

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TESIS

Análisis de la Confiabilidad de los Separadores Magnéticos Aplicado en Sector Minería Mediante un Sistema de Control de Temperaturas

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por

César Eduardo Castillo Figueroa

[0009-0004-2842-4515](#)

Asesor

Mag. Alcides Guillermo Joo Aguayo

[0000-0002-8459-8489](#)

LIMA-PERÚ

2025

Citar/How to cite

(Castillo, 2025)

Referencia/Reference

Castillo, C. (2025). *Análisis de la confiabilidad de los Separadores Magnéticos aplicado en sector minería mediante un Sistema de Control de Temperaturas*. [Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.

Estilo/Style:

APA (7ma ed.)

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a mis padres, Claudio y Sabina; hermanos, Fernando y Camila, quienes siempre me apoyaron en todo momento, hasta en lo más difícil en mi vida. Amigos, en especial a Y.R, que me alegraron y me alentaron para ser cada día mejor y agradezco a Dios, por cada momento que pasa siempre siento su presencia en todo momento y darme esta maravillosa familia.

César E. Castillo F.

Agradecimientos

Agradezco al personal mecánico y la jefatura de mantenimiento de la minera Shouxin Perú S.A. Por apoyarme en el proceso laboral y experiencia en el sector minero, en especial al ing. César F. Ortiz A., jefe del área de mantenimiento mecánico fase 1, por darme la confianza y el apoyo al realizar esta presente tesis, lo cual significa mucho a mi persona implementar la tecnología y mejoras en minería.

Resumen

Esta tesis trata sobre el análisis de temperatura registrado en los separadores magnéticos y la implementación de un algoritmo destinado a mejorar el sistema de lubricación en las chumaceras de los separadores magnéticos, con la finalidad de aumentar los índices de confiabilidad del equipo en mención, utilizados en el sector minero.

La tesis investiga problemas en los separadores magnéticos, que, a pesar de las revisiones técnicas, presentan temperaturas altas reportadas diariamente. Estas altas temperaturas, causadas por lubricación inadecuada o fallos mecánicos, afectan la calidad y vida útil de los separadores. La investigación busca resolver estos problemas. El algoritmo implementado tiene como objetivo analizar y controlar de manera continua la temperatura de las chumaceras de los separadores magnéticos, así como el nivel de grasa en el suministro almacenado y el sistema de alarmas. Este algoritmo fue desarrollado bajo programación gráfica de LabVIEW.

El desarrollo del algoritmo consta de lo siguiente: Un controlador de temperatura que medirá e indicará si excede el valor óptimo de operatividad, activando la alarma de temperatura con el fin de accionar el sistema de lubricación. Por otro lado, para el proceso de lubricación, se implementó un indicador de nivel de grasa con el propósito de advertir al operador el estado del depósito de grasa, activando una alarma tan pronto como la cantidad de grasa es inferior a lo requerido.

Se logró la ejecución correcta del algoritmo; además, se alcanzó una sintonización adecuada para su óptimo funcionamiento, con la finalidad de que el algoritmo no presente gastos necesarios de exceso de grasa que se puede emprender a futuro como se puede apreciar en anexos.

Palabras clave: Separadores magnéticos, chumacera, confiabilidad, temperatura, grasa, alarma, algoritmo, sintonización.

Abstract

This thesis deals with the temperature analysis recorded in magnetic separators and the implementation of an algorithm aimed at improving the lubrication system in the bearings of magnetic separators, in order to increase the reliability indexes of the equipment in question, used in the mining sector.

The thesis investigates problems in magnetic separators, which, despite technical reviews, have high temperatures reported on a daily basis. These high temperatures, caused by inadequate lubrication or mechanical failures, affect the quality and lifetime of the separators. The research aims to solve these problems.

The implemented algorithm aims to continuously analyse and control the temperature of the magnetic separator bearings, as well as the grease level in the stored supply and the alarm system. This algorithm was developed under LabVIEW graphical programming.

The development of the algorithm consists of the following: A temperature controller that will measure and indicate if it exceeds the optimal operating value, activating the temperature alarm in order to trigger the lubrication system. On the other hand, for the lubrication process, a grease level indicator was implemented with the purpose of warning the operator about the state of the grease reservoir, activating an alarm as soon as the amount of grease is lower than required.

The correct execution of the algorithm was achieved; furthermore, an adequate tuning was achieved for its optimal operation, with the aim that the algorithm does not present necessary expenses of excess grease that can be undertaken in the future as can be seen in annexes.

Keywords: Magnetic separators, bearing, reliability, temperature, grease, alarm, algorithm, tuning.

Índice

Resumen	V
Abstract.....	VI
INTRODUCCIÓN.....	XIV
CAPÍTULO I Generalidades	1
1.1 Antecedente de la Investigación	2
1.1.1 Antecedentes Nacionales	2
1.1.2 Antecedentes Internacionales.....	4
1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio.....	5
1.3 Justificación e importancia	8
1.4 Objetivos de estudio.....	9
1.4.1 Objetivo general	9
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5 Hipótesis.....	10
1.5.1 Hipótesis General.....	10
1.5.2 Hipótesis específicas	10
1.6 Variable y Operacionalización de variables	10
1.6.1 Variables	10
1.6.2 Operacionalización de Variables.....	11
1.7 Metodología de la Investigación.....	12
1.7.1 Unidad de Análisis	12
1.7.2 Tipo, enfoque y nivel de la investigación	12
1.7.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	12
CAPÍTULO II Marco teórico y conceptual.....	14
2.1 Marco teórico.....	14
2.1.1 Mantenimiento predictivo y la lubricación	14
2.1.2 Instrumentación y el sistema de control análogo	29

2.1.3 Transferencia de calor por conducción de los elementos giratorios y la chumacera.....	32
2.2 Marco conceptual.....	35
2.2.1 Separador magnético.....	35
2.2.2 Cojinete	35
2.2.3 Chumacera.....	36
2.2.4 Grasa	37
2.2.5 Indicador	38
2.2.6 Controlador	38
2.2.7 Lazo de control cascada	39
2.2.8 Sintonización.....	39
2.2.9 Método Ziegler-Nichols	40
2.2.10 Método de Cohen Coon	43
2.2.11 Funciones de LabVIEW	44
CAPÍTULO III Desarrollo de la tesis	49
3.1 Control de temperatura	62
3.2 Indicador de nivel de grasa	64
3.3 Algoritmo de alarma de temperatura y nivel de tanque.....	65
3.4 Modelo matemático de temperatura medida por convección entre el rodamiento y grasa	70
CAPÍTULO IV Resultados, Contratación de Hipótesis y Discusión de Resultados	73
4.1 Resultado de función de confiabilidad de los separadores magnéticos.....	73
4.2 Resultados de variación de la variable en proceso y sintonización de la simulación	75
4.3 Resultado de confiabilidad por un controlador de temperatura.....	79
RECOMENDACIONES.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
ANEXOS.....	1

Lista de Tablas

Tabla 3.1 Plan para la Lubricación de la Chumacera del Separador Magnético	49
Tabla 3.2 Registro de temperaturas de las chumaceras de los separadores magnéticos del mes de agosto	50
Tabla 3.3 Registro de temperaturas de las chumaceras de los separadores magnéticos del mes de setiembre	51
Tabla 3.4 Registro de temperaturas de las chumaceras de los separadores magnéticos del mes de octubre	52
Tabla 3.5 Cantidad de fallas de cada separador magnético por horas de operatividad y tasa de fallas.....	54
Tabla 4.1 Tiempo medio entre fallas de los separadores magnéticos	74
Tabla 4.2 Toma de medidas te temperaturas del separador magnético 3	75
Tabla 4.3 Valores de L, T y K para desarollar el PID	77
Tabla 4.4 Ganancias proporcionales por primer método de Ziegler-Nichols.....	77
Tabla 4.5 Ganancias Proporcionales por método de Cohen-Coon	78
Tabla 4.6 Confiabilidad de los separadores magnéticos y controlado por un mes comercial	82

Lista de Figuras

Figura 1.1 Proceso de separación Magnética y Partes del Equipo	2
Figura 1.2 Producción mensual de hierro (Miles de TMF).....	6
Figura 1.3 Medida de temperatura de la chumacera del separador magnético usando pirómetro.....	7
Figura 1.4 Evolución de fatiga del rodamiento por contacto en superficie exterior	8
Figura 2.1 Tendencia e inspección de rodamiento, modo de ejemplo para la evolución de mantenimiento predictivo desde el punto P1 hasta el punto P4.....	14
Figura 2.2 Ejemplo de análisis de aceite	19
Figura 2.3 Ejemplo de Termografía en motores eléctricos.....	20
Figura 2.4 Análisis vibracional de un sistema de bombeo.....	21
Figura 2.5 Equipo de Alineamiento SKF TKSA 31	22
Figura 2.6 Radiografía en los cordones de soldadura de tuberías.....	23
Figura 2.7 Inspección visual de un técnico revisando los componentes de acuerdo al estado	24
Figura 2.8 Ensayo de Líquidos penetrantes	24
Figura 2.9 Ensayo no destructivo aplicando partículas magnéticas en tubería.....	25
Figura 2.10 Prueba de ultrasonido en acople de motor eléctrico	26
Figura 2.11 Ejemplo de lubricación de equipo.....	26
Figura 2.12 Lubricación Límite	27
Figura 2.13 Comparación entre lubricación límite y lubricación mixta animado	28
Figura 2.14 Lubricación Hidrodinámica	28
Figura 2.15 Ejemplo de lubricación elasto-hidrodinámica	29
Figura 2.16 Control PID en diagrama de bloques	30
Figura 2.17 Simulación de PID verificando como varia la curva de la Variable del proceso respecto a la variable real (Set point) en función del Kc (Ganancia proporcional) valor a treinta puntos comparado al Kc de veinte puntos	31
Figura 2.18 Volumen diferencial de control usado en la deducción del balance de masa en la capa límite de la velocidad en el flujo bidimensional sobre una superficie	34

Figura 2.19 Separadores magnéticos.....	35
Figura 2.20 Rodamiento angular SKF 7320	36
Figura 2.21 Chumacera (imagen izquierda del protector de acople de color amarillo) unido al reductor	37
Figura 2.22 Comparación de perturbación de diagramas de un lazo de control simple y otra cascada corrigiendo la tendencia de manera rápida.....	39
Figura 2.23 Estructura PID no interactivo o sistema ISA.....	40
Figura 2.24 Gráfica de sistema de lazo abierto	41
Figura 2.25 Ejemplo de estructura While Loop.....	44
Figura 2.26 Ícono y conexiones para la herramienta PID.....	45
Figura 2.27 Monitoreo de temperatura	45
Figura 2.28 La herramienta Bundle unido al ícono Waveform Chart.....	45
Figura 2.29 Ejemplo de “Local variable” en LabVIEW	46
Figura 2.30 Ícono de In Range and Coerce de LabVIEW	47
Figura 2.31 Ejemplo del “Case structure” tomando por diferentes casos.....	47
Figura 2.32 Ícono y configuración del “Time Delay” en LabVIEW	48
Figura 3.1 Gráfica de variación de temperaturas de los separadores magnéticos mes de agosto	53
Figura 3.2 Gráfica de variación de temperaturas de los separadores magnéticos mes de setiembre	53
Figura 3.3 Gráfica de variación de temperaturas de los separadores magnéticos mes de octubre.....	54
Figura 3.4 Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 1	55
Figura 3.5 Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 2	55
Figura 3.6 Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 3.....	56
Figura 3.7 Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 4	56
Figura 3.8 Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 1	57
Figura 3.9 Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 2	57
Figura 3.10 Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 3	58
Figura 3.11 Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 4	58

Figura 3.12 Simulación de control de temperatura.....	62
Figura 3.13 Sintonización de las ganancias proporcionales y salida del output range	63
Figura 3.14 Gráfica comparativa de la temperatura real (setpoint) y la temperatura medida (PV).....	63
Figura 3.15 Gráfica de la salida de control u Output	63
Figura 3.16 Diagrama de la simulación del indicador de nivel de grasa	64
Figura 3.17 Resultado de panel de VI del depósito de grasa.....	64
Figura 3.18 Aplicación de condición del setpoint y la temperatura máxima permitida ejecutando un booleano negativo para que cumpla la condición de alarma cuando supere el rango.....	65
Figura 3.19 Condición de temperatura cuando no cumple el caso, el booleano no se ejecuta	66
Figura 3.20 Condición de temperatura cuando cumple el caso, el booleano se ejecuta de forma intermitente usando una estructura de secuencia con una duración de cinco milisegundos, aplicando una alarma de quinientos milisegundos de duración y nueve cientos Hz	66
Figura 3.21 Condición del límite mínimo de nivel en el depósito de grasa cuando cumple la secuencia	67
Figura 3.22 Condición del límite mínimo de nivel en el depósito de grasa, cuando no cumple la secuencia, activa el indicador de nivel de grasa	67
Figura 3.23 Condición cuando cumple la relación del nivel mínimo de grasa, el indicador de alarma no responde, caso falso.....	68
Figura 3.24 Ejecución del algoritmo cuando se encuentra en condiciones normales y los LED's están apagados	68
Figura 3.25 Ejecución del algoritmo cuando la temperatura medida (PV) supera el límite máximo de temperatura y el LED verde enciende	69
Figura 3.26 Ejecución del algoritmo cuando el nivel de grasa es menor o cerca al mínimo, como respuesta, enciende el LED rojo	69
Figura 2.27 Diseño de flujo de lubricante entre la chumacera y el cojinete	70
.....	70
Como valores de propiedades químicas del lubricante se presenta como la viscosidad y conductividad térmica del lubricante.....	70

Figura 4.1 Gráfico comparativo de función de confiabilidad de los separadores magnéticos	73
Figura 4.2 Gráfico comparativo de falla acumulada de los separadores magnéticos ..	74
Figura 4.3 Gráfico de función de transferencia aplicando 2 polos y ningún cero obteniendo una estimación del 82.86%.....	76
Figura 4.4 Traza de tangente para determinar los valores de T y L.....	76
Figura 4.5 Diagrama de control de planta	77
Figura 4.6 Gráfico de control de planta por sintonización de Ziegler-Nichols	78
Figura 4.7 Gráfico de control de planta por sintonización de Cohen-Coon	79
Figura 4.8 Gráficos por sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon	79
Figura 4.9 Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético controlado ...	80
Figura 4.10 Gráfico de falla acumulada del separador magnético controlado	81
Figura 4.11 Comparación de confiabilidad de los separadores magnéticos y controlado	81

INTRODUCCIÓN

Los separadores magnéticos son utilizados en estos procesos que requiere la separación de minerales ferrosos de no magnéticos sujetos bajo chumaceras y rodajes de los ejes del tambor magnético. Las chumaceras son esenciales ya que soportan cargas axiales y transversales, protegiendo los componentes internos y asegurando el funcionamiento eficiente del separador magnético.

Los separadores magnéticos son considerados activos de mediano plazo en empresas mineras, lo que lleva a la implementación de planes de mantenimiento preventivo gestionados por jefaturas de mantenimiento. Aunque el mantenimiento predictivo y la confiabilidad son importantes, su aplicación es limitada por restricciones presupuestarias y otros factores. Las prácticas actuales incluyen inspecciones diarias de temperatura en las chumaceras, como se puede apreciar en la *figura 1.3*, y revisiones visuales trimestrales de los cojinetes, con el objetivo de preservar la vida útil de los componentes del separador magnéticos evitando el desgaste, la fatiga, la corrosión y factores externos lo cual dañan la el material del equipo.

El desarrollo de un algoritmo para lubricar las chumaceras de los separadores magnéticos según la temperatura registrada por un controlador es un enfoque clave para mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de estos equipos. Está diseñado bajo un sistema de control análogo lo cual mejora los datos medidos de manera continua, lo cual son registrados por el instrumento calibrando los parámetros de sintonización del controlador, de tal manera que mejora la disponibilidad, los indicadores de mantenimiento o KPI y reducción de horas hombre por trabajos bajo condiciones. Este algoritmo se diseñará gráficamente como parte de un proyecto futuro de ingeniería, asegurando una gestión más precisa y efectiva del mantenimiento de los separadores magnéticos en la industria minera.

En el desarrollo de este trabajo, la presente tesis se divide en los siguientes capítulos:

Capítulo I: Generalidades: Este capítulo constituye el contexto general del estudio, dotando una visión panorámica del problema que incentiva la investigación. Inicialmente se presenta antecedentes que orienta y respalda la necesidad de aplicar esta problemática. Se describen las generalidades de la tesis, enfatizando la importancia de automatizar el sistema de lubricación automática. Además de distinguir el problema que aborda a lo largo de la investigación. Adicionalmente, constituir el objetivo general, así como los objetivos específicos, que serán bases para el desarrollo de la tesis. Además, se formulan las bases de la investigación. Se plantean las hipótesis que guiarán el estudio, tanto una hipótesis general como varias específicas lo cual se verificarán. Asimismo, se explica cómo se llevará a cabo la operacionalización de las variables relevantes, dependiente e independiente, con la finalidad como se lubricará automáticamente dependiendo del controlador de temperatura. Y finalmente como se detalla la metodología empleada en la investigación, incluyendo el tipo y nivel de la misma, así como la unidad de análisis seleccionada. Se proporciona una justificación hacia la investigación y se presenta una matriz de consistencia que evidencia los objetivos, hipótesis y los métodos utilizados.

Capítulo II: Marco Teórico: Este capítulo se expone un marco teórico explicando temas relacionados a la lubricación y automatización de las chumaceras de los separadores magnéticos, explorando temas de mantenimiento y sistemas de control analógicos. Además de un marco conceptual que enfoca la descripción detallada de los componentes del separador magnético y las funciones del software LabVIEW, lo cual explicando su ejecución aplicada al algoritmo desarrollado, adicionalmente conceptos básicos de transferencia de calor por convección en equipos rotativos.

Capítulo III: Desarrollo de la tesis: Este capítulo detalla el desarrollo de la investigación, abordando la aplicación de las funciones del software LabVIEW, desarrollando los sistemas de control de temperatura, indicador de nivel de grasa y el sistema de alarmas, explicando paso a paso el proceso y conexiones de las funciones,

además de un cálculo de indicadores y curvas de función de confiabilidad con la finalidad de comparar los indicadores de cada separador magnético, concluyendo una fórmula de transferencia de calor por convección del cojinete hacia la chumacera por un medio de la grasa..

