia. Al determinar el índice unitario Jelali, se obtiene un resultado de 0.72, evaluado como un rendimiento “bueno” para los rangos de evaluación establecidos. Como el programa de auditoría muestra un buen rendimiento para este criterio, no se realizan mayores observaciones, sin embargo es importante tener en cuenta que un “buen” rendimiento en el programa de auditoría aún representa una posibilidad de mejora si se identifica y soluciona la causa del problema.

- **Razón de amortiguamiento**

Al observar la razón de amortiguamiento en este lazo de control, se observa que la razón entre las dos primeros sobrepasos al cambiar de SP, es de 1.87, valor mucho mayor en comparación a la referencia de valor 0.63. El programa determina un índice unitario de 0.34 para este criterio, demostrando un rendimiento pobre en cuanto al amortiguamiento de oscilaciones en la respuesta ante cambio de SP. La mejora de la falla que provoca este rendimiento promete mejoras de rendimiento significativas.

- **Desviación Estándar**

La desviación estándar corresponde a la desviación con respecto al valor medio del error. En este lazo la desviación estándar tiene un valor de 3.31, casi el doble a la referencia, al calcular el

índice unitario Jelali para este criterio, se obtiene un valor de 0.727, correspondiente a una evaluación de rendimiento “buena” con respecto a la referencia según los rangos planteados. A partir de esto se concluye que el lazo está trabajando adecuadamente, dentro de los rangos permitidos en términos de su respuesta total, sin embargo, el rendimiento puede mejorar.

- **Promedio muestral del error absoluto (AAE_N)**

El promedio muestral del error absoluto de la señal, muestra el comportamiento del lazo de control en términos de la respuesta total. Para este lazo, la evaluación de este índice fue determinada como rendimiento “bueno” con un valor de 2.19%, siendo un valor cercano a la referencia. Se concluye que el lazo está trabajando adecuadamente con respecto a la curva de respuesta total.

- **Promedio temporal del error absoluto (AAE_t)**

El promedio temporal del error absoluto obtenido a partir de todos los datos muestreados posee un valor de 0.2194%, correspondiente a un índice unitario de 0.796, evaluado en rendimiento “bueno”, al igual que el promedio muestral del error. En otras palabras, el lazo está operando adecuadamente en el ámbito general, pero hay algunos componentes que pueden ser mejorados.

- **Sobrepaso**

Luego de determinar el sobrepaso en la curva de respuesta ante cambio de SP de este lazo, se obtiene un valor de 2.485, el cual es menor al sobrepaso de la referencia. A través del índice unitario Jelali, es evaluado el sobrepaso como criterio de rendimiento, dando como resultado un rendimiento óptimo. En consecuencia de la evaluación óptima a través del programa de auditoría, se considera que el criterio de sobrepaso no necesita atención por ahora.

- **Tiempo de subida**

El tiempo de subida muestra el tiempo que tarda la respuesta en alcanzar un valor cercano al SP, específicamente desde el 10% al 90%. Para este caso, el tiempo de subida es de 40 segundos, mucho menor que el tiempo de subida de referencia, lo que representa una respuesta rápida y de evaluación “óptima” para el valor de comparación fijado.

- **Miao y Seborg**

El programa intenta determinar el índice de Miao y Seborg, pero no es posible debido a la poca cantidad de oscilaciones. En estos casos el criterio de Miao y Seborg es evaluado como

“bueno”, debido que al no ser posible calcular el índice, el lazo demuestra no poseer la cantidad de oscilaciones necesarias para efectuar el algoritmo, indicando que el lazo de control no posee oscilaciones excesivas.

Resumen

t de asentamiento	Decay Ratio	Desviación Estándar	AAE_N	AAE_t	Sobrepaso	t de subida	Miao y Seborg
BUENO	POBRE	BUENO	BUENO	BUENO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	BUENO

Fig. 7.5 Resumen de evaluación lazo de nivel 5.

Como se puede observar en la figura 7.5; 5 criterios evaluados han dado como resultado buen rendimiento y 2 criterios han resultado en rendimiento óptimo. La presencia de indicadores en verde es determinada por el cumplimiento de la desigualdad mostrada en la ecuación 7.1, expresión que proviene a partir de la definición de los rangos de evaluación, en los capítulos anteriores.

$$J_{act} \leq \frac{j_{ref}}{0.7} \quad (8.1)$$

A pesar de poseer una razón de amortiguamiento calificada como “pobre”, este lazo presenta 7 de sus 8 indicadores en verde, representando buenas condiciones de operación y de rendimiento de control.

En general, al evaluar el índice de Miao y Seborg como “bueno” (índice de rendimiento sobre 0.7), se descarta la presencia de oscilaciones excesivas sobre la respuesta ante cambio de SP, aumentando notoriamente las consideraciones positivas durante una evaluación de comportamiento, luego, el análisis final se realiza observando los demás criterios. La evaluación general para este lazo es considerada como “buena”.

7.6. Lazo de nivel de pulpa 6

Finalmente es analizado el lazo de nivel de pulpa 6, correspondiente al nivel de pulpa de la tercera celda de flotación de segunda línea. Los valores de los índices de rendimiento calculados para este lazo se observan en la tabla 6.7. A continuación se analizarán y dará una evaluación general de este lazo a partir de los criterios evaluados.

- **Tiempo de asentamiento**

El tiempo de asentamiento determinado por el programa de auditoría para este lazo es de 380s, este valor es un 111.11% mayor a la referencia. Determinando el índice Jelali, se obtiene un valor de 0.4737, representando un rendimiento pobre en este criterio, de acuerdo a la lentitud que tarda la respuesta en asentarse en un rango de valores, para llegar a estado estacionario. La evaluación pobre en este criterio puede llevar al aumento del error promedio e indicar oscilaciones excesivas. Es necesario realizar análisis de causa raíz para la disminución de este criterio.