Capítulo IV: Análisis y discusión de resultados: En este capítulo se central del trabajo se presentan y discuten resultados de la tesis, derivados de la ejecución del algoritmo desarrollado. Asimismo, las comparaciones de sintonizaciones para su optima operatividad de lubricación automática de los separadores magnéticos. Adicionalmente, como influye la función de confiabilidad entre los separadores magnéticos y comparando los indicadores con un separador magnético controlado.

En la sección final se presenta las conclusiones obtenidas del desarrollo de la tesis, ligado a las recomendaciones para futuras investigaciones o aplicaciones prácticas en la implementación de lubricación automática aplicando otras funciones de sistemas de control. Finalmente se incluyó anexos adjuntando resultados obtenidos en imágenes.

CAPÍTULO I

Generalidades

Los separadores magnéticos son equipos que se alimentan del relave y facilitan la clasificación de partículas de hierro que son atraídos por campos electromagnéticos, separando de otros materiales (*ver figura 1.1*). Estos separadores magnéticos, a fin de que su funcionamiento sea continuo, son inspeccionados constantemente, verificando el estado de los componentes de acuerdo un plan de mantenimiento planteado. Un parámetro frecuente que se mide en el separador magnético es la temperatura en dirección a las chumaceras.

Las chumaceras cumplen como objetivo aislar los cojinetes deslizantes, rodamiento del tambor magnético y reductor, asegurando que se encuentre libre de partículas y alimentados de grasa por una boquilla con la finalidad de evitar contacto y rozamiento de la chumacera y los cojinetes. Los cojinetes engrasados permiten un correcto desempeño de los separadores. No obstante, debido a los factores que se presentan que es el tiempo de desgaste de la grasa y temperatura de ebullición, aumenta su temperatura externa, provocando un contacto entre cojinetes y componentes.

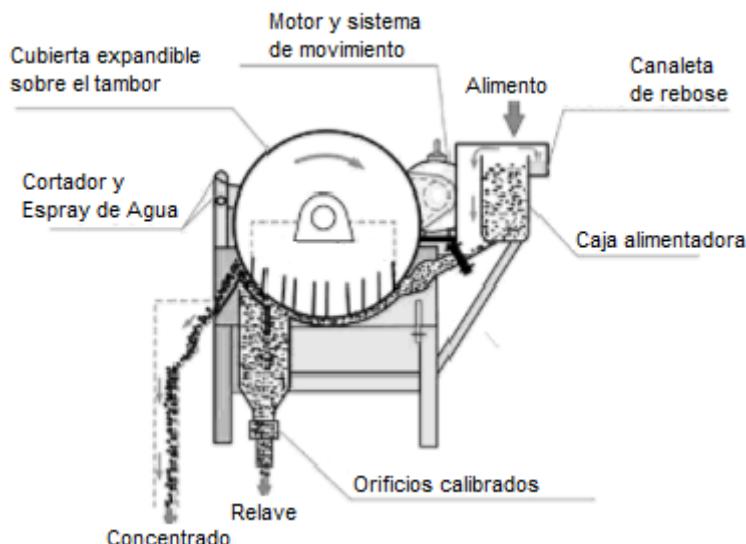
En este contexto, surge las temperaturas externas anómalas, lo cual la grasa se consume y suscita un rozamiento entre cojinetes y la capa interna de la chumacera, como resultado un desgaste y defectos mecánicos mermando su vida útil. Con el objetivo de mejorar su rendimiento es controlar la temperatura que mide a la chumacera y lubricando automáticamente evitando los factores mecánicos negativos.

Este estudio se focaliza en el desarrollo de un algoritmo que permita un control de temperatura y lubricación automática en dirección a la chumacera. Al impulsar este algoritmo, permite mejorar su confiabilidad del separador, viabilidad y control de calidad.

Esto a su vez, informa la evolución del controlador de temperatura continuamente, procediendo una mejora eficiente en el ámbito de mantenimiento predictivo.

Figura 1.1

Proceso de separación Magnética y Partes del Equipo



Fuente: Portal web 911Metallurgist <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/separador-magnetico-de-tambor-humedo/>

1.1 Antecedente de la Investigación

1.1.1 Antecedentes Nacionales

- Huancayo, Junín

Esta investigación de tesis aborda la implementación de un sistema de control para mejorar la confiabilidad del sistema de lubricación en la chumacera de carga de la central hidroeléctrica de Cashaucro, perteneciente a la unidad minera Raura. El diseño se centró en automatizar el arranque, parada y recuperación de los motores que impulsan el aceite lubricante mediante un circuito de lazo cerrado. Además de emplear PLC S7-1200 marca Siemens para el control, simulando diversos eventos de falla para asegurar la preparación del sistema frente a perturbaciones.

El sistema se divide en dos partes: uno principal operando a 220VAC y un sistema de respaldo a 125VDC, activado en caso de falla del sistema principal por cortocircuitos u otras razones. La instalación no solo cumple con los estándares de

seguridad y salud ocupacional de Raura, sino que también busca optimizar recursos y proteger tanto a los trabajadores como a los equipos. Se enfatizó en la gestión del proyecto bajo pilares de bajo costo, alta calidad y facilidad de operación, con un tiempo de instalación proyectado de menos de un mes(Chanco Pastrana, 2023).

- Canaria y Apongo (Ayacucho)

Esta investigación busca optimizar la confiabilidad de los equipos y reducir problemas como horas extras de mantenimiento, alarmas recurrentes, fallas y paradas aplicando el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (MCC), lo cual es un método desarrollado en los años 60 en la industria aeronáutica, con la finalidad de mejorar el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo, enfocándose en problemas específicos de la tesis.

En la tesis, se describe el proceso MCC detalladamente y se aplica al Molino de Bolas Kurimoto 8'x6' en la Planta Procesadora de la Unidad Minera Catalina Huanca, donde se dividen los subsistemas del molino para analizar fallas individuales y su impacto en la operación. El análisis MCC obtenido se integrará en los planes de mantenimiento del área de molienda de la planta (Gamboa Montalvo, 2017)

- Trujillo, La Libertad

Este estudio investiga cómo el mantenimiento centrado en la confiabilidad (MCC) afecta la disponibilidad mecánica de los equipos Scaler Paus en el sector minero, específicamente en la minera Yauli. Se identificaron los componentes críticos de los equipos, como el sistema hidráulico y el sistema de percusión de martillo, utilizando el Análisis de Modal de Fallas y Efectos (AMFE) para evaluar fallas y su gravedad. El mantenimiento actual es reactivo, lo que causa frecuentes paradas y baja disponibilidad, por debajo del 85% requerido.

La investigación plantea aplicar MCC con la finalidad de mejorar la disponibilidad mecánica realizando inspecciones y concebir procedimientos estandarizados para el mantenimiento de componentes específicos del motor, como bombas de inyección y

filtros, observando una mejora en la disponibilidad de los equipos Scaler, evidenciando el impacto positivo de este tipo de mantenimiento en la operatividad de los equipos al implementar el MCC(Cardenas Loardo, 2018).

1.1.2 Antecedentes Internacionales

- México DC, 2010

De manera conjunta un grupo de egresados del Instituto Politécnico Nacional de México desarrollaron como tesis automatizar la secuencia de la lógica de control para un sistema de lubricación API 614, norma para diseño y parametrización de sistemas de lubricación en el sector petróleo y gas, utilizado en maquinaria rotatoria para la generación de energía eléctrica con la finalidad de reducir los altos costos que implican los recursos materiales y humanos, lo cual se propone implementar pruebas controladas por un PLC Siemens Simatic 300\cpu312, el cual gestionará variables como presión, temperatura, arranque y paro de bombas hidráulicas, buscando mayor precisión, eficiencia y control del sistema. Esta solución se basa en la norma API 614, asegurando que el PLC pueda ser utilizado en sistemas similares de diferentes clientes, aunque inicialmente se enfoca en esta aplicación específica. Automatizar estas pruebas eliminará la necesidad de equipos multidisciplinarios y reducirá los costos asociados con la repetición de pruebas debido a errores en el proceso manual(Carmona Trani, Emiglio León, Gómez Morales, Montes de Oca Mancilla, Salgado Galván, 2010).

- Quito, 1990

Esta investigación de tesis describe la implementación de un prototipo de control analógico de temperatura como parte de un proyecto llamado CONUEP-EPN 85-06 desarrollado para el laboratorio de Instrumentación de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Escuela Politécnica Nacional de Quito, Ecuador. Primero formando un sistema global que incluye un control de lazo digital y otro analógico, controlando la temperatura de los líquidos.

El sistema global tiene tres sensores para monitorear la temperatura del líquido, implementando un detector de temperatura resistivo (RTD) para el control de lazo digital, un transmisor y un termopar para el lazo analógico aplicando a la temperatura del líquido entre 0 a 100°C.

El sistema de calentamiento está compuesto por resistencias eléctricas sumergibles que proporcionan el calor necesario para aumentar la temperatura del líquido. El control de la potencia disipada por estas resistencias regula la cantidad de calor introducida al tanque. Por otro lado, el sistema de enfriamiento utiliza agua del sistema de tanque para intercambiar calor con agua fría de la red pública de distribución, reduciendo así la temperatura del líquido en el tanque. Es importante destacar que ambos líquidos nunca entran en contacto directo, sino que uno fluye dentro de una tubería y el otro en el exterior de esta(Ibarra Viteri, 1990).

- Ciudad Obregón, 2021

El trabajo presenta una teoría para desarrollar un modelo de soporte de lubricación en sector minero. Primero, aborda los problemas derivados de una lubricación inadecuada, que llevan a mayores costos de mantenimiento y paros imprevistos. Luego, propone mejoras tanto operativas como administrativas, destacando la importancia de personal capacitado. Finalmente, se finiquita una propuesta de procedimientos para una gestión ordenada de la lubricación y la recomendación de implementar un software para un mejor control (Esquivel Guerrero, 2021).

1.2 Identificación y Descripción del Problema de Estudio

En diciembre de 2023, la producción de siete de los ocho principales metales en mineras que operan en el Perú actualmente, aumentó en comparación con el mismo mes del año anterior, destacando los incrementos en zinc (+21.1%) y oro (+9.4%). Sin embargo, la producción de hierro disminuyó un 25.5%. A lo largo del año, la producción

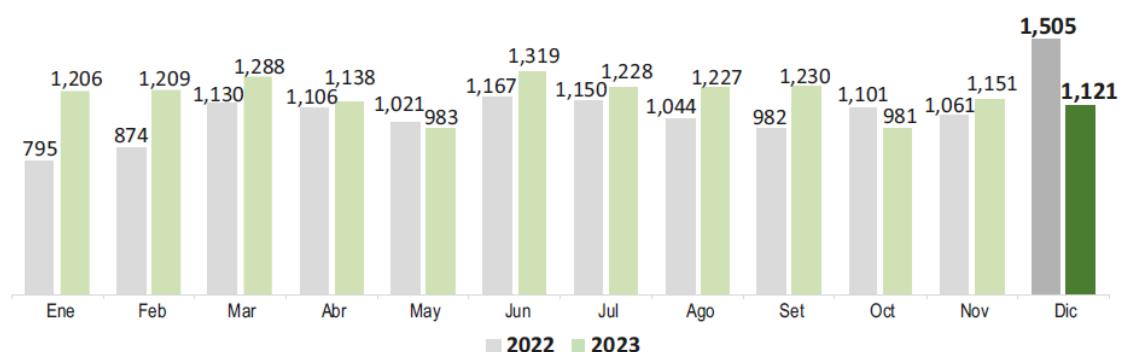
acumulada también mostró aumentos significativos en cobre (+12.7%), oro (+2.8%), zinc (+7.2%), plomo (+6.9%) y molibdeno (+6.0%), mientras que el hierro creció un 8.8%.

Según el boletín estadístico minero parte del Ministerio de Energía y Minas edición N° 12-2023, la producción nacional de hierro fue de 1,120,723 TMF, lo que representa una disminución del 25.5% respecto al año anterior debido a una caída en la producción de Shougang Hierro Perú S.A.A. (-27.0%). Sin embargo, la producción acumulada de enero a diciembre de 2023 fue de 14,080,999 TMF, aumentando un 8.8% en comparación con el año anterior. Shougang Hierro Perú S.A.A. dominó la producción con el 98.1% del total, mientras que Minera Shouxin Perú S.A. aportó el 1.9%. Ambas empresas están ubicadas en el departamento de Ica (ESTAMIN-MINEN, 2023).

Figura 1.2

Producción mensual de hierro (Miles de TMF)

2022-2023: Producción mensual de hierro (Miles de TMF)



Nota: Gráfica tomada por el boletín de estadístico minero del MINISTERIO DE Energía y Minas (MINEM) Edición 12-2023

El proceso de tratamiento de minerales metálicos, en particular el cobre, zinc, hierro, etc. Sigue varias etapas distintas que aseguran la extracción eficiente de los metales. Estas fases comunes incluyen molienda, flotación, espesamiento y filtrado. Sin embargo, el proceso específico para el hierro incluye pasos adicionales como la desulfurización y la separación magnética.

La separación magnética es crucial en el proceso del hierro para separar el metal del material no deseado, utilizando campos electromagnéticos en tambores

separadores. Posteriormente, el hierro separado pasa por etapas de espesamiento y filtrado para obtener el producto final deseado.

Una parte del plan de mantenimiento consiste en la lubricación y registro de temperatura del cojinete deslizante diario usando grasa específica de acuerdo al fabricante o los aditivos del lubricante que cumplen la durabilidad, el desgaste, la refrigeración, etc. Sin embargo, se registra a veces la temperatura elevada más de lo requerido debido que, entre el rodamiento del eje del tambor magnético, el cojinete no motriz de la chumacera del separador magnético y cojinete del reductor existe un contacto directo originando fricción en los componentes mencionados. Esto es provocado por la baja cantidad del lubricante y desgaste de la misma, además de desalineación del eje del tambor magnético, como consecuencia aumenta la fatiga de rodamiento (como se puede apreciar en la *figura 1.4*), desgaste en el eje del tambor magnético, estado de resonancia por desgaste los componentes lo cual provoca vibraciones que se puede apreciar a través del sonido y visualmente, entre otros.

Figura 1.3

Medida de temperatura de la chumacera del separador magnético usando pirómetro

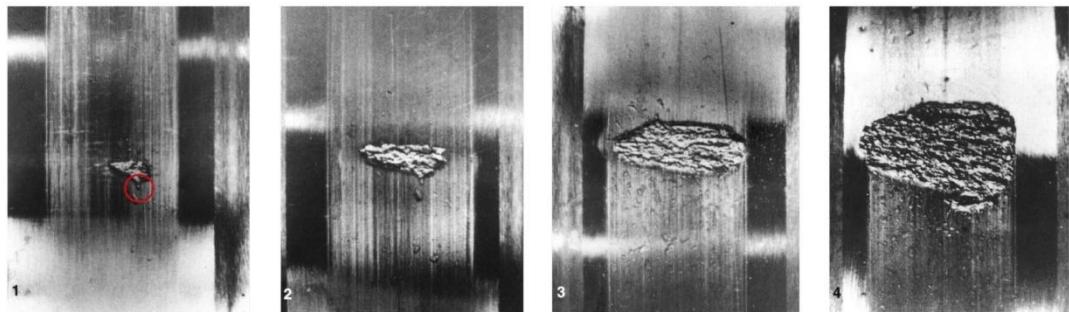


Nota: Datos medidos de los separadores magnéticos pertenecientes a una compañía minera operativa en Perú

El impacto de las causas mencionadas resulta un alto costo de repuesto de los componentes, gastos en aplicación en mano de obra, modificación de indicadores de mantenimiento y disminución de tiempo de vida útil de los separadores magnéticos. Por ejemplo se puede apreciar en la *figura 1.3*, causa de carencia de lubricación afecta a los componentes de un equipo minero rotativo (como ejemplo puede afectar al cojinete motriz del separador magnético).

Figura 1.4

Evolución de fatiga del rodamiento por contacto en superficie exterior



Fuente: Portal web SKF-<https://evolution.skf.com/es/desarrollo-de-los-danos-por-fatiga-de-contactos-rodantes-en-la-superficie-de-rodamientos/>

1.3 Justificación e importancia

Los separadores magnéticos son utilizados en estos procesos que requiere la separación de minerales ferrosos de no magnéticos sujetos bajo chumaceras y rodajes de los ejes del tambor magnético. Las chumaceras son esenciales ya que soportan cargas axiales y transversales, protegiendo los componentes internos y asegurando el funcionamiento eficiente del separador magnético.

Los separadores magnéticos son considerados activos de mediano plazo en empresas mineras, lo que lleva a la implementación de planes de mantenimiento preventivo gestionados por jefaturas de mantenimiento. Aunque el mantenimiento predictivo y la confiabilidad son importantes, su aplicación es limitada por restricciones

presupuestarias y otros factores. Las prácticas actuales incluyen inspecciones diarias de temperatura en las chumaceras, como se puede apreciar en la *figura 1.3*, y revisiones visuales trimestrales de los cojinetes, con el objetivo de preservar la vida útil de los componentes del separador magnéticos evitando el desgaste, la fatiga, la corrosión y factores externos lo cual dañan la el material del equipo.

El desarrollo de un algoritmo para lubricar las chumaceras de los separadores magnéticos según la temperatura registrada por un controlador es un enfoque clave para mejorar la eficiencia y prolongar la vida útil de estos equipos. Está diseñado bajo un sistema de control análogo lo cual mejora los datos medidos de manera continua, lo cual son registrados por el instrumento calibrando los parámetros de sintonización del controlador, de tal manera que mejora la disponibilidad, los indicadores de mantenimiento o KPI y reducción de horas hombre por trabajos bajo condiciones. Este algoritmo se diseñará gráficamente como parte de un proyecto futuro de ingeniería, asegurando una gestión más precisa y efectiva del mantenimiento de los separadores magnéticos en la industria minera.

1.4 Objetivos de estudio

El objetivo de la tesis es evaluar la confiabilidad de los separadores magnéticos y desarrollar un algoritmo para una lubricación automática continua. Esto se logrará mediante un sistema de control análogo que monitorea la temperatura en la chumacera, ajustando la inyección de lubricante para evitar exceder los niveles necesarios.

1.4.1 Objetivo general

Analizar la confiabilidad de los separadores magnéticos del área de desculturización y separación magnética mediante un control de temperatura implementado en un sistema de lazo de control cerrado no iterativo.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar la tendencia de curvas de indicadores de mantenimiento de los separadores magnéticos en relación a las temperaturas altas y paradas.

- Implementar un algoritmo que permita el control continuo de la temperatura en las chumaceras de los separadores magnéticos
- Optimizar la variable de temperatura mediante la sintonización de variables proporcionales del sistema de control análogo.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis General

La implementación de control de temperatura en tiempo real permite un mejor análisis de confiabilidad en los separadores magnéticos, evitando las paradas del equipo.

1.5.2 Hipótesis específicas

- Las temperaturas altas y la tasa de falla pueden determinar una mejor tendencia de confiabilidad y fallas acumuladas de los separadores magnéticos.
- La implementación de un algoritmo que automatice el control de la temperatura en operación de las chumaceras de los separadores magnéticos, evita que los cojinetes operen en sobrecalentamiento.
- Optimizar la sintonización de la temperatura medida respecto de la temperatura real permite mejorar la precisión de la temperatura registrada del algoritmo en menor tiempo.

1.6 Variable y Operacionalización de variables

1.6.1 Variables

- Variable independiente

Temperatura de la chumacera: Como referencia y toma de datos de los valores mediante instrumentos como pirómetros se verifica el estado de calentamiento de los cojinetes.

- Variables dependientes

Algoritmo de temperatura: Este algoritmo permitirá analizar la evolución de temperatura a través del tiempo, evaluando posibles valores anómalos de temperatura lo cual es medido hacia las chumaceras de los separadores magnéticos.

Sintonización de temperaturas: Estos parámetros ayudan al sistema de control optimizar los valores medidos, regulando a la variable de proceso de temperatura estabilizando a la variable real de temperatura medido a la chumacera del separador magnético.

Tasa de falla: Es una relación de fallas de equipos por horas de operatividad, lo cual se va determinar las temperaturas medidas de los separadores magnéticos.

1.6.2 Operacionalización de Variables

En el análisis de la variable independiente muestra la confiabilidad del separador magnético basado en la medida de la temperatura registrada hacia la chumacera del separador magnético se muestra las siguientes relaciones:

Temperaturas medidas de 30 a 45°C, son óptimas e indican menor índice critico de los componentes.

Temperaturas de 45 a 60°C, indican un gasto de lubricante por rozamiento entre cojinetes, indica defecto de grasa en la chumacera.

Temperaturas medidas de 60°C a más, toman como referencia una cantidad muy baja de lubricante en los cojinetes, provocando un contacto entre componentes dentro de la chumacera y degastando el material, futuro problema de falla mecánica y parada del separador magnético.

Desde otro ángulo, las variables dependientes se basan en la siguiente relación:

El algoritmo de control de temperatura ejecuta la variable del proceso regulando al valor del setpoint o temperatura real.

La sintonización de la variable temperatura está regulada por las ganancias proporcionales y los tiempos derivativos e integrales.

Tasa de falla determina la media del tiempo entre fallos reparables y la confiabilidad del equipo aplicados en horas de operación.

1.7 Metodología de la Investigación

1.7.1 Unidad de Análisis

La unidad de análisis de esta tesis es la examinar de variación de temperaturas medidas de las chumaceras del separador magnético. Se considera como varia las temperaturas entre días, el comportamiento de un sistema de control de temperatura registrado en la chumacera del separador magnético, la calibración del controlador de temperatura medida y el indicador de nivel de grasa como lubricación automática, pueden afectan el estado térmico de los cojinetes

La unidad de análisis es crucial con la finalidad de comprender cómo las variables independientes y dependientes interactúan, lo que permite evaluar con precisión el impacto de diversos factores en la confiabilidad del separador magnético.

1.7.2 Tipo, enfoque y nivel de la investigación

Debido a que la tesis se enfocará analizar la confiabilidad de la chumacera del separador magnético bajo temperaturas medidas e implementando un sistema de control de temperatura a fin de que el desempeño de los cojinetes cumpla los límites requeridos y evaluados, la tesis es de tipo de investigación aplicada.

Se propondrá una alternativa de solucionar el recalentamiento de los cojinetes cuando están en funcionamiento, simulando un sistema de arranque de lubricación automática en la boquilla de la chumacera.

A su vez, se podrá estimar cuanta grasa requiere hasta llegar la variable de proceso óptimo utilizando lazos de control analógicos.

1.7.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las chumaceras son elementos de soporte para ejes giratorios, como los que se encuentran en motores o maquinaria. Están diseñadas para reducir la fricción y soportar

la carga del eje. Las chumaceras tienen que mantenerse a una temperatura adecuada para garantizar su funcionamiento eficiente y evitar el desgaste prematuro o el daño.

La temperatura que se mide está directamente relacionada con las chumaceras de los separadores magnéticos. Es posible que el calor generado por el trabajo de los separadores magnéticos se transfiera a las chumaceras, afectando su rendimiento. Medir la temperatura de estas chumaceras ayuda a evaluar si están trabajando dentro de los parámetros adecuados.

La finalidad de toma de datos de temperatura hacia las chumaceras se realiza un monitoreo continuo de la temperatura en una parte del sistema. La toma de medidas de temperatura es crucial, ya que permite asegurar el funcionamiento adecuado del separador magnéticos y prevenir fallas.

Se puede determinar por varios instrumentos de medición como es la termografía, sin embargo, para equipos de mediano plazo se tomaron por un pirómetro registrando la temperatura de manera diaria, como se aprecia en la *figura 1.3*. Estos datos facilitan al operador el tiempo de calentamiento de los cojinetes y chumacera y desgaste del lubricante por día.

CAPÍTULO II

Marco teórico y conceptual

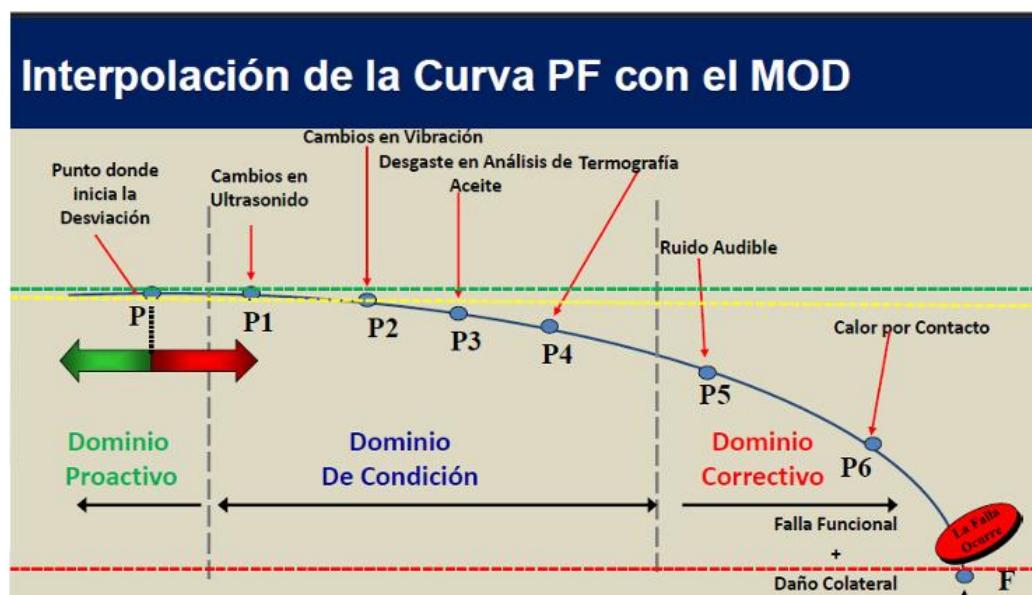
2.1 Marco teórico

2.1.1 Mantenimiento predictivo y la lubricación

El mantenimiento condicional o predictivo implica analizar parámetros de funcionamiento cuya evolución permite detectar un fallo antes de que este tenga consecuencias más graves. Por lo tanto, implica en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y vincularlos con la progresión de fallos, permitiendo detectar cuándo un fallo adquirirá relevancia significativa. Esto posibilita planificar intervenciones con suficiente antelación para prevenir consecuencias graves. Una característica clave es que no debe interferir con el funcionamiento normal de la planta. La inspección de los parámetros puede ser periódica o continua, dependiendo de factores como el tipo de planta, los fallos a diagnosticar y la inversión disponible.

Figura 2.1

Tendencia e inspección de rodamiento, modo de ejemplo para la evolución de mantenimiento predictivo desde el punto P1 hasta el punto P4



Nota: Esta imagen fue tomada por el II Congreso palmero-mexicano FEMEXPALMA, Confiabilidad asociada a rodamientos en el 2020.

El objetivo del mantenimiento predictivo permite principalmente reducir tiempos muertos de los equipos, así como los tiempos extras y el costo de repuestos del equipo permitiendo alta confiabilidad y calidad operacional, además de la planificación de manera que coincida con paros programados de la planta y conociendo la tendencia podremos saber si se genera un problema.

La manera de evaluar la confiabilidad de un equipo se basa en los siguientes criterios:

La manera de evaluar la confiabilidad de un equipo se basa en los siguientes criterios:

- Gráfica de probabilidad.
- Determinar la probabilidad de falla en cualquier momento de operación.
- Determinar patrones de falla predominantes del elemento (física de la falla).
- Confirmar la selección adecuada de táctica de mantenimiento.
- Calcular la frecuencia de tarea basada en el tiempo.

Para un análisis de falla, es recomendable

Otro punto del mantenimiento predictivo es conocer los equipos y técnicas que requiere el operador o técnico para analizar los parámetros deseados y ver el estado del activo, estos pueden ser lo siguiente:

- Tiempo medio entre fallo (MTBF)

Es la relación entre dos factores: el producto del número de ítems por sus tiempos de operación y el número total de fallas detectadas en esos ítems durante un periodo específico. Esta fórmula debe aplicarse a los ítems que son reparados tras la ocurrencia de una falla.

$$MTBF = \frac{(N^{\circ} \text{ items}) \times (\text{Tiempo de op.})}{(N^{\circ} \text{ total de fallas})} \quad (1)$$

Otra fórmula se podrá presentar de lo siguiente:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

Donde λ es la tasa de falla y se puede presentar de la siguiente manera:

$$\lambda = \frac{N^{\circ} \text{ fallas}}{\text{Horas de operatividad}} \quad (3)$$

- Tiempo medio a reparar (MTTR)

Es la relación entre el tiempo total dedicado a reparaciones en ítems con fallas y el número total de fallas detectadas en esos ítems durante un periodo específico. Esta fórmula se debe aplicar para ítems cuyo tiempo de reparación es considerable en comparación con el tiempo de operación.

$$MTTR = \frac{(\text{Tiempo de mant. Correctivo})}{(N^{\circ} \text{ total de fallas})} \quad (4)$$

- Tiempo medio para la falla (MTTF)

Es la relación entre el tiempo total de operación de un conjunto de ítems no reparables y el número total de fallas detectadas en esos ítems durante un periodo específico. Esta fórmula se aplica para ítems que son sustituidos después de la ocurrencia de la falla.

$$MTTF = \frac{(\text{Tiempo de op.})}{(N^{\circ} \text{ total de fallas})} \quad (5)$$

- Disponibilidad de equipos (A)

Es la relación entre la diferencia entre el total de horas del periodo y las horas dedicadas por el personal de mantenimiento (incluyendo mantenimiento preventivo, correctivo y otros servicios) para cada ítem, en comparación con el número total de horas del periodo.

$$A = \frac{\sum(\text{Horas de calendario} - \text{Horas de intervención})}{(\text{Horas totales de periodo})} \quad (6)$$

La disponibilidad del equipo se puede calcular de dos maneras: como la diferencia entre 1 y la relación entre las horas de mantenimiento y la suma de esas horas

con las de operación de los equipos; o la relación entre el Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF) y la suma del MTBF, el Tiempo Medio de Reparación (MTTR), y los tiempos ineficaces del mantenimiento (como preparación y espera).

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (7)$$

- Medida de fiabilidad

Es la permanencia de la calidad de los productos (o servicios) a lo largo del tiempo. La variable aleatoria que implica la definición de fiabilidad es la duración del funcionamiento o duración de vida (T) y su función de distribución:

$$T = F(t) \quad (8)$$

Siendo la probabilidad de que la duración de vida sea menor o igual a t .

$$F(t) = Pr[T \leq t] \quad (9)$$

Y la probabilidad de que la duración de vida exceda a t .

$$\bar{F}(t) = 1 - F(t) \quad (10)$$

- Función exponencial de Confiabilidad

Esta función permite interpretar y modelar tiempo de vida de los componentes.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (11)$$

Donde λ es la tasa de falla.

- Función de riesgo ($z(t)$)

También es llamado función de tasa de fallos o la función e intensidad. Es la probabilidad condicional instantánea de fallo en cualquier instante. Como tal, es útil caracterizar el comportamiento de fallos de una muestra de dispositivos

$$z(t) = \frac{1}{\bar{F}(t)} \frac{d}{dt} F(t) \quad (12)$$

- Función acumulativa de riesgo ($Z(t)$)

Es la integral de la función de riesgo en un intervalo $(0; t)$, como se puede apreciar en la siguiente formula:

$$Z(t) = \int_0^t z(u)du \quad (13)$$

Esta función se usa para analizar problemas de fiabilidad, especialmente en secuencias de reposiciones de dispositivos. Estima el número de fallos (o reposiciones) en un conjunto de dispositivos funcionando simultáneamente con reposiciones instantáneas. Ayuda a determinar si un componente tiene una tasa de fallos en aumento (IFR), constante (CFR) o decreciente (DFR).

- Distribución de vida de Weibull

Se denomina a un modelo de distribución alternativo, lo cual determina la forma de la función de riesgo, siendo la expresión general presentado de la siguiente fórmula:

$$Z(t) = \alpha\beta t^{\beta-1} \quad (14)$$

- Distribución gamma

Este modelo, al igual que la distribución Weibull, muestra diferentes comportamientos de riesgo: creciente cuando $\beta > 1$, decreciente cuando $\beta < 1$, y constante cuando $\beta = 1$. Aunque es algebraicamente compleja, su ventaja radica en que surge de la convolución de distribuciones exponenciales, lo que la hace relevante para el análisis de procesos de fallos físicos. La función de densidad de la distribución Gamma es la que se utiliza para su representación.

$$f(t) = \frac{\lambda^\beta}{\Gamma(\beta)} t^{\beta-1} e^{-\lambda t} \quad (15)$$

Otro punto del mantenimiento predictivo es conocer los equipos y técnicas que requiere el operador o técnico para analizar los parámetros deseados y ver el estado del activo, estos pueden ser lo siguiente:

a) Análisis de aceite

La técnica de análisis químico de aceites y partículas suspendidas es altamente beneficiosa pero subutilizada en el mantenimiento industrial y minero. Los laboratorios especializados pueden establecer criterios de aceptación/rechazo de aceites y partículas, así como determinar los momentos óptimos de sustitución y las causas de degradación y contaminación. La fricción representa una de las mayores pérdidas en el funcionamiento de las máquinas, donde la potencia absorbida se convierte en pérdidas inversamente proporcionales al rendimiento, distribuidas en cuatro tipos: fricción hidrodinámica, semiseca, metal-metal y por rodadura y cojinetes(González Fernández, 2005, p. 182).

Figura 2.2

Ejemplo de análisis de aceite



Fuente: ALS Prueba de análisis de aceite

b) Termografía

La termografía es una técnica que utiliza fotografías de rayos infrarrojos para detectar áreas con alta temperatura en dispositivos electromecánicos. Permite monitorear continuamente o periódicamente el calentamiento de un material comparándolo con su estado normal o de referencia. La radiación térmica medida revela el nivel de calor en una superficie, el cual varía según la temperatura del objeto. Las causas de calentamiento pueden clasificarse en mecánicas, eléctricas y térmicas, originadas por fricción, efecto Joule y procesos térmicos, respectivamente. La

termografía puede generar imágenes térmicas que ayudan a localizar fuentes de perturbaciones que afecten térmicamente al dispositivo estudiado(González Fernández, 2005, p. 181).

Figura 2.3

Ejemplo de Termografía en motores eléctricos



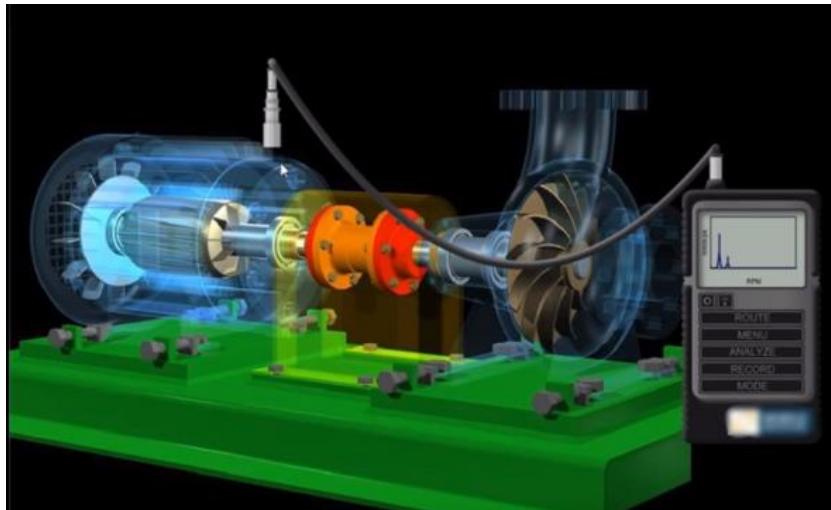
Fuente: Terotecnic Ingeniería Predictiva, España

c) Análisis vibracional

El mantenimiento predictivo mediante vibraciones es un método avanzado en las tecnologías de mantenimiento, donde se analiza la vibración de equipos industriales para detectar posibles fallos. Esta técnica se basa en que todas las máquinas vibran en funcionamiento y esta vibración contiene información sobre su estado. Analizando esta vibración, se puede programar intervenciones preventivas antes de que ocurran averías. Transformar la señal de vibración al dominio de la frecuencia es fundamental, ya que cada frecuencia corresponde a un elemento específico de la máquina y a un problema en ese elemento. Por ejemplo, el desequilibrio en máquinas rotativas se detecta a través de un armónico de frecuencia igual a la velocidad de giro del rotor desequilibrado en el espectro de vibración. Este desequilibrio puede provocar esfuerzos no compensados que afectan a los cojinetes de apoyo, reduciendo su vida útil(González Fernández, 2005, p. 142).