- **Razón de amortiguamiento**

Durante la implementación del programa de auditoría para este lazo, se obtiene una razón de amortiguamiento de valor 0.5787, el cual es menor que la referencia fijada de 0.6312 y representa la razón entre los dos primeros sobrepasos luego de un cambio escalón en el SP. Al determinar el índice unitario se obtiene un valor de 1.09, demostrando que para este criterio, este lazo posee mejor rendimiento que la referencia. Al poseer un rendimiento óptimo, este criterio no requiere de más atención por ahora.



- **Desviación Estándar**

La desviación estándar corresponde a la desviación con respecto al valor medio del error. En este lazo la desviación estándar tiene un valor de 2.499, muy similar a la referencia, al calcular el índice unitario Jelali para este criterio, se obtiene un valor de 0.962, correspondiente a una evaluación de rendimiento “óptima” con respecto a la referencia según los rangos planteados, por lo que se concluye que el lazo está trabajando adecuadamente y está dentro de los rangos permitidos en términos de su respuesta total.

- **Promedio muestral del error absoluto (AAE_N)**

El promedio muestral del error absoluto de la señal, muestra el comportamiento del lazo de control en términos de la respuesta total. Para este lazo, la evaluación de este índice fue determinada como rendimiento “óptimo” con un valor de 1.823%, siendo un valor cercano a la referencia y con un índice unitario de 0.99. Se concluye que el lazo está trabajando adecuadamente con respecto a la curva de respuesta total y no tiene mayores desviaciones en promedio en su respuesta.

- **Promedio temporal del error absoluto (AAE_t)**

El promedio temporal del error absoluto obtenido a partir de todos los datos muestreados posee un valor de 0.182%, correspondiente a un índice unitario de 0.99, evaluado en rendimiento “óptimo”, al igual que el promedio muestral del error. En otras palabras, el lazo está operando de forma óptima en el ámbito general y no necesita revisión en aspectos generales.

- **Sobrepaso**

Luego de determinar el sobrepaso en la curva de respuesta ante cambio de SP de este lazo, se obtiene un valor de 15.98, estando claramente fuera del rango de 4% a 8% propuesto por la literatura [7] y fuera del rango propuesto por la referencia establecida. A través del índice unitario Jelali, es evaluado el sobrepaso como criterio de rendimiento, dando un resultado de rendimiento pobre con un valor de rendimiento de 0.2656. En consecuencia el lazo posee excesivo sobrepaso, por lo que debe investigarse la falla y corregir este aspecto del lazo de control para así mejorar el rendimiento del lazo de control significativamente.

- **Tiempo de subida**

El tiempo de subida para este lazo de control es evaluado como óptimo por el programa. Este tiempo considera el intervalo que tarda la respuesta en alcanzar un valor cercano al SP, específicamente desde el 10% al 90%, el cual para este caso es de 30s, evaluado como óptimo. Un tiempo de subida demasiado corto suele conllevar problemas en el sobrepaso de la respuesta de control, situación que se ve observada en el análisis del criterio de sobrepaso de este lazo. Se debe investigar la falla que produce el valor alto para este indicador, la investigación de la falla promete mejoras significativas en el rendimiento.

- **Miao y Seborg**

Finalmente, es analizado el índice de Miao y Seborg, el cual es capaz de identificar oscilaciones durante más de dos periodos, a diferencia de la razón de amortiguamiento. En este caso el índice calculado es de 0.4403, lo cual no corresponde a una señal excesivamente oscilatoria según la literatura (≥ 0.5), pero para el valor de referencia establecido (0.4) si constituye un mal rendimiento en términos de oscilaciones.

Resumen

t de asentamiento	Decay Ratio	Desviación Estándar	AAE_N	AAE_t	Sobrepaso	t de subida	Miao y Seborg
POBRE	ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	ÓPTIMO	POBRE	ÓPTIMO	POBRE

Fig. 7.6 Resumen de evaluación lazo de nivel 6.

El lazo de control de nivel de pulpa 6 posee un buen rendimiento general, 5 de los 8 criterios son óptimos ($\eta > 0.9$), los cuales son: razón de amortiguamiento, desviación estándar, promedios del error absoluto y tiempo de subida. Al observar los resultados de evaluación óptima, se observa que 3 de los 5 criterios óptimos son criterios de evaluación sobre la curva total de respuesta, por lo que se concluye que este lazo posee buen rendimiento en términos generales.

En función de la respuesta transiente, este lazo de control no posee buen rendimiento, tiene un sobrepaso excesivo de 15.98, el cual es un 276% mayor que el sobrepaso de referencia, el tiempo de asentamiento es un 111% mayor que la referencia y el índice de Miao y Seborg es evaluado como pobre. A través de estas evaluaciones negativas se deduce que el lazo de control posee sostenidas oscilaciones en su respuesta (Miao y Seborg) y que su respuesta transiente es de mal rendimiento, probablemente por problemas de sintonización y oscilaciones debido a dependencia con lazos de control anteriores o problemas de instrumentación.

En resumen, el lazo está trabajando a un nivel aceptable, debido a que en su respuesta total posee un buen rendimiento, sin embargo en su respuesta transiente posee un rendimiento pobre. El lazo está operando de forma adecuada, pero hay algunos componentes de rendimiento que pueden ser mejorados, para así mejorar su rendimiento en la respuesta transiente. La evaluación general para este lazo es “justa”.

Capítulo 8. Conclusiones

8.1. Sumario

En este trabajo se ha realizado una revisión bibliográfica centrada en los aspectos y principios de operación de un sistema CPM, índices de rendimiento y auto-sintonización PID por software. Por otro lado, fue elaborado un capítulo resumiendo y describiendo los principios generales del monitoreo de lazos de control a través de sistemas CPM.

Se realizó el diseño e implementación de un programa de auditoría para medición y evaluación de rendimiento en lazos de control, a través del software Matlab, estableciendo metodologías y programación para el cálculo de 9 índices de rendimiento, de los cuales 5 están basados en la curva de respuesta del error ante cambio de SP y 4 basados en la curva de error total. En conjunto a la programación es diseñada e implementada una interfaz gráfica para el programa, diseñada a través complemento Matlab Guide.