Figura 2.4

Análisis vibracional de un sistema de bombeo



Fuente: PDM Ingeniería, Bogotá

d) Alineamiento

El desalineamiento es tan común en máquinas rotativas como el desequilibrio. A pesar de contar con cojinetes autoalineables y acoplamientos elásticos, alinear dos ejes y sus acoplamientos perfectamente es difícil. El desalineamiento genera fuerzas radiales y axiales en las máquinas acopladas, que se traducen en vibraciones en esas direcciones. Hay varias causas para el desalineamiento, como asentamientos en la fundición, esfuerzos en tuberías, dilataciones térmicas y holguras en las fijaciones. La fuerza y la vibración aumentan con el grado de desalineamiento, pero apenas cambian con la velocidad de giro, excepto cuando se aproximan a la velocidad crítica o a sus submúltiplos. Existen dos tipos de desalineamiento básicos: angular y paralelo. En la práctica, la desalineación entre ejes de máquinas acopladas combina ambos tipos en lo que se denomina desalineación compuesta.

El método de alinear consiste en tomar puntos referenciales de la base del motor y el acople, la base del equipo hasta el acople, midiendo y mediante un láser infrarrojo señala al instrumento referente al equipo rotativo si está señalando al punto referente, caso contrario, el operador comienza a desajustar o ajustar las bases del motor utilizando laines metálicas milimétricas o en pulgadas hasta que el láser indique al punto

referente del instrumento opuesto, además de verificar la medidas de exceso entre el eje del motor y el eje del equipo rotativo.

Figura 2.5

Equipo de Alineamiento SKF TKSA 31



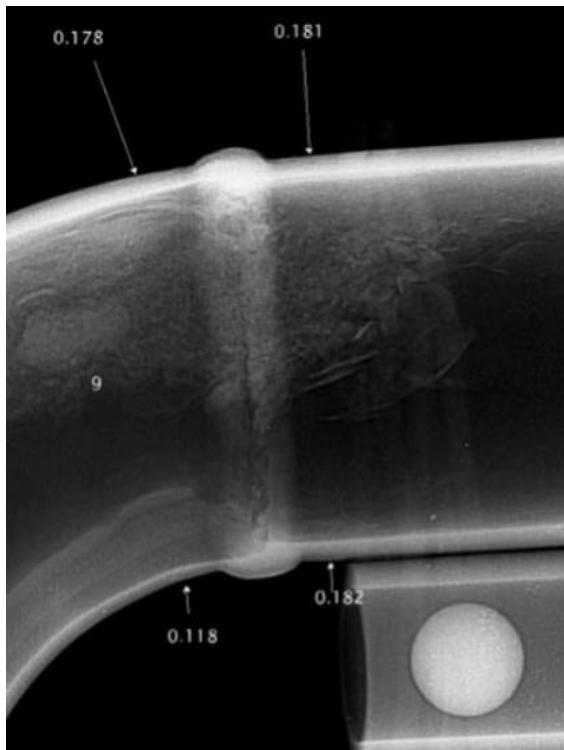
Nota: Imagen propia de alineamiento del acople entre el Blower y motor eléctrico en el área de sopladores de aire de la minera Shouxin Perú S.A.

e) Radiografía

Este método es especialmente efectivo para detectar fallos internos en el material, como grietas, burbujas o impurezas. Para un análisis completo, se recomienda inspeccionar en al menos dos direcciones diferentes para evitar pasar por alto grietas abiertas en la misma dirección que la radiación. La inspección radiográfica es ampliamente utilizada, especialmente en uniones soldadas, y su aplicación y análisis son objeto de numerosos estudios donde la experiencia juega un papel crucial. Existen sistemas de procesamiento de imágenes radiográficas y sistemas expertos para la detección de fisuras en materiales mediante inspección radiográfica, y esta área sigue siendo objeto de investigación activa.

Figura 2.6

Radiografía en los cordones de soldadura de tuberías



Fuente: A & S Predictivo S.A.C. Ingeniería en mantenimiento

f) Inspección visual

Esta técnica de verificación, inicialmente simple, puede volverse tan compleja como sea necesario gracias a la instrumentación sofisticada disponible actualmente. Desde inspecciones visuales directas hasta el uso de microscopios y sistemas endoscópicos, sus métodos varían ampliamente. Aunque se limita a defectos perceptibles físicamente, como grietas o desgaste superficial, presenta limitaciones debido a la falta de accesibilidad a ciertos elementos y la incapacidad para detectar fallos internos o cubiertos por pintura u óxido. A pesar de su simplicidad y bajo costo, no debe subestimarse, ya que la experiencia es crucial para interpretar las evidencias y detectar incluso los indicios más pequeños de un defecto. Los técnicos de mantenimiento, con años de experiencia, pueden desarrollar un conocimiento profundo en la identificación visual de fallos, lo que sugiere que esta técnica podría ser la base de un sistema experto debido a su capacidad para generar reglas de diagnóstico específicas y generalizables (Gómez de León, 1998, p. 79).

Figura 2.7

Inspección visual de un técnico revisando los componentes de acuerdo al estado



Fuente: <https://power-mi.com/es/content/%C2%BFqu%C3%A9-es-la-inspecci%C3%B3n-visual>

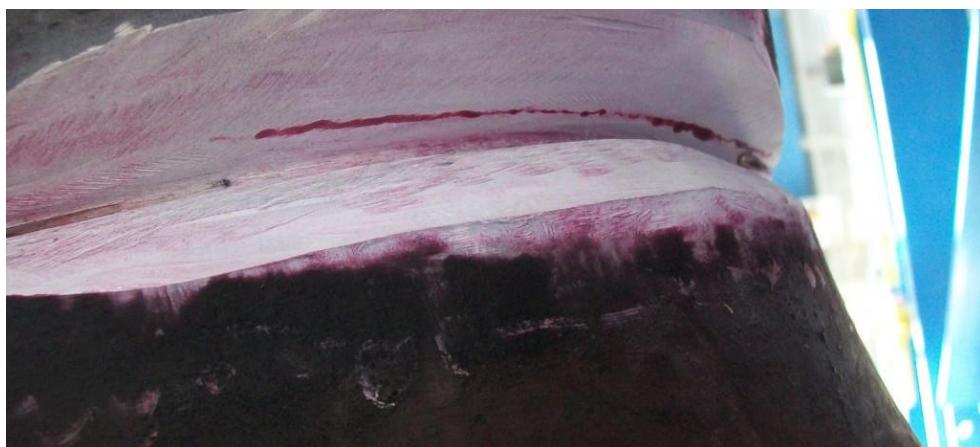
g) Líquidos penetrantes

Este método de inspección no destructiva se utiliza para detectar fisuras superficiales o defectos internos en materiales que presentan aberturas en su superficie.

La prueba implica la aplicación de líquidos o tinturas especiales en la superficie a inspeccionar y luego la observación de las marcas dejadas en una superficie auxiliar de contacto. El proceso incluye limpiar la superficie del material, aplicar la tintura, permitir que penetre en las fisuras, y luego retirar el exceso de tintura para revelar las marcas que indican la ubicación de los defectos(Gómez de León, 1998, p. 80).

Figura 2.8

Ensayo de Líquidos penetrantes



Fuente: Terotecnic Ingeniería Predictiva, España

h) Partículas magnéticas

Este método describe otra técnica de inspección no destructiva para encontrar fisuras en materiales, que difiere de la técnica de líquidos penetrantes en su enfoque en fisuras no superficiales. Esta técnica se basa en el principio de magnetización de materiales ferromagnéticos bajo un campo magnético. Sin embargo, no es adecuada para materiales no magnetizables como latón, cobre o aluminio. El proceso implica limpiar la superficie del material, aplicar un campo magnético uniforme, esparcir partículas magnéticas sobre la superficie y luego examinar el patrón de distribución de las partículas para detectar discontinuidades en el material.

Figura 2.9

Ensayo no destructivo aplicando partículas magnéticas en tubería



Fuente: PDM Group, Lima

i) Ultrasonido

Explicando estos conceptos básicos y técnicas de medición e inspección de parámetros va la otra rama que es la lubricación de equipos. En el caso de la lubricación va generando parámetros que van alterando a través del tiempo ejemplos la temperatura que es afectada por las cargas de rotación del eje como pueden ser axiales, transversales y torque de acuerdo a la frecuencia de funcionamiento, desgaste por la ebullición del lubricante o contacto entre cuerpos, etc. Al estudiar el comportamiento facilita en reducir los costos y optimiza la vida útil del activo (Gómez de León, 1998, p. 81).

Figura 2.10

Prueba de ultrasonido en acople de motor eléctrico



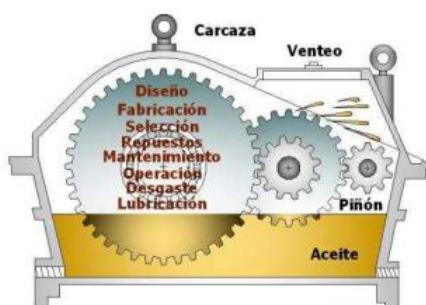
Fuente: Terotecnic Ingeniería Predictiva, España

Por otro lado, la lubricación se define como el proceso de introducir un material entre las superficies en movimiento para reducir la fricción y el desgaste. El término "lubricante" es amplio y puede referirse a materiales en diversos estados físicos: líquidos, sólidos, gaseosos, e incluso semisólidos o pastosos.

En esencia, el objetivo de la lubricación es crear una capa intermedia que separa las superficies en movimiento relativo. Esto permite que las superficies se deslicen suavemente una sobre otra con una fricción reducida, lo que contribuye a la eficiencia y la vida útil de los componentes mecánicos. Los lubricantes pueden variar significativamente en sus propiedades y composición según la aplicación específica y las condiciones de operación.

Figura 2.11

Ejemplo de lubricación de equipo



Fuente: Tribos Ingeniería SAS-Tribología y lubricación, Colombia

Existen 4 tipos de lubricación y son lo siguiente

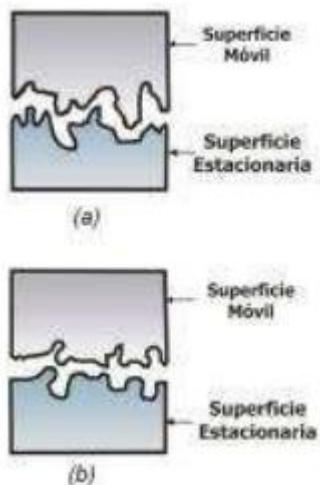
- Lubricación Límite

Se forma una capa delgada que se adhiere a las superficies metálicas. Esta capa previene el contacto directo metal-metal cuando las superficies deslizan una sobre la otra, evitando así el desgaste adhesivo. Este tipo de lubricación es especialmente crucial cuando un mecanismo inicia o se detiene, ya que en esos momentos las superficies están más propensas a entrar en contacto directo debido a las bajas velocidades de movimiento relativo.

La capa de lubricante en la lubricación por película límite es extremadamente delgada y sujeta a presiones muy altas. Su función es proporcionar una separación suficiente entre las superficies para prevenir el desgaste prematuro y asegurar un funcionamiento suave y duradero de los componentes mecánicos.

Figura 2.12

Lubricación Límite



Fuente: Tribos Ingeniería SAS-Seminario Tribología y lubricación, Colombia

- Lubricación Mixta

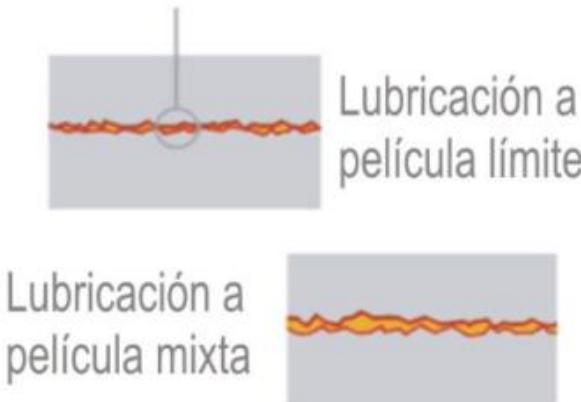
En la lubricación mixta, se presenta una condición intermedia entre las películas límite e hidrodinámica. En esta situación, algunas partes de las crestas de las superficies en movimiento interactúan directamente, lo que corresponde a la película límite,

mientras que otras áreas ya están separadas lo suficiente, donde la película límite no tiene influencia.

Figura 2.13

Comparación entre lubricación límite y lubricación mixta animado

Asperezas



Fuente: Noria-Lubricantes y la lubricación, México

- Lubricación hidrodinámica

La lubricación hidrodinámica ocurre cuando las dos superficies metálicas están completamente separadas por una película de lubricante fluido. Las superficies están separadas por el lubricante fluido, y el consumo de energía y la estabilidad de la película fluida son aspectos críticos para el rendimiento y la durabilidad del sistema mecánico.

Figura 2.14

Lubricación Hidrodinámica



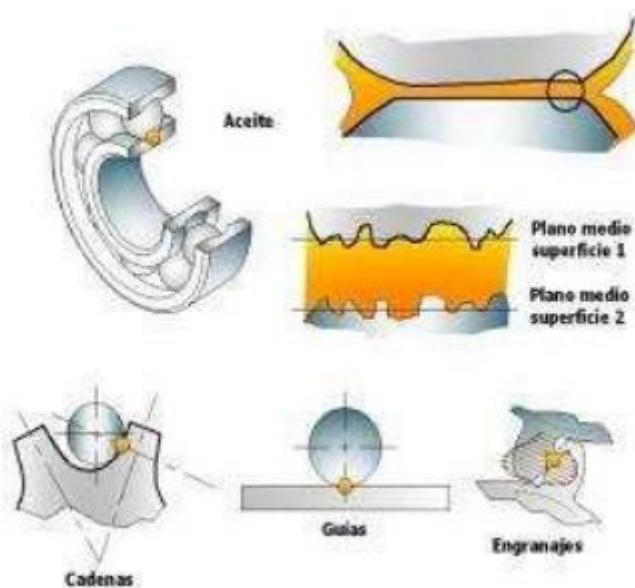
Fuente: Tribos Ingeniería SAS-Seminario Tribología y lubricación, Colombia

- Lubricación elasto-hidrodinámica (EHL)

La lubricación elasto-hidrodinámica (EHL), descubierta en los años 50 por Duncan Dowson y Gordon Higginson, es crucial para mecanismos que operan bajo altas cargas y bajas velocidades. En EHL, las superficies de fricción con rugosidades entrelazadas deforman elásticamente sus crestas, manteniendo una película de lubricante adherida que soporta cargas y resistencia al desgaste significativamente mayores que en la lubricación límite convencional. Esta película es hidrodinámica a escala microscópica, mucho más delgada que en la lubricación hidrodinámica tradicional. EHL garantiza una lubricación constante desde el arranque hasta la operación nominal, esencial para aplicaciones exigentes donde se requiere alta durabilidad y eficiencia.

Figura 2.15

Ejemplo de lubricación elasto-hidrodinámica



Fuente: Tribos Ingeniería SAS-Seminario Tribología y lubricación, Colombia

2.1.2 Instrumentación y el sistema de control análogo

Instrumentación es una disciplina que facilita las medidas y calibración de equipos e instrumentos además del control con la finalidad de automatizar la industria por ejemplo fabricación de productos como envases, materiales de aceros, textil,

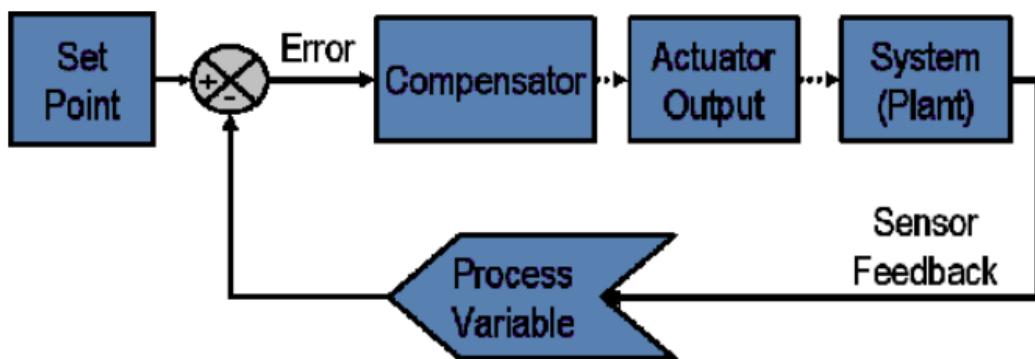
producción de combustibles, minería, etc. Aplicado bajo diferentes sistemas como puede ser el sistema de control análogo y discreto.

El control análogo está formado por un modelo PID (proporcional, integral y derivativo) midiendo la variable mediante la lectura del controlador (set point) al sensor (elemento) para calcular la salida deseada que requiere la variable deseada terminando el proceso a un actuador, relé, válvula de control, etc. Siendo la señal de salida. Este proceso se conoce como Lazo de Control y tiene dos tipos, lazo de control simple (solo hay un controlador) y lazo de control cascada (tiene dos controladores, uno primario y secundario).

Un sistema de control típico, donde la variable de proceso, como la temperatura, presión o caudal, es monitoreada por un sensor. El punto de consigna es el valor deseado para esta variable. Un algoritmo de control utiliza la diferencia entre la variable del proceso y el punto de consigna para determinar la salida del actuador, como encender un calentador. Este proceso se repite continuamente en un bucle cerrado para mantener el sistema controlado(Taconi E; Mantz, R; Solsora, J; Puleston, P, 2005).