La implementación del programa de auditoría fue efectuada sobre datos de simulación, y sobre datos reales de 6 lazos de control de nivel de pulpa. Estos datos son leídos a través de un archivo Excel y corresponden a las variables de SP y PV en una ventana de tiempo en la que hay presente un cambio de tipo escalón en el SP.

Finalmente, fue realizado un análisis y evaluación de rendimiento en términos de los resultados desplegados en el programa de auditoría, basándose en los índices de rendimiento determinados para cada uno de los 6 lazos de control, realizando tanto el análisis por criterio de evaluación, como una evaluación resumen de cada lazo. Con la evaluación del estado actual de los lazos de control analizados se dejan registradas las condiciones actuales de comportamiento para una contrastación futura, en caso de implementar alguna mejora en el sistema de control de la planta de flotación.

8.2. Conclusiones

Se logró diseñar e implementar exitosamente un programa de auditoría para la evaluación de comportamiento de lazos de control. El programa operó en condiciones de planta para la evaluación de rendimiento de 6 lazos de control de nivel de pulpa.

Los resultados demuestran que el 50% de los lazos de control analizados entran dentro de una evaluación de rendimiento pobre o justa, en su rendimiento global. El otro 50% posee un rendimiento bueno u óptimo. A partir de estos resultados, se concluye que hay una oportunidad de mejora, la cual consiste en hallar la causa raíz de las oscilaciones y mal rendimiento del 83.3% de los lazos analizados en el proceso de flotación, los cuales corresponden a lazos con rendimiento inferior a óptimo, con el objetivo de alcanzar rendimiento óptimo general (índices de rendimiento > 0.9) en cada lazo analizado.

En términos del rendimiento sobre la curva de error total, 5 de 6 lazos presentan rendimiento similar, establecido como bueno u óptimo ($\eta > 0.7$), según la referencia dada como el lazo de mejor rendimiento de los 6.

En términos del rendimiento sobre la respuesta transiente, luego de un cambio de SP como escalón, 4 de 6 lazos de control poseen al menos 1 criterio de este tipo con evaluación pobre, demostrando que el 66.6% de los lazos de control analizados poseen un mal rendimiento transiente.

Como indicador principal de oscilaciones excesivas, el índice de Miao y Seborg indica que 4 de 6 lazos de control analizados poseen un índice de Miao y Seborg menor a 0.4, representando oscilaciones excesivas sobre la señal de error, luego del cambio de SP.

Se establecen las condiciones actuales de los lazos de control de nivel de pulpa analizados, a través de la evaluación del programa de auditoría, como evaluación pobre para el lazo 1, evaluación justa para lazo 2 y 6, evaluación buena para lazo 3 y 5, y finalmente óptimo rendimiento para lazo 4. Esta evaluación representará la base de referencia a futuro, para la medición del aumento de rendimiento a través de mejoras en el sistema de control de la planta, como lo puede ser un software CPM.

8.3. Trabajo Futuro

Con el programa e información presentados en este documento, es posible tener claridad sobre algunos aspectos de la metodología de cálculo, programación y evaluación de índices de rendimiento en lazos de control, además del análisis de rendimiento de una planta real de flotación del cobre. A partir de esta información, es posible continuar con la implementación del programa diseñado posterior a la implementación de un sistema de mejora en la planta analizada, para así evaluar la mejora lograda.



Bibliografía

- [1] W. Silva and R. Fernandes. “Análise de Sistema de Aquisicao de dados para controle de procesos,” Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2016.
- [2] I. Herrera, G. Gómez, J. Rodríguez, E. Lugo and J. Pacheco. “Aplicación para el Monitoreo y Control de Procesos Industriales Basada en el Estándar de Comunicaciones OPC,” *Revista Ingeniería UC*, vol. 15, no 3, pp. 7-18, 2008.
- [3] V. Bobál, J. Bohm, J.Fessl and J. Macháček, *Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Applications*. Germany: Springer Science & Business Media, Mar. 2006.
- [4] O’Dwyer, *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. London: Imperial College Press, 2009.
- [5] K. Astrom and T. Hagglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. USA: Instrument Society of America, 1994.
- [6] M. Jelali. “Control System Performance Monitoring: Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance in Industrial Automation”, Doctor’s thesis, University Duisburg-Essen, Duisburg, Germany, 2010.
- [7] M. Jelali and B. Huang, *Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops*. Germany: Springer Science & Business Media, Mar. 2009.
- [8] T. Miao and E. Seborg. “Automatic Detection of Excessively Oscillatory Feedback Control Loops”, International Conference on Control Applications, USA, Aug 22-27, 1999, [8].
- [9] N. Vatanskia, S-L. Jämsä-Jounelaa, A. Rantalac and T. Harjub. “Control Loop Performance Measures In The Evaluation of Process Economics”, Laboratory of Process Control and Automation Kemistintie 102150 Espoo, Finland, 2005.
- [10] J. Stoustrup, M. Grimble and H. Niemann. “Design of Integrated Systems for the Control and Detection of Actuator/Sensor Faults,” *Sensor Review*, pp. 138-149, 1997.
- [11] N.F. Thornhill, B. Huangb and H. Zhangc. “Detection of multiple oscillations in control loops,” *Journal of Process Control*, vol. 13, pp 91–100, 2003.

- [12] M. Choudhury, L. Shah and N. Thornhill, "Diagnosis of poor control-loop performance using higher-order statistics," *Automatica*, vol. 40, pp 1719-1728, 2004.
- [13] R. Burch, "Monitoring and Optimizing PID Loop Performance," in *ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society Expo*, Houston, 2004.