Figura 2.16

Control PID en diagrama de bloques



Fuente: Imagen tomada de National Instrument, *PID Theory Explained*

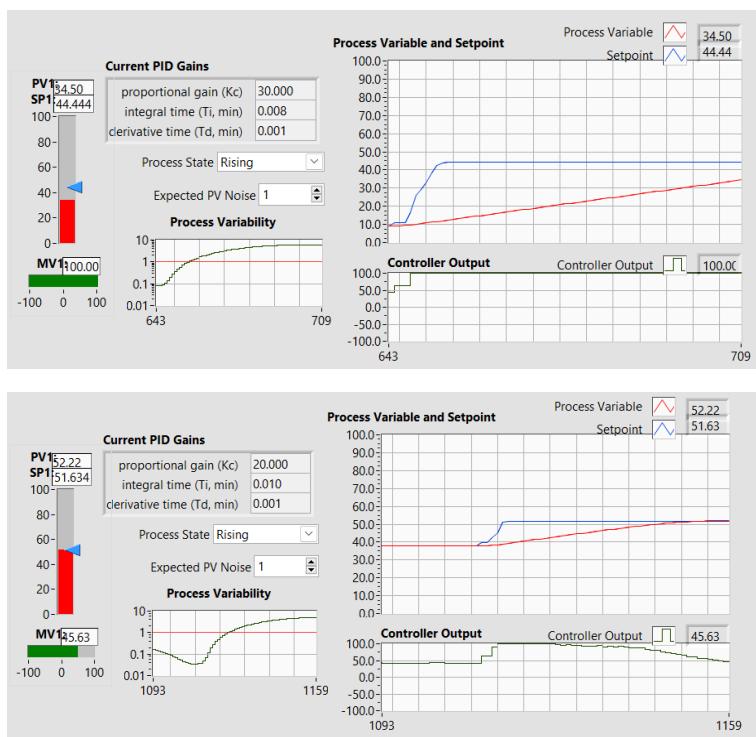
El diseño del control comienza con la definición de los requisitos de rendimiento. Se evalúa el rendimiento del sistema aplicando una función escalonada como entrada y midiendo la respuesta del proceso. Los parámetros de rendimiento incluyen el tiempo

de subida, el porcentaje de rebasamiento, el tiempo de estabilización y el error de estado estacionario. Estas magnitudes pueden variar según el sector y el ámbito académico.

El componente proporcional depende únicamente de la diferencia entre el punto de ajuste y la variable del proceso. Esta diferencia se conoce como término de error. Gain proportional o la ganancia proporcional (K_c) determina la relación entre la respuesta de salida y la señal de error. Por ejemplo, si el término de error tiene una magnitud de diez, una ganancia proporcional de cinco produciría una respuesta proporcional de cincuenta. En general, aumentar la ganancia proporcional aumentará la velocidad de respuesta del sistema de control. Sin embargo, si la ganancia proporcional es demasiado grande, la variable del proceso comenzará a oscilar. Si K_c se aumenta aún más, las oscilaciones serán mayores y el sistema se volverá inestable, pudiendo incluso oscilar fuera de control.

Figura 2.17

Simulación de PID verificando como varia la curva de la Variable del proceso respecto a la variable real (Set point) en función del K_c (Ganancia proporcional) valor a treinta puntos comparado al K_c de veinte puntos



(Nota: Este diseño fue tomado de los ejemplos del programa LabVIEW llamado "Gain proportional Scheduling or Rising and fallen process Variable")

2.1.3 Transferencia de calor por conducción de los elementos giratorios y la chumacera

La conducción térmica en rodamientos es un fenómeno fundamental en la ingeniería de maquinaria rotativa, ya que la transferencia de calor en estos componentes afecta directamente su desempeño, fiabilidad y vida útil. Los rodamientos, como elementos esenciales en sistemas mecánicos, permiten la rotación de un eje mediante el contacto entre superficies de alta fricción, como los rodillos o bolas y las pistas del rodamiento. Durante este proceso, se genera calor debido a la fricción entre estas superficies, y la capacidad de los rodamientos para disipar este calor mediante conducción térmica tiene un impacto significativo en su funcionamiento.

La conducción térmica es el proceso mediante el cual el calor se transmite a través de un material sin que éste experimente movimiento. En un rodamiento, la principal fuente de calor proviene de la fricción interna entre los elementos rodantes (como bolas o rodillos) y las pistas del rodamiento, así como de la compresión de los componentes bajo carga. Este calor se propaga desde las zonas de mayor temperatura hacia las áreas más frías del rodamiento, los materiales circundantes o el entorno exterior.

El estudio de la conducción térmica en rodamientos tiene una importancia crítica debido a que el calor excesivo puede alterar las propiedades de los materiales y afectar la lubricación. Un aumento de temperatura puede disminuir la viscosidad de la grasa lubricante, lo que incrementa la fricción y acelera el desgaste, reduciendo la eficiencia y la vida útil de los rodamientos. Además, las temperaturas elevadas pueden provocar la expansión térmica de los componentes, lo que a su vez puede afectar la alineación y el funcionamiento del sistema.

Los factores que influyen en la conducción térmica en rodamientos incluyen:

- El material de los rodamientos: Los metales utilizados, como el acero o las aleaciones especiales, tienen diferentes capacidades de conducción

térmica. Los materiales con alta conductividad térmica permiten una disipación de calor más eficiente.

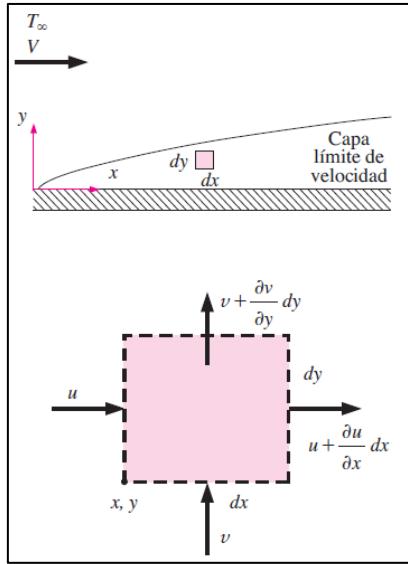
- La geometría del rodamiento: El tamaño y la forma de los rodamientos influyen en la distribución del calor y en la capacidad de disipación. Un rodamiento más grande generalmente tiene una mayor masa que ayuda a absorber y distribuir el calor.
- Las condiciones de operación: Factores como la velocidad de rotación, la carga aplicada y la viscosidad de la grasa de lubricación afectan la cantidad de calor generado y la capacidad del rodamiento para disiparlo.

El análisis de la conducción térmica en los rodamientos se convierte, por lo tanto, en una herramienta clave para la optimización del diseño de sistemas mecánicos, ya que una gestión eficiente del calor contribuye a mejorar la fiabilidad y alargar la vida útil de los rodamientos. A través de simulaciones térmicas, pruebas experimentales y selección adecuada de materiales y lubricantes, los ingenieros pueden diseñar sistemas que mantengan las temperaturas dentro de rangos operativos seguros, evitando fallos y minimizando los costos de mantenimiento.

En esta sección se derivan las ecuaciones que describen el flujo de fluidos en las capas límite, bajo las suposiciones de un flujo estacionario y bidimensional, con un fluido newtoniano de propiedades constantes (como densidad, viscosidad y conductividad térmica). Se analiza el flujo paralelo de un fluido sobre una superficie, considerando la dirección del flujo como la x y la dirección perpendicular a la superficie como la y . Para el análisis, se utiliza un elemento diferencial de volumen con dimensiones x e y , además de profundidad unitaria en la dirección z . El fluido se mueve sobre la superficie con una velocidad uniforme en la corriente libre V , pero la velocidad varía dentro de la capa límite, como se aprecia en la figura.

Figura 2.18

Volumen diferencial de control usado en la deducción del balance de masa en la capa límite de la velocidad en el flujo bidimensional sobre una superficie



Nota: Esta figura fue tomada del libro Transferencia de Calor y Masa de Cengel, Cuarta edición

$$u = u(x; y)$$

$$v = v(x; y)$$

Procediendo la ecuación de continuidad para el balance de flujo bidimensional estacionario del fluido se presentó lo siguiente:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

Determinando la conservación de cantidad de movimiento en dirección del eje x se muestra lo siguiente:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (17)$$

La energía del fluido con disipación

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ 0 &= k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \end{aligned} \quad (18)$$

μ : Viscosidad del lubricante

k : Conductividad térmica del lubricante

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Separador magnético

Como se mencionó anteriormente en el capítulo uno, el separador magnético es un equipo usado en minería que tiene como función separar el relave de las partículas del mineral (mayormente en minerales de hierro), principalmente tiene su parte un tambor magnético revestido de caucho que gira en dirección al depósito del mineral concentrado también cuenta con limpieza para el revestimiento contando con un depósito de agua de alimentación que normalmente quedan pegado en el tambor por su electronegatividad evitando la acumulación del mineral contando su cojinete adecuado de acuerdo al fabricante y la chumacera que protege el cojinete y el eje del tambor magnético.

Figura 2.19

Separadores magnéticos



Nota: Imagen propia, los activos perteneces a una minera operativa en el sur del Perú

2.2.2 Cojinete

Los cojinetes son componentes de máquina diseñados para permitir que un eje gire libremente mientras soporta carga. Existen varios tipos, destacándose los rodamientos y los cojinetes hidrodinámicos. Estos últimos son especialmente relevantes tanto en teoría como en la práctica. Durante su funcionamiento normal, evitan el contacto directo entre superficies sólidas en movimiento al interponer una capa de fluido entre ellas, sin requerir equipos adicionales como bombas. Esta característica teóricamente les permite tener una vida útil ilimitada.

Además, los cojinetes hidrodinámicos poseen dos cualidades significativas: primero, logran soportar cargas al generar una resistencia mínima al movimiento relativo de las superficies; segundo, tienen la capacidad de amortiguar cargas dinámicas en diversas condiciones. Estas propiedades los hacen fundamentales en aplicaciones donde se requiere fiabilidad y resistencia al desgaste, especialmente en entornos industriales exigentes.

Figura 2.20

Rodamiento angular SKF 7320



Fuente: Imagen tomada del catálogo marca SKF

2.2.3 Chumacera

La chumacera es un componente diseñado para soportar cargas pesadas, caracterizado por tener un rodamiento de rodillos cónico doble montado en su alojamiento. Estos rodamientos están equipados con tazas que incrementan significativamente su capacidad para manejar tanto cargas axiales como radiales. Además, cada lado de la chumacera cuenta con sellos que protegen los rodamientos, asegurando que permanezcan lubricados y libres de contaminantes externos. También incluyen una boquilla para la inyección de lubricante hacia los cojinetes.

La chumacera encuentra aplicación en diversas industrias donde se enfrentan condiciones de trabajo pesado y se requiere capacidad de carga elevada, un ejemplo de su uso es en el tambor magnético de un separador magnético, donde su robustez y

capacidad para soportar cargas pesadas son cruciales para el funcionamiento eficiente del equipo.

Figura 2.21

Chumacera (imagen izquierda del protector de acople de color amarillo) unido al reductor



Nota: Imagen propia, repuesto perteneciente de la minera Shouxin Perú S.A.

2.2.4 Grasa

La grasa es un lubricante con apariencia mantecosa diseñado para prevenir el contacto directo entre dos superficies, reduciendo así la fricción y el desgaste. A pesar de ser efectiva contra el contacto, sus propiedades tribológicas se ven afectadas con el tiempo, condiciones ambientales y parámetros mecánicos como velocidad radial, torque y presión. Esto puede aumentar la viscosidad, temperatura y desgaste del lubricante, además de causar contaminación que perjudica el funcionamiento y los materiales de los equipos y piezas involucradas.

La grasa se emplea típicamente en aplicaciones que operan a velocidades y temperaturas normales. Tiene ventajas sobre el aceite, como una instalación más sencilla y la capacidad de proporcionar protección contra la humedad y las impurezas. Se utiliza principalmente en la lubricación de cojinetes de fricción y antifricción, levas, guías, correderas, piñonería abierta y algunos tipos de rodamientos.

- Grasas c醙icas

Son insolubles en agua, con una temperatura de ebullición alrededor de 80°C.

Son económicas y adecuadas para lubricación de rodamientos en condiciones de velocidad moderada hasta 70°C.

- Grasas sódicas

Tienen un aspecto fibroso y resisten temperaturas de ebullición hasta aproximadamente 120°C. Se utilizan principalmente para rodamientos que deben protegerse del contacto con agua u otros medios.

- Grasa de aluminio

Transparentes y fibrosas, también insolubles en agua. Son muy adhesivas y estables, resistiendo hasta 100°C. Se emplean en aplicaciones como cadenas, engranajes y cables.

- Grasa de litio

También fibrosas, resistentes al agua y efectivas en un rango amplio de temperaturas, desde -20°C hasta 120°C. Son comúnmente utilizadas en rodamientos y pivotes de manguera en automóviles.

- Grasa de bario

Fibrosas y altamente resistentes al agua, con una temperatura máxima de trabajo de aproximadamente 180°C. Son versátiles y se utilizan en aplicaciones generales donde se requiere alta resistencia a condiciones severas.

2.2.5 Indicador

Son valores que reciben las variables de salida. Los indicadores emplean casi las mismas características de los controladores, pero se añade las gráficas que formulan una función o valores que se ejecuta en el controlador.

2.2.6 Controlador

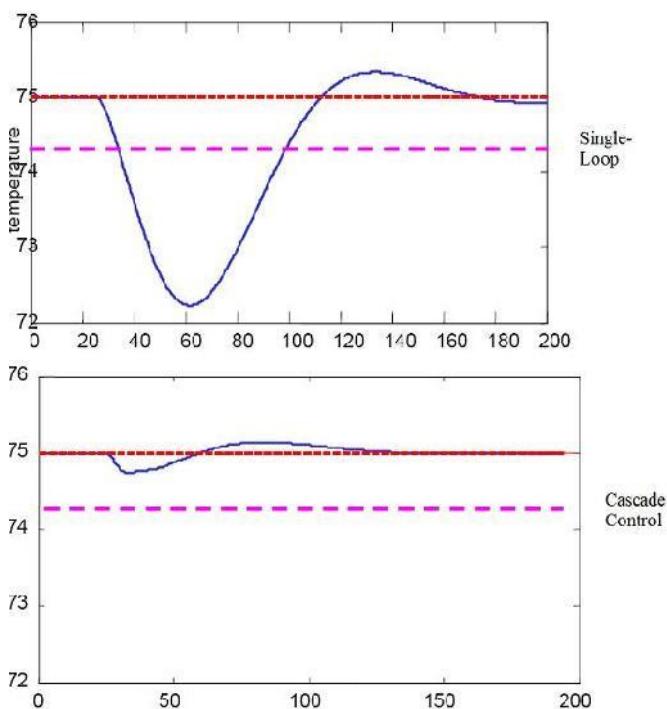
Son terminales que interactúan con la entrada de los datos. Los elementos controlados pueden ser numéricos, sistemas booleanos, textos y tipos compuestos.

2.2.7 Lazo de control cascada

Un lazo de control en cascada es un sistema avanzado que emplea dos controladores PID: uno primario y otro secundario. El controlador primario ajusta el setpoint del proceso principal, mientras que el controlador secundario regula una variable secundaria que influye directamente en la variable controlada por el primario. Este enfoque secuencial optimiza la respuesta dinámica, minimiza perturbaciones externas y mejora la precisión del control en sistemas complejos, garantizando una operación más eficiente y estable.

Figura 2.22

Comparación de perturbación de diagramas de un lazo de control simple y otra cascada corrigiendo la tendencia de manera rápida



(Nota: esta imagen fue tomada del siguiente link:
[https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADAdmicos_\(Woolf\)/11%3A_Arquitecturas_de_control/11.03%3A_Control_en_cascada](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADAdmicos_(Woolf)/11%3A_Arquitecturas_de_control/11.03%3A_Control_en_cascada))

2.2.8 Sintonización

La sintonización de los controladores Proporcional-Integral-Derivativo (PID) implica ajustar sus parámetros (K_c , T_i , T_d) para lograr un comportamiento adecuado y

robusto del sistema de control, de acuerdo con criterios de desempeño establecidos.

Para ello, es fundamental identificar la dinámica del proceso y luego determinar los parámetros del PID utilizando métodos específicos de sintonización.

Matemáticamente se puede representar de la siguiente ecuación 1:

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (19)$$

Y en transformada de Laplace es lo siguiente ecuación 2:

$$U(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (20)$$

Donde

K_c : Ganancia proporcional

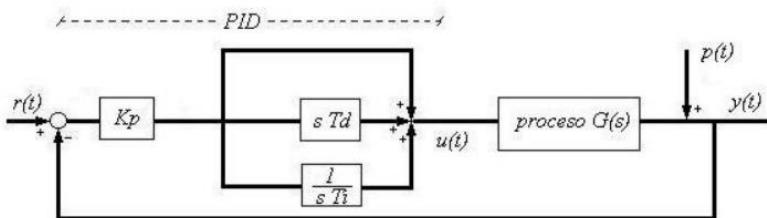
T_i : Constante de tiempo integral

T_d : Constante de tiempo derivativo

Formando el siguiente diagrama de bloques:

Figura 2.23

Estructura PID no interactivo o sistema ISA



Fuente: Controladores basados en estrategias PID, Buenos Aires.

En un lazo de control realimentado, que consta de dos entradas (el valor deseado $r(t)$ y la perturbación $p(t)$) y una salida (la señal realimentada $y(t)$), es necesario comprender los diferentes modos de operación antes de aplicar técnicas de sintonización disponibles.

2.2.9 Método Ziegler-Nichols

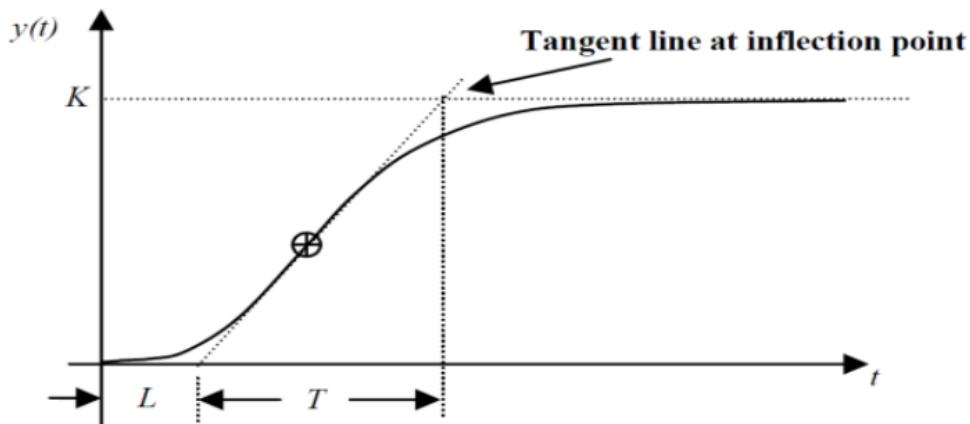
El método desarrollado por Ziegler y Nichols para el cálculo de parámetros de un controlador PID se basa en alcanzar un decaimiento del error de 1/4 del período de

oscilación. Estas ecuaciones fueron empíricamente derivadas a partir de pruebas de laboratorio en diversos procesos, utilizando un modelo de primer orden con tiempo muerto identificado mediante el método de la tangente. Este método se aplica principalmente a controladores PID ideales, aunque hay debates sobre su aplicabilidad a sistemas que presentan interacciones entre sus componentes.