Anexo A. Código Matlab de programa de auditoría

```

%CÓDIGO DE PROGRAMA MEDICIÓN DE RENDIMIENTO E INTERFAZ GRÁFICA
%AUTOR: DIEGO JARA CÁRDENAS
%MEMORIA DE TITULO 2017
%INGENIERIA CIVIL ELECTRÓNICA

function varargout = interfaz_grafica(varargin)
% INTERFAZ_GRAFICA MATLAB code for interfaz_grafica.fig

% Last Modified by GUIDE v2.5 03-Nov-2017 20:48:54

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',  gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @interfaz_grafica_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @interfaz_grafica_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',   []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before interfaz_grafica is made visible.
function interfaz_grafica_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
handles.FileName= 0;
handles.output = hObject;
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = interfaz_grafica_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
[handles.FileName Path]= uigetfile({'*.xls;*.xlsx'}, 'Seleccionar archivo excel
con datos');
if isequal(handles.FileName,0)
    return
else
    %Lectura de datos a través de archivo excel (.xls y .xlsx)
    set(handles.text14, 'String', handles.FileName)
    cd(Path)
    datos= xlsread (handles.FileName);
    no_miao=0; %Indicador Miao y Seborg

```

```

lim= 100; %Máximo de la señal
handles.OP= datos(:,1)./lim*100;
handles.PV= datos(:,2)./lim*100;
handles.SP= datos(:,3)./lim*100;
handles.OP= handles.OP';
handles.PV= handles.PV';
handles.SP= handles.SP';
handles.T= 0.1; %Muestreo de la señal
T= handles.T;
handles.t= (0:length(handles.SP)-1)*T; %Definición de tiempo

%Filtrado por media movil de orden N:
N= 2; %Orden de filtro
PV_filt= zeros(1,length(handles.PV)-(N-1));
for i=N:length(handles.PV)
    num= 0;
    for j=0:N-1
        num= handles.PV(i-j)+num; %Numerador de filtro media movil
    end
    PV_filt(i)=num/N; %Valor variable filtrada.
end
%handles.PV= PV_filt; %asignación de variable filtro

handles.e= handles.SP-handles.PV; %Calculo de error de control

%Grafico inicial, SP y PV
axes(handles.axes1)
cla
plot(handles.t,handles.SP,'LineWidth',1.5)
hold on
plot(handles.t,handles.PV,'r','LineWidth',1.5)
grid on
legend('SP','PV')
ylim([0 100])
xlabel('Tiempo [s]','FontName','Times New Roman')
ylabel('SP y PV [%]','FontName','Times New Roman')

%CÁLCULO DE ÍNDICES
SP_f= handles.SP;
OP_f= handles.OP;
PV_f= handles.PV;
t= handles.t;
e= handles.e;

%Determinación de instante de cambio de SP
inic= 200; %Instante de inicio de busqueda
fin= 0; %Detección del primer cambio
for i=inic:length(SP_f)-1
    if SP_f(i) ~= SP_f(i+1) && fin == 0
        T_SP= i; %Detección de instante de cambio
        fin= 1; %Fin de busqueda
    end
end
end
T_f= 0.8*200; %Tiempo final de busqueda oscilaciones
%Almacenando tiempos
handles.T_f= T_f; %Tiempo final de oscilaciones.
handles.T_SP= T_SP; %Detección de instante de cambio.

```



```

%Detección intersección con 0
det_0= 0;
for i=T_SP+2:T_SP+T_f
    if PV_f(i) >= SP_f(i) && det_0==0
        t_0= i;
        det_0= 1;
    end
end
%%MEDICIÓN TIEMPO DE SUBIDA (Rise Time T_r)
%Búsqueda de instantes
for i=T_SP:t_0
    if 0.0*SP_f(inic) <= PV_f(i) && (PV_f(i)-SP_f(inic)) <=0.1*(SP_f(i)-
SP_f(inic))
        PV_10_f= PV_f(i);
        t_10_f= i;           %Instante de 10% de SP
    end
    if 0.75*(SP_f(i)- SP_f(inic)) <= (PV_f(i)-SP_f(inic)) && (PV_f(i)-
SP_f(inic)) <= 0.9*(SP_f(i)- SP_f(inic))
        PV_90_f= PV_f(i);
        t_90_f= i;           %Instante de 90% de SP
    end
end
handles.rise_time= (t_90_f-t_10_f)*T;           %Tiempo de subida
set(handles.text17, 'String', handles.rise_time)

% MEDICIÓN TIEMPO DE ASENTAMIENTO (T_set)
%Determinación de instante de estabilización
fin= 0;
for i=T_SP:T_SP+T_f-3
    if abs(e(i))<=1 && abs(e(i+1))<=1.5 && abs(e(i+2))<=1 && abs(e(i+3))<=1.5 &&
fin==0
        t_set= i*0.1;
        fin= 1;
    end
end
handles.asentamiento= t_set-T_SP*0.1;
set(handles.text27, 'String', handles.asentamiento)

% MEDICIÓN DECAY RATIO
%Determinando posición y valores de peaks
pasol= 0;
paso2= 0;
fin= 0;
%Busqueda de cruces por 0
for i=(T_SP+5):(T_SP+T_f-1)
    if sign(e(i)) ~= sign(e(i+1)) && pasol==0 && paso2==0 && fin==0
        pasol=1;
        tpasol= i;
    elseif (sign(e(i)) ~= sign(e(i+1))) && pasol==1 && paso2==0 && fin==0
        paso2=1;
        tpaso2= i;
    elseif (sign(e(i)) ~= sign(e(i+1))) && pasol==1 && paso2==1 && fin==0
        tpaso3= i;
        fin=1;
    end
end
end

```

```

%Busqueda de máximos y mínimos en ventanas t1:t2, t2:t3 y t3:tf
peak1= 1*max(abs(e(tpaso1:tpaso2)));
peak3= 1*max(abs(e(tpaso3:(T_SP+T_f-1))));
handles.decay_ratio= peak3/peak1;
set(handles.text31, 'String', handles.decay_ratio)

% MEDICIÓN SOBREPASO (dmp)
handles.sobrepaso= (peak1/SP_f(T_SP+1))*100;
set(handles.text42, 'String', handles.sobrepaso)

% DESVIACIÓN ESTANDAR
handles.desviacion= std(e);
set(handles.text44, 'String', handles.desviacion)

% Integral de Error Absoluto (IAE) y AAE
handles.IAE= sum(abs(e)); %Integral de error absolut
handles.AAE_m= handles.IAE/length(SP_f); %Promedio IAE muestral
handles.AAE_t= handles.IAE/max(t); %Promedio IAE temporal

set(handles.text49, 'String', handles.IAE)
set(handles.text53, 'String', handles.AAE_m)
set(handles.text55, 'String', handles.AAE_t)

% MIAO Y SEBORG
%Calculando Auto-correlacion por función
[ACF, lags, bound]= autocorr(e(T_SP+5:T_SP+T_f ), (length(t(T_SP+5:T_SP+T_f )))/2);
%Función auto-correlación

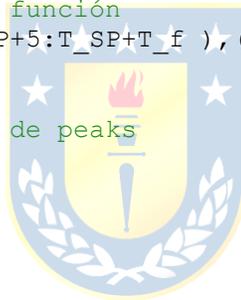
%Determinando posicion y valores de peaks
pasol= 0;
paso2= 0;
paso3= 0;
fin= 0;

%Busqueda de cruces por 0
for j=2:(max(lags))
    if sign(ACF(j-1)) ~= sign(ACF(j)) && pasol==0 && paso2==0 && fin==0
        pasol=1;
        tpaso1= j-1;
    elseif (sign(ACF(j-1)) ~= sign(ACF(j))) && pasol==1 && paso2==0 && fin==0
        paso2=1;
        tpaso2= j-1;
    elseif (sign(ACF(j-1)) ~= sign(ACF(j))) && pasol==1 && paso2==1 && fin==0
        paso3=1;
        tpaso3= j-1;
        fin=1;
    end
end
handles.paso3= paso3;

if paso3 ==1 %Si se detectaron 3 pasos, se ejecuta Miao y Seborg
%Busqueda de máximos y mínimos en ventanas t1:t2, t2:t3 y t3:tf
peak1= -1*max(abs(ACF(tpaso1:tpaso2)));
peak2= max(abs(ACF(tpaso2:tpaso3)));
peak3= -1*max(abs(ACF(tpaso3:max(lags)-1)));

%Determinando instantes de peak's
for i=1:max(lags)

```



```

    if ACF(i)==peak1
        tpeak1= i-1;
    end
    if ACF(i)==peak2
        tpeak2=i-1;
    end
    if ACF(i)==peak3
        tpeak3=i-1;
    end
end

%Definiendo rectas entre peak's
%Recta 1:
r1= ((peak2-1)/tpeak2).*lags+1;
%Recta 2:
r2= ((peak3-peak1)/(tpeak3-tpeak1)).*(lags-tpeak1)+peak1;
%Distancia mínima
x= 0:0.1:max(lags);
B= sqrt((x-tpeak1).^2+(((peak2-1)/tpeak2).*x+1)-peak1).^2);
A= sqrt((x-tpeak2).^2+(((peak3-peak1)/(tpeak3-tpeak1)).*(x-tpeak1)+peak1)-
peak2).^2);
b= min(B);
a= min(A);
%Determinando puntos de distancia mínima en recta.
for i=1:length(B)
    if b==B(i)
        x_r1=i*0.1;
        y_r1=((peak2-1)/tpeak2)*x_r1+1;
    end
    if a==A(i)
        x_r2=i*0.1;
        y_r2=((peak3-peak1)/(tpeak3-tpeak1)).*(x_r2-tpeak1)+peak1;
    end
end

%Coeficiente de disminución
handles.R=a/b;

%Gráfico Miao y Seborg
axes(handles.axes2)
plot(lags,ACF,'LineWidth',1.5)
ylabel('Auto-correlación','FontName','Times New Roman')
xlabel('Lag [k]','FontName','Times New Roman')
grid on
hold on
plot(lags(1:tpeak2+1),r1(1:tpeak2+1),'r')
hold on
plot(lags(tpeak1+1:tpeak3+1),r2(tpeak1+1:tpeak3+1),'r')
hold on
plot([tpeak1 x_r1], [peak1 y_r1], '-.k','linewidth',2)
hold on
plot([tpeak2 x_r2], [peak2 y_r2], '-.k','linewidth',2)

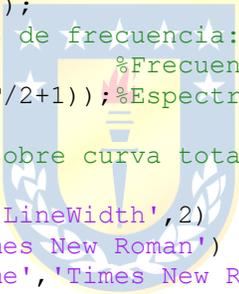
%Almacenando variables Miao y Seborg
handles.tpeak1= tpeak1;      %tiempo peak 1.
handles.tpeak2= tpeak2;      %tiempo peak 2.
handles.tpeak3= tpeak3;      %tiempo peak 3.
handles.peak1= peak1;        %Peak 1, respuesta cambio SP.