El primer método de sintonización de Ziegler-Nichols, aplicado a control de lazo cerrado, consiste en trazar una tangente a la curva de función de transferencia de la planta, si en el caso no tiene integradores ni polos complejos.

Figura 2.24

Gráfica de sistema de lazo abierto



Fuente: *GUI Based Control System Analysis Using PID Controller for Education, Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*

Una curva en “S” puede caracterizarse por 2 constantes: el tiempo de retraso L y la constante de tiempo T . Así, la función de transferencia del sistema se aproxima por una función de primer orden con una ganancia estática K y una constante de tiempo T , además de un tiempo de retraso L que se muestra en la siguiente ecuación:

$$G_P = K \frac{e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (21)$$

- Tipo de controlador P:

$$K_p = \frac{T}{L} \quad (22)$$

$$T_i \approx \infty \quad (23)$$

$$T_d = 0 \quad (24)$$

- Tipo de controlador PI:

$$K_p = 0.9 \frac{T}{L} \quad (25)$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} \quad (26)$$

$$T_d = 0 \quad (27)$$

- Tipo de controlador PID:

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} \quad (28)$$

$$T_i = 2L \quad (29)$$

$$T_d = 0.5L \quad (30)$$

El segundo método de Ziegler Nichols consiste en aumentar el valor del K_c hasta obtener ciertas oscilaciones sostenida en la salida teniendo ganancia crítica y periodo crítico P_{cr} . Al tener estos valores se pasará al cálculo de variables de sintonización de acuerdo al lazo que se verá en la siguiente tabla de acuerdo al sistema de lazo usado (si es P, PI o PID):

- Tipo de controlador P:

$$K_p = 0.5K_{cr} \quad (31)$$

$$T_i \approx \infty \quad (32)$$

$$T_d = 0 \quad (33)$$

- Tipo de controlador PI:

$$K_p = 0.45K_{cr} \quad (34)$$

$$T_i = \frac{1}{1.2}P_{cr} \quad (35)$$

$$T_d = 0 \quad (36)$$

- Tipo de controlador PID:

$$K_p = 0.6K_{cr} \quad (37)$$

$$T_i = 0.5P_{cr} \quad (38)$$

$$T_d = 0.125P_{cr} \quad (39)$$

2.2.10 Método de Cohen Coon

Es un método de sintonización para los controladores PID con la finalidad de sintonizar procesos con retardos más elevados. La sintonía de Cohen y Coon tiende a generar sintonías agresivas, y, como en otros métodos de sintonización, puede usarse como base para ajustar los parámetros del controlador, realizando posteriormente ajustes finos.

Como se presenta en la figura "", este método se presenta lo siguiente:

- Tipo de controlador P:

$$K_p = \frac{3T + L}{3LK} \quad (40)$$

$$T_i \approx \infty \quad (41)$$

$$T_d = 0 \quad (42)$$

- Tipo de controlador PI:

$$K_p = \frac{10.8T + L}{12LK} \quad (43)$$

$$T_i = \frac{L(30T + 3L)}{9T + 20L} \quad (44)$$

$$T_d = 0 \quad (45)$$

- Tipo de controlador PID:

$$K_p = \frac{16T + 3L}{12LK} \quad (46)$$

$$T_i = \frac{L(32T + 6L)}{13T + 8L} \quad (47)$$

$$T_d = \frac{4LT}{11T + 2L} \quad (48)$$

Implementando estos valores a la siguiente ecuación del PID se presenta lo siguiente:

$$G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (49)$$

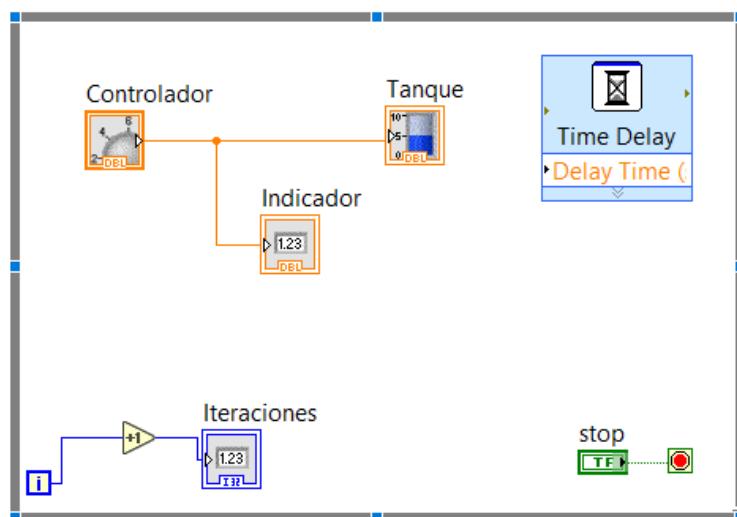
2.2.11 Funciones de LabVIEW

- Estructura While loop

La estructura While Loop se ejecuta repetidamente mientras una condición específica sea verdadera. Esto significa que el código dentro del bucle se repetirá continuamente hasta que la condición se vuelva falsa. Es importante destacar que, a diferencia de otros bucles como el “For Loop”, un “White loop” puede ejecutarse al menos una vez, incluso si la condición inicialmente es falsa(Lajara Vizcaíno & Pelegrí Sebastiá, 2011, p. 61).

Figura 2.25

Ejemplo de estructura While Loop



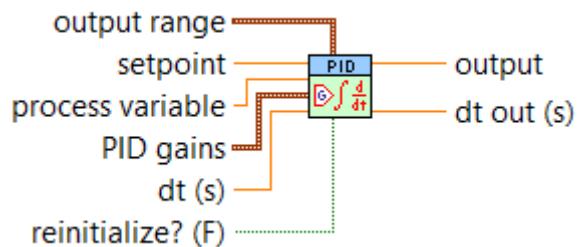
Nota: Este ejemplo fue simulado en el programa LabVIEW versión 2021

- Control y simulación PID

Es una herramienta que ayuda a simular las variables bajo un sistema PID comparando la variable medida con la variable real (Setpoint) además de sintonizar bajo valores de ganancia proporcional, integral y derivativo.

Figura 2.26

Ícono y conexiones para la herramienta PID



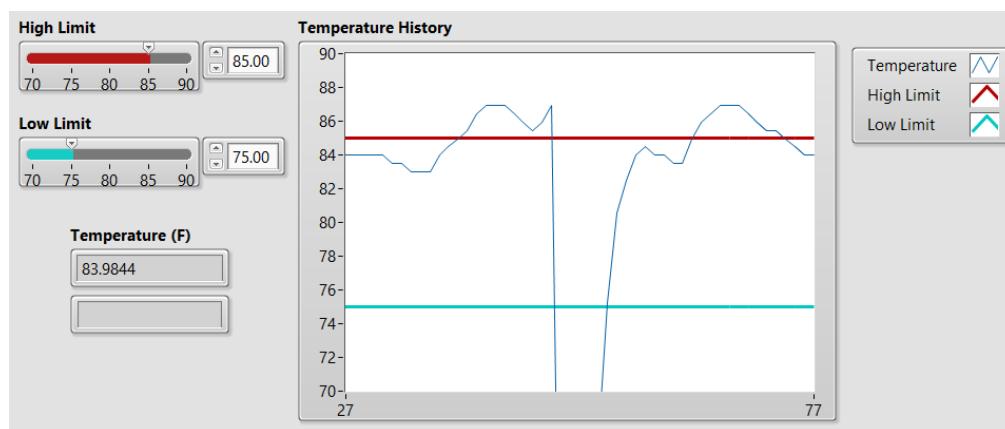
Fuente: LabVIEW versión 2021

- Gráfico de ondas (Waveform chart)

Ayuda a monitorear el controlador e indicador depende de su estructura.

Figura 2.27

Monitoreo de temperatura



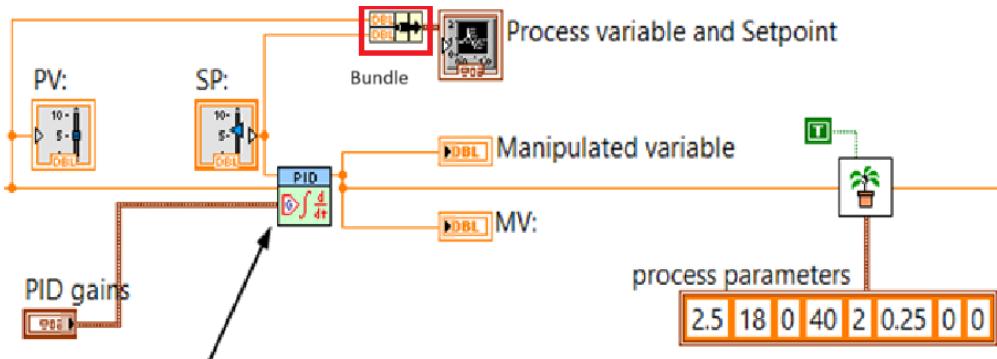
Fuente: Temperature monitoring-Ejemplos de LabVIEW

- Bundle

Es una herramienta que une los valores para visualizar su evolución grafica en el gráfico de ondas.

Figura 2.28

La herramienta Bundle unido al ícono Waveform Chart



Nota: El Bundle está unido a la variable medida por el instrumento (Process variable) y la variable real (Setpoint) tomado como ejemplo General PID Simulator, ejemplo del programa LabVIEW

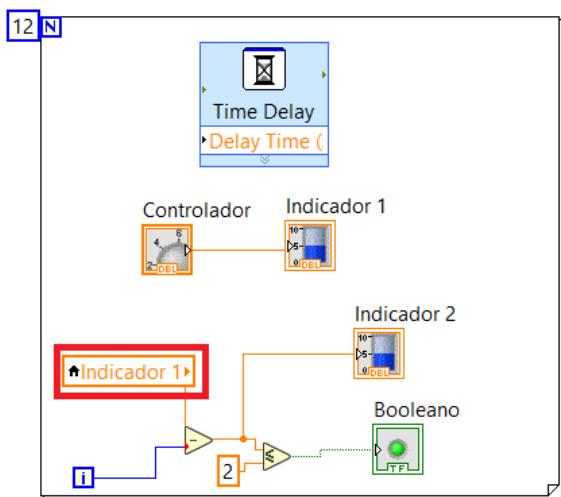
- Variable local (Local variable)

Las variables locales en LabVIEW son copias de los terminales de un control o indicador que permiten leer o escribir datos desde cualquier parte del diagrama.

Un ejemplo se va mostrar en la siguiente imagen donde el controlador va señalar valores y va mandar al indicador 1 pero quiero controlar el indicador 2 de acuerdo al valor del indicador 1, por eso se creó un “Local variable” del indicador 1 cambiando a modo lectura (en modo práctica convertirlo en un controlador más que lea el valor del indicador 1) así relacionando al indicador 2.

Figura 2.29

Ejemplo de “Local variable” en LabVIEW



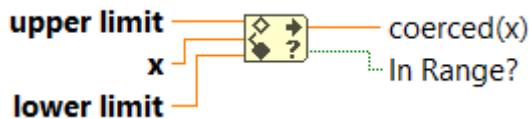
Nota: La local variable está marcado de color rojo leyendo al indicador 1 y variando su valor para que lea el indicador 2.

- Sistema de comparación entre rangos (In Range and Coerce)

Ayuda a comparar entre cierto rango tomando el máximo y mínimo valor con la finalidad de relacionar con elementos booleanos si está en el rango permitido.

Figura 2.30

Ícono de *In Range and Coerce* de LabVIEW



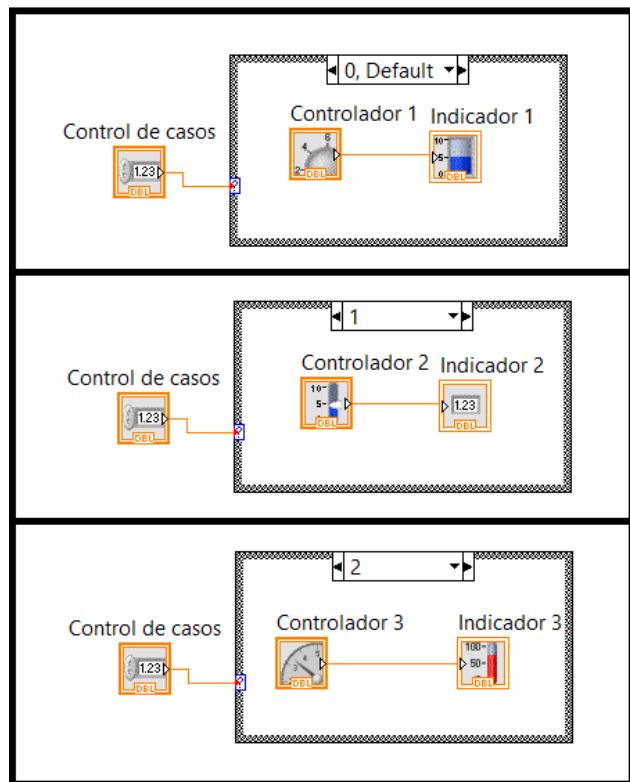
Fuente: LabVIEW versión 2021

- Caso estructura (Case structure)

El diagrama “Case structure” tiene como objetivo relacionar varios subdiagramas o casos que son ejecutados de acuerdo al valor de entrada determinando una función por cada caso de acuerdo al sistema.

Figura 2.31

Ejemplo del “Case structure” tomando por diferentes casos



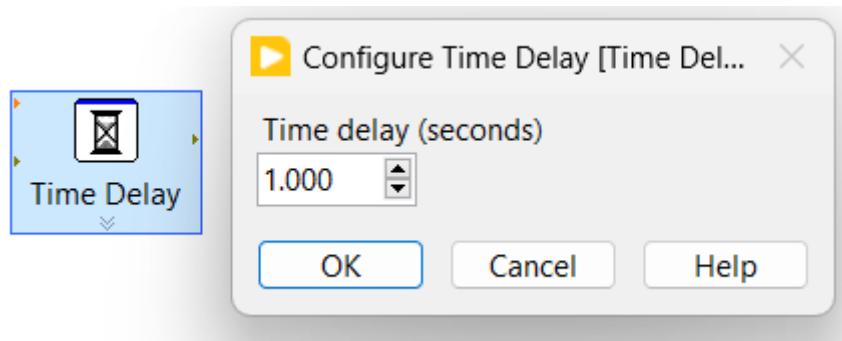
Nota: Diseñado un ejemplo básico en LabVIEW versión 2021

- Tiempo de retraso (Time Delay)

Ayuda a la simulación en correr de manera continua de acuerdo al tiempo de retraso que se añade, si por defecto se inserta 1 segundo, entonces la simulación va correr por cada segundo que pase.

Figura 2.32

Ícono y configuración del “Time Delay” en LabVIEW



Fuente: LabVIEW versión 2021

CAPÍTULO III

Desarrollo de la tesis

El desarrollo de la tesis se enfoca en el desarrollo del algoritmo bajo programación gráfica utilizando el software LabVIEW, sometido a diferentes casos el funcionamiento del control de temperatura y sistema de alarma, además de un indicador de nivel de grasa para el depósito de lubricante, así se determina si el instrumento está inyectando grasa para su refrigeración hacia la chumacera.

Al comienzo, con el fin del desarrollo del algoritmo se llevó a cabo medidas presenciales de temperaturas hacia las chumaceras de los separadores magnéticos, analizando la variación de curvas de cada separador magnético con el fin de inspeccionar que equipo es más crítico a su disponibilidad. Como se puede apreciar la siguiente *tabla 3.1*, para apreciar buena optimización de funcionamiento del separador magnético se toma lo siguiente:

Tabla 3.1

Plan para la Lubricación de la Chumacera del Separador Magnético

Información básica de lubricación			
	Artículo de lubricación	Cantidad de lubricante	Intervalo de llenado
1	cojinete del extremo de no motriz	8-10ml	1 vez por semana
2	cojinete deslizante	5-8ml	1 vez por día
3	cojinete del extremo de motriz	200ml	1 vez por día

Esta información proporciona un proceso de lubricación manual, con la finalidad de no presentar futuras fallas o desgaste de componentes del separador magnético. No obstante, por temas de baja lubricación, desalineamiento del equipo, balanceo incorrecto del reductor, se aprecia medidas de temperaturas altas, lo cual se valúa una escasez de grasa, se puede evaluar en las siguientes tablas como varía las temperaturas medidas al día:

Tabla 3.2

Registro de temperaturas de las chumaceras de los separadores magnéticos del mes de agosto

Registro de temperaturas medidas hacia las chumaceras de los separadores magnéticos. Mes Agosto				
Fecha	Temp. SM 1 (C°)	Temp. SM 2 (C°)	Temp. SM 3 (C°)	Temp. SM 4 (C°)
1/08/2023	35.00	44.00	38.00	60.00
2/08/2023	34.00	48.00	38.10	60.00
3/08/2023	40.40	76.70	51.60	45.60
4/08/2023	51.80	73.00	50.50	46.90
5/08/2023	78.50	79.20	50.50	50.70
6/08/2023	37.90	77.30	51.10	53.00
7/08/2023	69.30	78.10	52.20	53.20
8/08/2023	77.00	79.80	51.00	55.50
9/08/2023	68.30	76.20	50.90	53.40
10/08/2023	69.20	51.20	50.60	51.50
11/08/2023	37.60	55.20	36.30	36.30
12/08/2023	58.00	49.80	49.30	47.60
13/08/2023	55.00	51.00	48.00	40.20
14/08/2023	59.20	51.50	46.90	39.10
15/08/2023	44.10	73.10	55.50	39.90
16/08/2023	65.40	51.40	67.10	42.00
17/08/2023	52.10	39.20	36.20	78.20
18/08/2023	47.60	37.20	30.40	46.60
19/08/2023	47.60	67.00	39.90	45.90
20/08/2023	46.00	52.40	40.70	47.00
21/08/2023	46.20	54.00	40.20	49.00
22/08/2023	46.40	68.60	39.00	56.60
23/08/2023	46.20	68.60	66.00	44.00
24/08/2023	44.90	36.00	39.20	52.00
25/08/2023	42.10	51.30	38.20	52.70
26/08/2023	50.00	46.90	38.20	56.30
27/08/2023	78.40	31.40	49.80	73.00
28/08/2023	45.30	55.70	41.80	54.50
29/08/2023	60.00	58.00	43.00	53.00
30/08/2023	67.30	68.20	45.20	52.80
31/08/2023	65.30	66.00	43.00	50.20