```

```

handles.peak2= peak2;           %Peak 2, respuesta cambio SP.
handles.x_r1= x_r1;           %Punto Miao y Seborg.
handles.y_r1= y_r1;           %Punto Miao y Seborg.
handles.x_r2= x_r2;           %Punto Miao y Seborg.
handles.y_r2= y_r2;           %Punto Miao y Seborg.
handles.r1= r1;               %Recta 1 Miao y Seborg.
handles.r2= r2;               %Recta 2 Miao y Seborg.
handles.lags= lags;           % Delay, "eje x" de covarianza.
handles.ACF= ACF;             % Valor covarianza.

else
warndl('El método de Miao y Seborg no pudo ser realizado.\n - Señal no
oscilatoria.');
```



```

no_miao= 1;                    %Indicador: No se ejecutó Miao y Seborg
end
handles.no_miao= no_miao;

% ANÁLISIS ESPECTRAL DE POTENCIA

%Calculando transformada rápida de Fourier curva total
fft_e = abs(fft(e));
f= (0:length(e)-1) * ((1/T)/length(e));
NFFT = 2^nextpow2(length(e));           %Próxima potencia de 2 del largo e
Y = fft(e,NFFT)/length(e);
f = (1/T)/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
%Almacenando variables de análisis de frecuencia:
handles.f1= f;                         %Frecuencia análisis espectral 1.
handles.espectro1= 2*abs(Y(1:NFFT/2+1));%Espectro 1

%Grafico espectro de frecuencia sobre curva total.
axes(handles.axes3)
semilogx(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)), 'LineWidth',2)
ylabel('Magnitud', 'FontName', 'Times New Roman')
xlabel('Frecuencia [Hz]', 'FontName', 'Times New Roman')

%Calculando transformada rápida de Fourier cambio SP
fft_e = abs(fft(e(T_SP+5:T_SP+T_f)));
f= (0:length(e(T_SP+5:T_SP+T_f))-1) * ((1/T)/length(e(T_SP+5:T_SP+T_f)));
NFFT = 2^nextpow2(length(e(T_SP+5:T_SP+T_f)));           %Próxima potencia de 2
del largo e
Y = fft(e(T_SP+5:T_SP+T_f),NFFT)/length(e(T_SP+5:T_SP+T_f));
f = (1/T)/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
%Almacenando variables de análisis de frecuencia:
handles.f2= f;                         %Frecuencia análisis espectral 2.
handles.espectro2= 2*abs(Y(1:NFFT/2+1));%Espectro 2.

set(handles.text27, 'String',handles.asentamiento)
set(handles.text31, 'String',handles.decay_ratio)
set(handles.text42, 'String',handles.sobrepaso)
set(handles.text44, 'String',handles.desviacion)
set(handles.text49, 'String',handles.IAE)
set(handles.text53, 'String',handles.AAE_m)
set(handles.text55, 'String',handles.AAE_t)
set(handles.text17, 'String',handles.rise_time)

if no_miao==0
set(handles.text104, 'String',handles.R)
end

```

```

end
guidata(hObject,handles)

% MENÚ POP-UP: TENDENCIAS 1
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
select= get(handles.popupmenu1, 'Value');
switch select
    case 1 %Graficar SP Y PV
        if isequal(handles.FileName,0)
            return
        else
            axes(handles.axes1)
            cla
            plot(handles.t,handles.SP, 'LineWidth',1.5)
            hold on
            plot(handles.t,handles.PV, 'r', 'LineWidth',1.5)
            legend('SP', 'PV')
            ylim([0 100])
            xlabel('Tiempo [s]', 'FontName', 'Times New Roman')
            ylabel('SP y PV [%]', 'FontName', 'Times New Roman')
        end
    case 2 %Graficar SP
        if isequal(handles.FileName,0)
            return
        else
            axes(handles.axes1)
            cla
            plot(handles.t,handles.SP, 'LineWidth',1.5)
            grid on
            legend('off')
            ylim([0 100])
            xlabel('Tiempo [s]', 'FontName', 'Times New Roman')
            ylabel('SP [%]', 'FontName', 'Times New Roman')
        end
    case 3 %Graficar PV
        if isequal(handles.FileName,0)
            return
        else
            axes(handles.axes1)
            cla
            plot(handles.t,handles.PV, 'r', 'LineWidth',1.5)
            grid on
            legend('off')
            ylim([0 100])
            xlabel('Tiempo [s]', 'FontName', 'Times New Roman')
            ylabel('PV [%]', 'FontName', 'Times New Roman')
        end
    case 4 %Graficar Error SP-PV
        if isequal(handles.FileName,0)
            return
        else
            axes(handles.axes1)
            cla
            plot(handles.t,handles.SP-handles.PV, 'Linewidth',1.5)
            grid on
            legend('off')

```

```

        ylim([-100 100])
        xlabel('Tiempo [s]', 'FontName', 'Times New Roman')
        ylabel('Error [%]', 'FontName', 'Times New Roman')
    end
case 5 %Graficar Error Absoluto
if isequal(handles.FileName,0)
    return
else
    axes(handles.axes1)
    cla
    plot(handles.t,abs(handles.SP-handles.PV), 'LineWidth',1.5)
    grid on
    legend('off')
    ylim([0 100])
    xlabel('Tiempo [s]', 'FontName', 'Times New Roman')
    ylabel('Error absoluto [%]', 'FontName', 'Times New Roman')
end
end
end

```

```

function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% ENTRADA NUMERICA DE REFERENCIA DE RISE TIME
function rise_time_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.rise_time_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

```

```

function rise_time_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% ENTRADA NUMERICA DE REFERENCIA DECAY RATIO
function decay_ratio_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.decay_ratio_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

```

```

function decay_ratio_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% ENTRADA NUMERICA DE REFERENCIA SOBRE-PASO
function sobrepaso_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.sobrepaso_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

```

```

function sobrepaso_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% ENTRADA NUMERICA ADE REFERENCIA DESVIACIÓN STD.
function desviacion_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.desviacion_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

function desviacion_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% ENTRADA NUMERICA DE IAE_REF
function IAE_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.IAE_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

function IAE_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% ENTRADA NÚMERICA DE TOTAL DE MUESTRAS REFERENCIA
function total_muestras_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.total_muestras_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

function total_muestras_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% ENTRADA NÚMERICA PERIODO REFERENCIA
function periodo_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.periodo_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

function periodo_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% ENTRADA NÚMERICA REFERENCIA TIEMPO DE ASENTAMIENTO
function asentamiento_ref_Callback(hObject, eventdata, handles)
handles.asentamiento_ref=str2double(get(hObject,'String'));
guidata(hObject, handles);

```

```

function asentamiento_ref_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% BOTÓN INGRESAR DATOS
function ingresar_Callback(hObject, eventdata, handles)

% MENÚ POP-UP: TENDENCIA 2
function popupmenu10_Callback(hObject, eventdata, handles)
select= get(handles.popupmenu10,'Value');
switch select
    case 1 % GRÁFICO AUTO-CORRELACION MIAO Y SEBORG
        if isequal(handles.FileName,0)
            return
        else
            if handles.paso3==1 %Si Miao y Seborg fué ejecutado
                axes(handles.axes2)
                cla
                plot(handles.lags,handles.ACF,'LineWidth',1.5)
                ylim([-1 1])
                xlim([0 max(handles.lags)])
                legend('off')
                ylabel('Auto-correlación','FontName','Times New Roman')
                xlabel('Lag [k]','FontName','Times New Roman')
                grid on
                hold on

                plot(handles.lags(1:handles.tpeak2+1),handles.r1(1:handles.tpeak2+1),'r')
                hold on

                plot(handles.lags(handles.tpeak1+1:handles.tpeak3+1),handles.r2(handles.tpeak1+1:handles.tpeak3+1),'r')
                hold on
                plot([handles.tpeak1 handles.x_r1], [handles.peak1 handles.y_r1],'-
.k','linewidth',2)
                hold on
                plot([handles.tpeak2 handles.x_r2], [handles.peak2 handles.y_r2],'-
.k','linewidth',2)

                else
                    warndl('El método de Miao y Seborg no pudo ser realizado.\n - Señal
no oscilatoria. ');
                end
            end
        case 2 %GRÁFICO RESPUESTA CAMBIO DE SP
            if isequal(handles.FileName,0)
                return
            else
                axes(handles.axes2)
                cla

```

```

plot(handles.t(1,handles.T_SP:(handles.T_SP+handles.T_f)),handles.SP(1,handles.T
_SP:(handles.T_SP+handles.T_f)), 'r', 'LineWidth',1.5)
    hold on

plot(handles.t(1,handles.T_SP:(handles.T_SP+handles.T_f)),handles.PV(1,handles.T
_SP:(handles.T_SP+handles.T_f)), 'LineWidth',1.5)
    ylabel('SP y PV [%]','FontName','Times New Roman')
    xlabel('Tiempo [s]','FontName','Times New Roman')
    xlim([(handles.T_SP-1)*handles.T (handles.T_SP+handles.T_f)*handles.T])
    ylim([0 100])
    grid on
    legend('SP', 'PV')
end

end

function popupmenu10_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% BOTÓN PARA EVALUACIÓN DE LAZO
function pushbutton9_Callback(hObject, eventdata, handles)
% Cálculo de índices unitarios
handles.n_asentamiento=    handles.asentamiento_ref/handles.asentamiento;
handles.n_decay_ratio=    handles.decay_ratio_ref/handles.decay_ratio;
handles.n_desviacion=    handles.desviacion_ref/handles.desviacion;
handles.n_IAE=            handles.IAE_ref/handles.IAE;
handles.n_AAE_m=
(handles.IAE_ref/handles.total_muestras_ref)/handles.AAE_m;
handles.n_AAE_t=
(handles.IAE_ref/(handles.periodo_ref*handles.total_muestras_ref))/handles.AAE_t
;
handles.n_sobrepaso=    handles.sobrepaso_ref/handles.sobrepaso;
handles.n_subida=    handles.rise_time_ref/handles.rise_time;

n_asentamiento= handles.n_asentamiento;
n_decay_ratio= handles.n_decay_ratio;
n_desviacion= handles.n_desviacion;
n_IAE= handles.n_IAE;
n_AAE_m= handles.n_AAE_m;
n_AAE_t= handles.n_AAE_t;
n_sobrepaso= handles.n_sobrepaso;
n_subida= handles.n_subida;

if handles.no_miao == 0
    handles.n_R= 0.4/handles.R;
    n_R= handles.n_R;
else
    handles.n_R= 0.01;
    n_R= handles.n_R;
end

%Definición de rangos para evaluación:
n_3= 0.9;
n_2= 0.7;

```

```

n_1= 0.5;

%Evaluación - Óptimo
if n_asentamiento >= n_3
    set(handles.text86,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text86,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end
if n_decay_ratio >= n_3
    set(handles.text87,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text87,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end
if n_desviacion >= n_3
    set(handles.text93,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text93,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end
if n_IAE >= n_3
    set(handles.text90,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text90,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end
if n_AAE_m >= n_3
    set(handles.text91,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text91,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end
if n_AAE_t >= n_3
    set(handles.text92,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text92,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end
if n_sobrepaso >= n_3
    set(handles.text88,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text88,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end
if n_subida >= n_3
    set(handles.text89,'String','"Óptimo"')
    set(handles.text89,'BackgroundColor',[51/255 153/255 0])
end

%Evaluación - Bueno
if (n_2 <= n_asentamiento) && (n_asentamiento < n_3)
    set(handles.text86,'String','"Bueno"')
    set(handles.text86,'BackgroundColor',[60/255 240/255 0])
end
if (n_2 <= n_decay_ratio) && (n_decay_ratio < n_3)
    set(handles.text87,'String','"Bueno"')
    set(handles.text87,'BackgroundColor',[60/255 240/255 0])
end
if (n_2 <= n_desviacion) && (n_desviacion < n_3)
    set(handles.text93,'String','"Bueno"')
    set(handles.text93,'BackgroundColor',[60/255 240/255 0])
end
if (n_2 <= n_IAE) && (n_IAE < n_3)
    set(handles.text90,'String','"Bueno"')
    set(handles.text90,'BackgroundColor',[60/255 240/255 0])
end
if (n_2 <= n_AAE_m) && (n_AAE_m < n_3)
    set(handles.text91,'String','"Bueno"')
    set(handles.text91,'BackgroundColor',[60/255 240/255 0])
end
end

```

```

if (n_2 <= n_AAE_t) && (n_AAE_t < n_3)
    set(handles.text92, 'String', '"Bueno"')
    set(handles.text92, 'BackgroundColor', [60/255 240/255 0])
end
if (n_2 <= n_sobrepaso) && (n_sobrepaso < n_3)
    set(handles.text88, 'String', '"Bueno"')
    set(handles.text88, 'BackgroundColor', [60/255 240/255 0])
end
if (n_2 <= n_subida) && (n_subida < n_3)
    set(handles.text89, 'String', '"Bueno"')
    set(handles.text89, 'BackgroundColor', [60/255 240/255 0])
end
if n_R < 0.4
    set(handles.text94, 'String', '"Bueno"')
    set(handles.text94, 'BackgroundColor', [60/255 240/255 0])
end

%Evaluación - Justo
if (n_1 <= n_asentamiento) && (n_asentamiento < n_2)
    set(handles.text86, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text86, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end
if (n_1 <= n_decay_ratio) && (n_decay_ratio < n_2)
    set(handles.text87, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text87, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end
if (n_1 <= n_desviacion) && (n_desviacion < n_2)
    set(handles.text93, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text93, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end
if (n_1 <= n_IAE) && (n_IAE < n_2)
    set(handles.text90, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text90, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end
if (n_1 <= n_AAE_m) && (n_AAE_m < n_2)
    set(handles.text91, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text91, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end
if (n_1 <= n_AAE_t) && (n_AAE_t < n_2)
    set(handles.text92, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text92, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end
if (n_1 <= n_sobrepaso) && (n_sobrepaso < n_2)
    set(handles.text88, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text88, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end
if (n_1 <= n_subida) && (n_subida < n_2)
    set(handles.text89, 'String', '"Justo"')
    set(handles.text89, 'BackgroundColor', [255/255 204/255 0])
end

%Evaluación - Pobre
if n_asentamiento < n_1
    set(handles.text86, 'String', '"Pobre"')
    set(handles.text86, 'BackgroundColor', 'red')
end
if n_decay_ratio < n_1
    set(handles.text87, 'String', '"Pobre"')

```

```

        set(handles.text87,'BackgroundColor','red')
    end
    if n_desviacion < n_1
        set(handles.text93,'String','"Pobre"')
        set(handles.text93,'BackgroundColor','red')
    end
    if n_IAE < n_1
        set(handles.text90,'String','"Pobre"')
        set(handles.text90,'BackgroundColor','red')
    end
    if n_AAE_m < n_1
        set(handles.text91,'String','"Pobre"')
        set(handles.text91,'BackgroundColor','red')
    end
    if n_AAE_t < n_1
        set(handles.text92,'String','"Pobre"')
        set(handles.text92,'BackgroundColor','red')
    end
    if n_sobrepaso < n_1
        set(handles.text88,'String','"Pobre"')
        set(handles.text88,'BackgroundColor','red')
    end
    if n_subida < n_1
        set(handles.text89,'String','"Pobre"')
        set(handles.text89,'BackgroundColor','red')
    end
    if n_R >= 0.4
        set(handles.text94,'String','"Pobre"')
        set(handles.text94,'BackgroundColor','red')
    end
    guidata(hObject, handles);
end

%SELECCIÓN DE GRÁFICOS ANÁLISIS ESPECTRAL
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
select= get(handles.popupmenu1,'Value');
switch select
    case 1 % GRÁFICO ANÁLISIS ESPECTRAL CURVA TOTAL
        if isequal(handles.FileName,0)
            return
        else
            axes(handles.axes3)
            cla
            %Grafico
            axes(handles.axes3)
            semilogx(handles.f1,handles.espectro1,'LineWidth',2)
            ylabel('Magnitud','FontName','Times New Roman')
            xlabel('Frecuencia [Hz]','FontName','Times New Roman')
        end
    case 2 % GRÁFICO ANÁLISIS ESPECTRAL CAMBIO SP
        if isequal(handles.FileName,0)
            return
        else
            axes(handles.axes3)
            cla
            %Grafico
            axes(handles.axes3)
            semilogx(handles.f2,handles.espectro2,'LineWidth',2)

```

```

        ylabel('Magnitud','FontName','Times New Roman')
        xlabel('Frecuencia [Hz]','FontName','Times New Roman')
    end
end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu11_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton11.
function pushbutton11_Callback(hObject, eventdata, handles)
[FileName Path]= uigetfile({'*.xls;*.xlsx'},'Seleccionar archivo excel de
planilla');

%Fecha
xlswrite(strcat(Path,FileName),{date},1,'B6')

%Hora
hora= fix(clock);
xlswrite(strcat(Path,FileName),{strcat(num2str(hora(1,4)),':',num2str(hora(1,5))
,':',num2str(hora(1,6)))},1,'B7')

xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.asentamiento,1,'D24')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.decay_ratio,1,'D25')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.desviacion,1,'D26')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.IAE,1,'D27')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.AAE_m,1,'D28')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.AAE_t,1,'D29')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.sobrepaso,1,'D30')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.rise_time,1,'D31')
xlswrite(strcat(Path,FileName),handles.R,1,'D32')

xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_asentamiento,2),1,'E24')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_decay_ratio,2),1,'E25')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_desviacion,2),1,'E26')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_IAE,2),1,'E27')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_AAE_m,2),1,'E28')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_AAE_t,2),1,'E29')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_sobrepaso,2),1,'E30')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_subida,2),1,'E31')
xlswrite(strcat(Path,FileName),round(handles.n_R,2),1,'E32')

guidata(hObject, handles);

```

Anexo B. Formato de reporte de comportamiento de lazo de control

REPORTE DE COMPORTAMIENTO DE LAZO DE CONTROL

Empresa:	
Área:	
Fecha:	
Hora emisión:	

Lazo de control:

Nombre de Lazo de Control:	
Descripción Lazo de Control	

Cálculo de Índices y Rendimiento

Índices	Valor	Rendimiento (η)	Evaluación
Tiempo de asentamiento :			-
Razón de amortiguamiento:			-
Desviación estándar:			-
Integral del error absoluto (IAE):			-
Promedio muestral del error absoluto (AAEN):			-
Promedio temporal del error absoluto (AAEt):			-
Sobrepaso:			-
Tiempo de subida:			-
Índice de Miao y Seborg:			-

Notas

Elaborado por

Revisado por