Tabla 3.3

Registro de temperaturas de las chumaceras de los separadores magnéticos del mes de setiembre

Registro de temperaturas medidas hacia las chumaceras de los separadores magnéticos. Mes Setiembre				
Fecha	Temp. SM 1 (C°)	Temp. SM 2 (C°)	Temp. SM 3 (C°)	Temp. SM 4 (C°)
1/09/2023	61.5	63.0	40.0	49.8
2/09/2023	59.0	61.6	37.1	47.6
3/09/2023	60.0	62.0	38.0	48.2
4/09/2023	68.7	63.9	40.1	48.7
5/09/2023	68.4	58.8	40.9	51.2
6/09/2023	56.9	64.2	41.4	59.3
7/09/2023	66.6	58.0	42.1	44.7
8/09/2023	65.0	59.0	42.0	44.8
9/09/2023	63.2	58.5	43.5	45.0
10/09/2023	56.0	73.3	41.0	45.2
11/09/2023	53.0	67.6	67.5	48.1
12/09/2023	54.8	64.8	64.3	44.2
13/09/2023	46.7	59.6	61.8	43.7
14/09/2023	47.7	56.0	53.5	45.3
15/09/2023	55.0	63.6	56.2	45.5
16/09/2023	67.9	64.2	54.4	50.3
17/09/2023	79.6	76.2	68.4	90.3
18/09/2023	86.1	72.0	74.5	93.2
19/09/2023	75.8	91.5	75.3	
20/09/2023	86.1	73.6	85.3	57.8
21/09/2023	71.6	75.2	61.5	62.6
22/09/2023	72.0	71.3	60.5	52.3
23/09/2023	57.1	65.4	60.5	48.8
24/09/2023	55.5	78.8	60.5	44.9
25/09/2023	55.8	79.1	63.4	45.3
26/09/2023	52.1	70.4	64.6	48.5
27/09/2023	65.3	51.7	59.6	45.9
28/09/2023	69.9	65.6	57.1	52.2
29/09/2023	48.8	60.2	65.7	54.3
30/09/2023	40.2	67.0	61.9	53.1

Tabla 3.4

Registro de temperaturas de las chumaceras de los separadores magnéticos del mes de octubre

Registro de temperaturas medidas hacia las chumaceras de los separadores magnéticos. Mes Octubre				
Fecha	Temp. SM 1 (C°)	Temp. SM 2 (C°)	Temp. SM 3 (C°)	Temp. SM 4 (C°)
1/10/2023	68.0	46.6	37.8	39.0
2/10/2023	27.0	55.0	35.0	33.0
3/10/2023	23.0	52.0	38.6	55.0
4/10/2023	69.0	73.2	62.4	53.8
5/10/2023	47.8	0.0	63.0	49.6
6/10/2023	60.0	62.0	38.0	48.2
7/10/2023	68.7	63.9	40.1	48.7
8/10/2023	68.4	58.8	40.9	51.2
9/10/2023	56.9	64.2	41.4	59.3
10/10/2023	66.6	58.0	42.1	44.7
11/10/2023	65.0	59.0	42.0	44.8
12/10/2023	68.1	66.5	67.6	61.2
13/10/2023	66.6	67.6	68.5	58.2
14/10/2023	60.0	62.0	38.0	48.2
15/10/2023	68.7	63.9	40.1	48.7
16/10/2023	68.4	58.8	40.9	51.2
17/10/2023	56.9	64.2	41.4	59.3
18/10/2023	66.6	58.0	42.1	44.7
19/10/2023	65.0	59.0	42.0	44.8
20/10/2023	68.1	66.5	67.6	61.2

Como se puede apreciar en las tablas se muestran temperaturas anormales que alteran el funcionamiento de los separadores magnéticos a largo plazo. En términos de operaciones óptimas, la temperatura máxima permitida aplica hasta los 45°C o 55°C. Si sobrepasa esa medida, se puede entender que el equipo no contiene el lubricante, o debe tenerlo, pero ocurre una falla mecánica; por ejemplo, el eje desalineado, los cojinetes del separador magnético y del reductor vibran o provocan sonidos anormales que afecten mecánicamente los repuestos.

Figura 3.1

Gráfica de variación de temperaturas de los separadores magnéticos mes de agosto

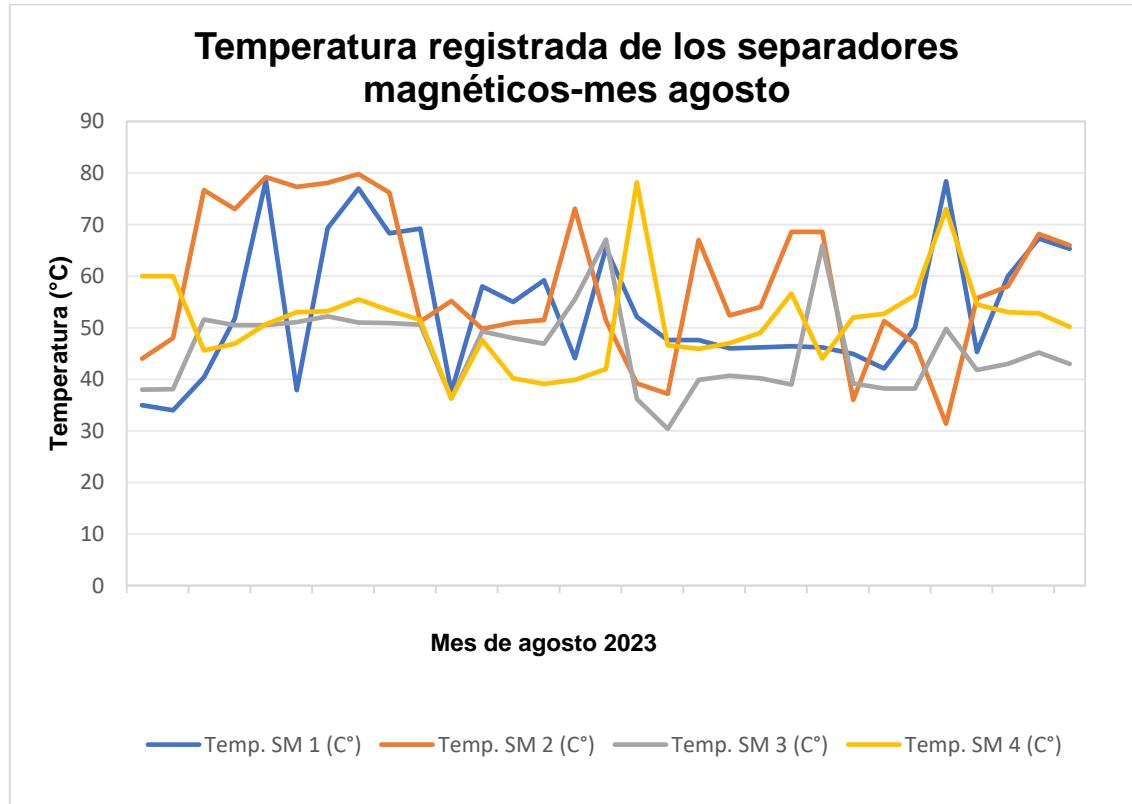


Figura 3.2

Gráfica de variación de temperaturas de los separadores magnéticos mes de setiembre

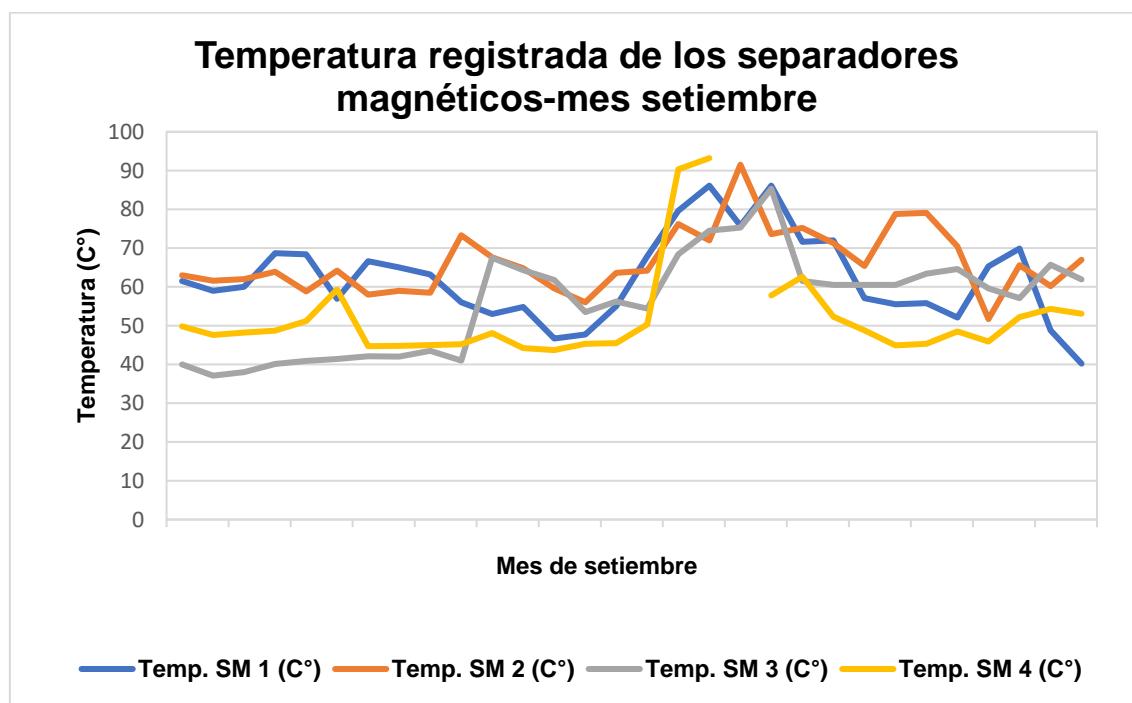
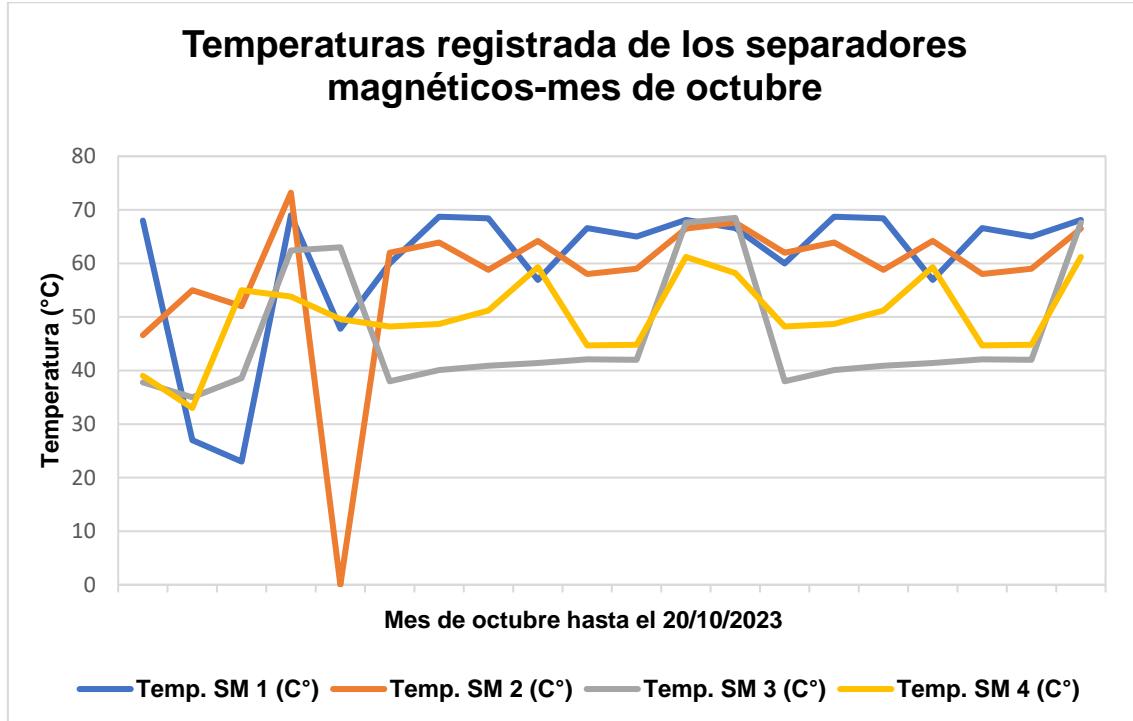


Figura 3.3

Gráfica de variación de temperaturas de los separadores magnéticos mes de octubre



Bajo estos gráficos, cada separador magnético muestra una falla por temperatura alta y el lubricante no refrigerara, ocasionando la parada del equipo. Por lo tanto, la temperatura máxima permitida de operatividad es de 70°C y bajo este límite se podrá determinar la tasa de falla aplicando la ecuación 3 presentado en la siguiente tabla:

Tabla 3.5

Cantidad de fallas de cada separador magnético por horas de operatividad y tasa de fallas

Indicadores	Separadores magnéticos			
	SM 1	SM 2	SM 3	SM 4
fallas totales registradas	8	13	5	4
Horas totales de operatividad (24 horas por 30 días)	1416	1416	1416	1392
Tasa de falla	0.00463	0.00977	0.00154	0.00208

Esta tasa de falla se podrá determinar las ecuaciones de distribución de función de confiabilidad de cada separador magnético, aplicando la ecuación 11 se presenta los siguientes gráficos:

Figura 3.4

Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 1

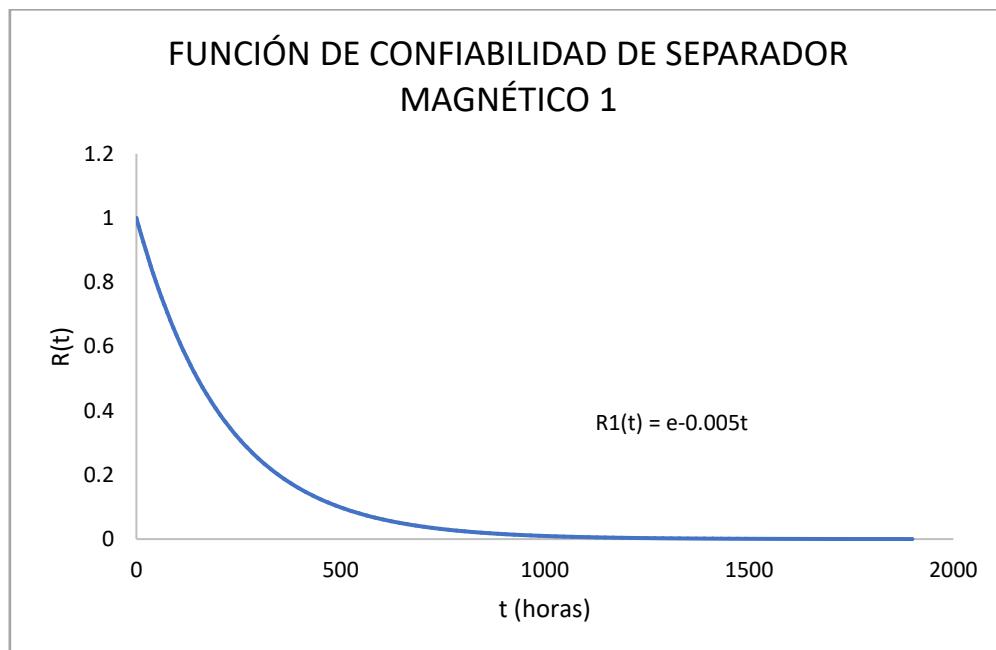


Figura 3.5

Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 2

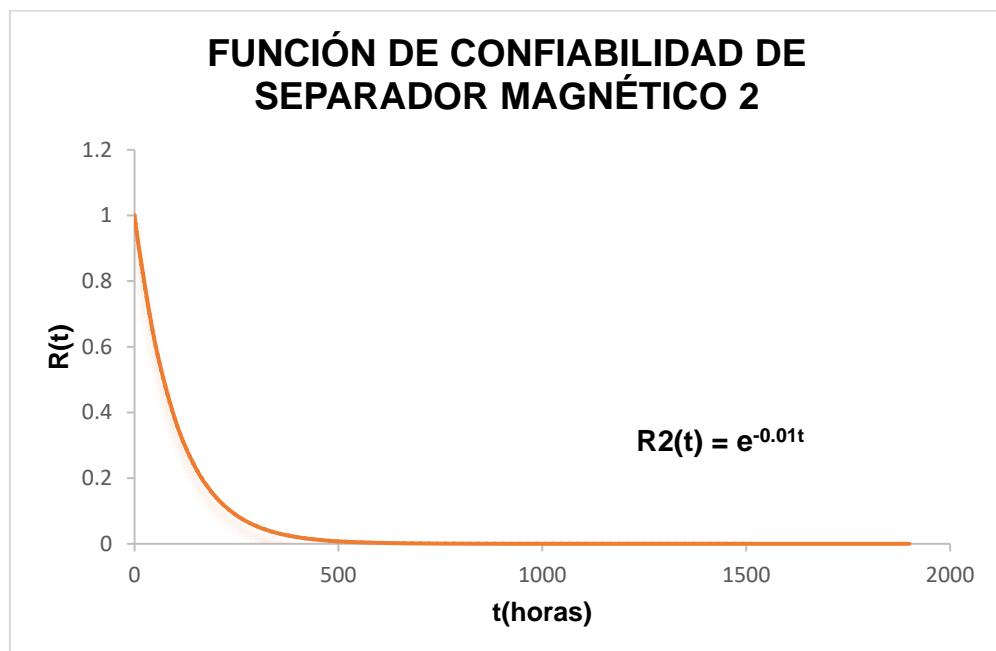


Figura 3.6

Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 3

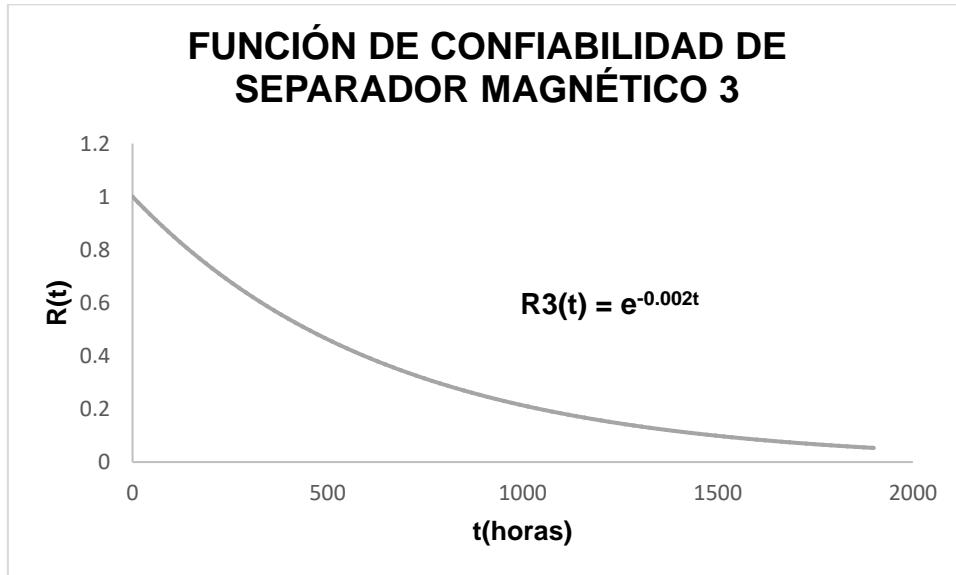
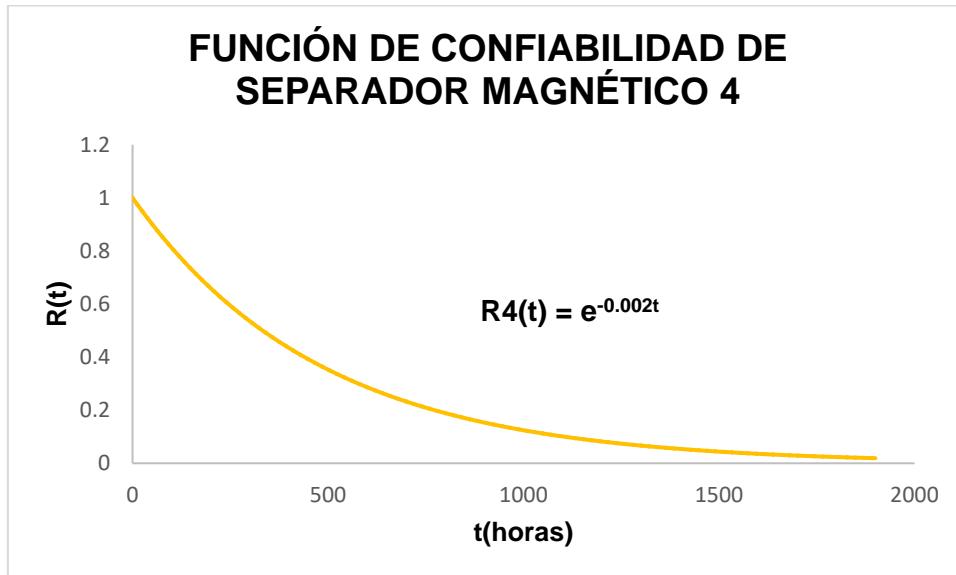


Figura 3.7

Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético 4



Obteniendo las ecuaciones de confiabilidad de cada separador magnético se podrá determinar la tasa de falla acumulada presentado en la *ecuación 10*, lo cual tenemos las siguientes gráficas:

Figura 3.8

Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 1

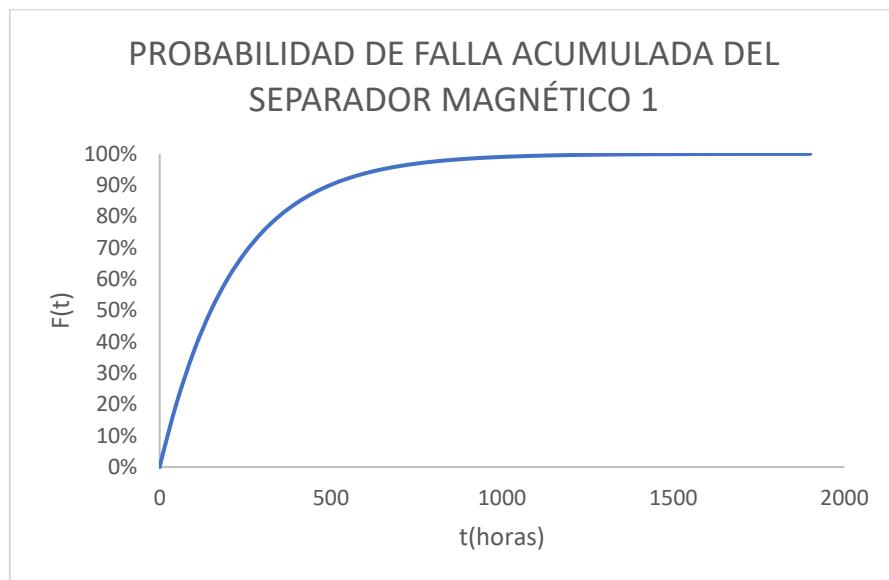


Figura 3.9

Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 2

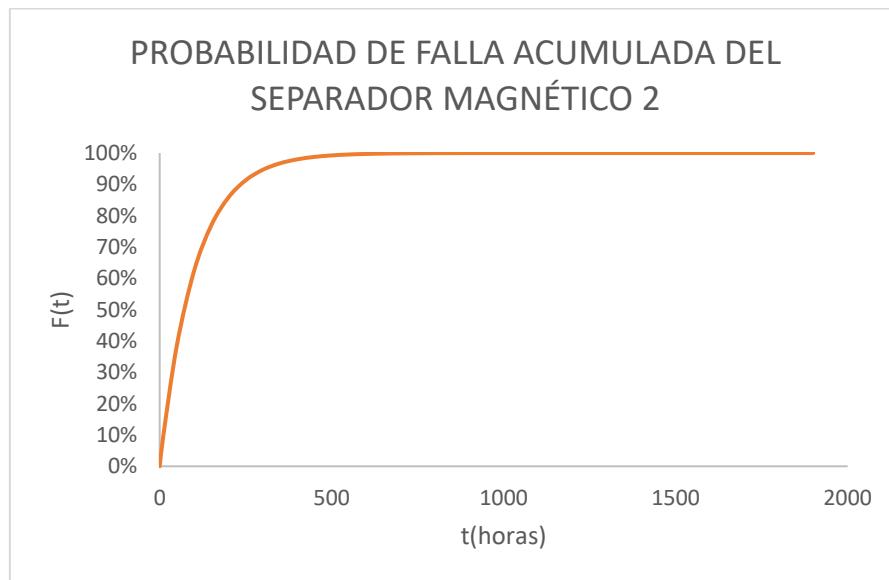


Figura 3.10

Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 3

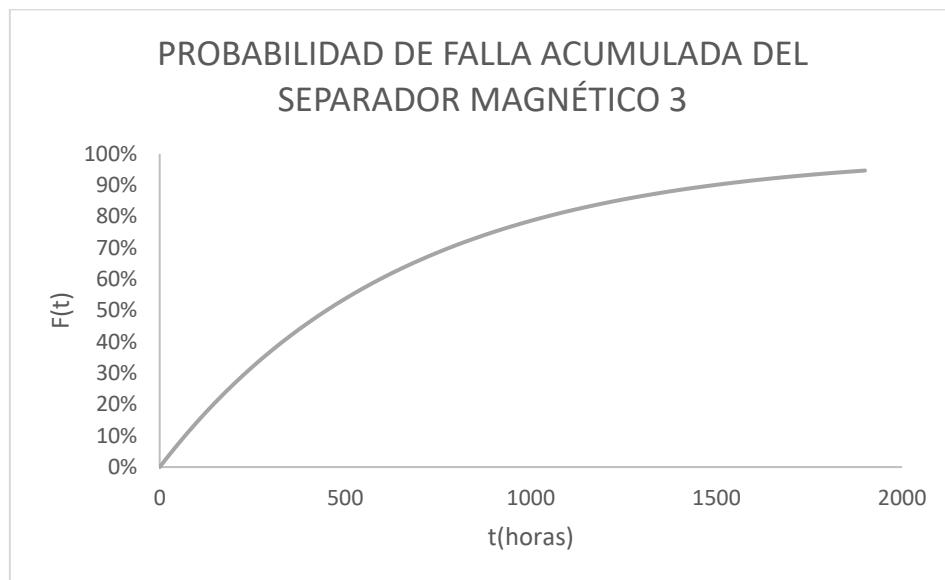
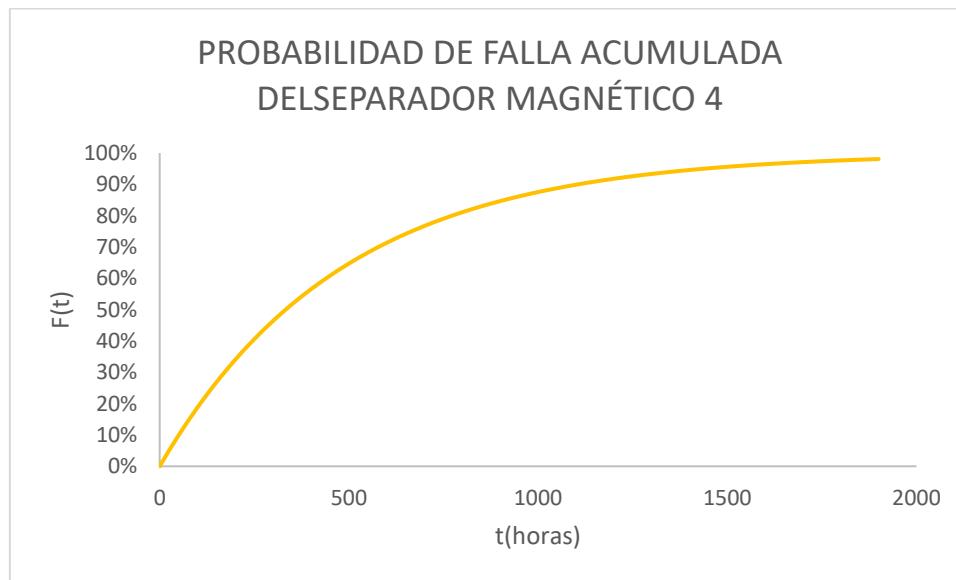
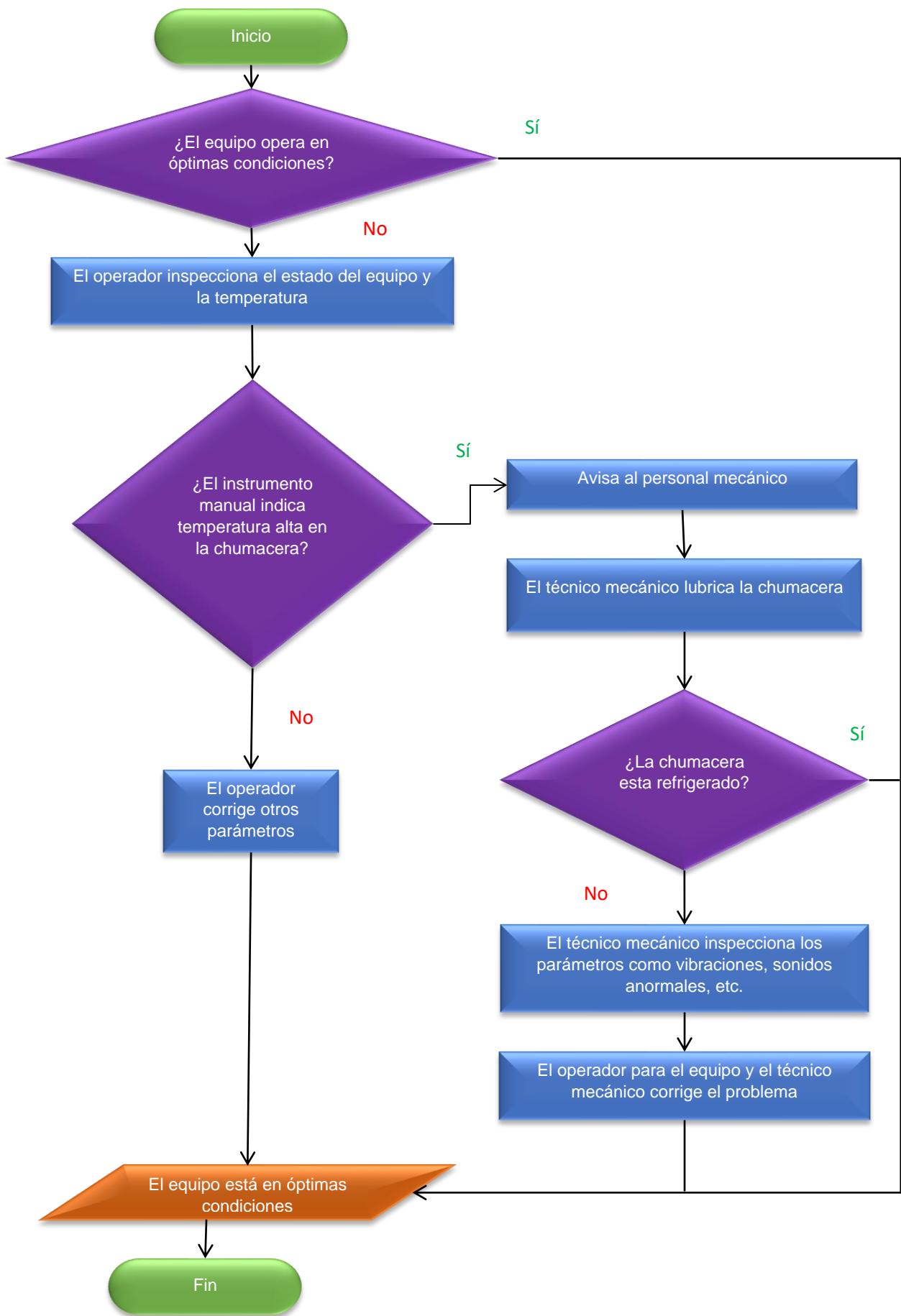


Figura 3.11

Gráfica de probabilidad de falla del separador magnético 4

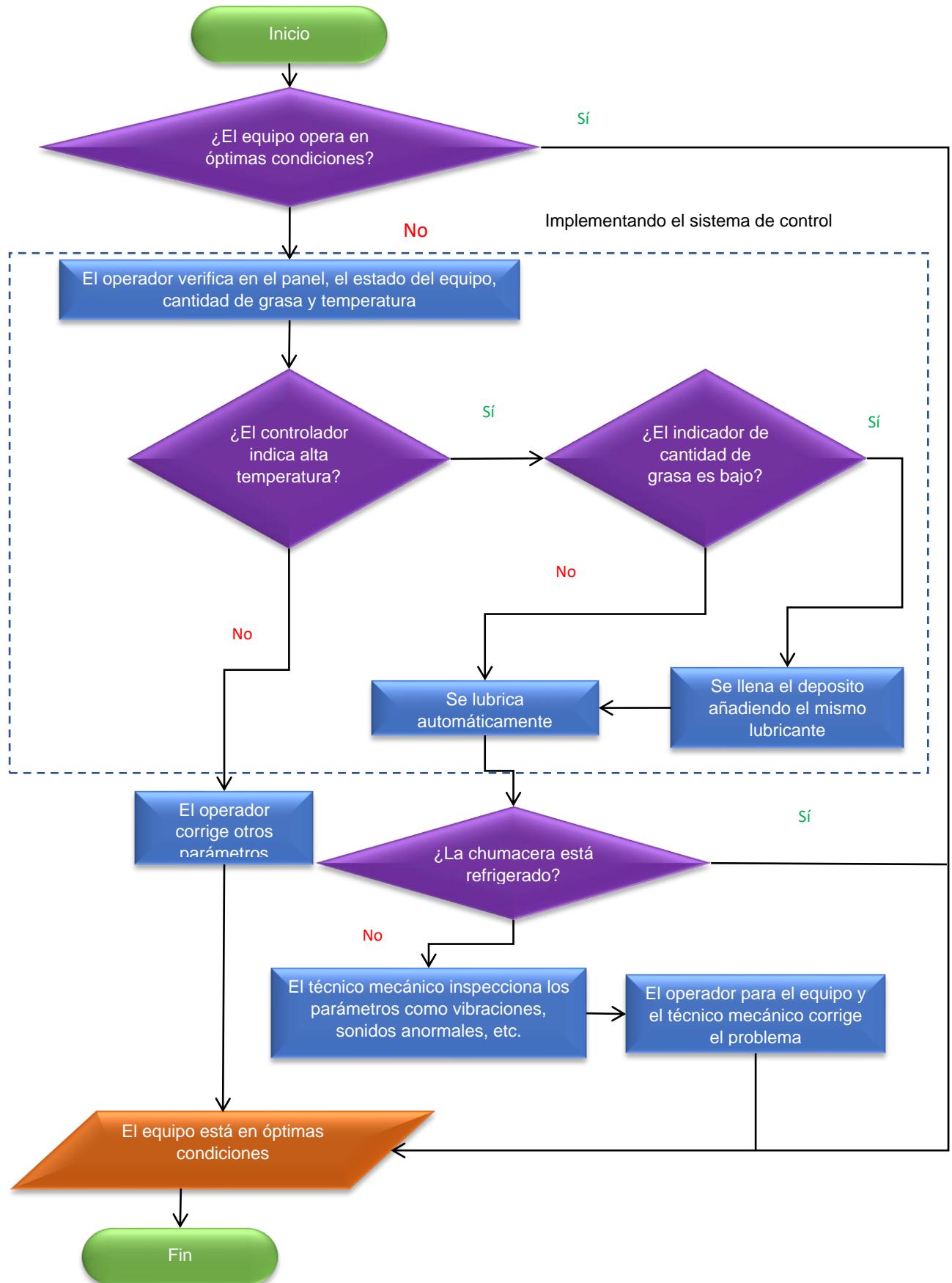


Para facilitar todo lo registrado, se establece un diagrama de flujo de cómo opera el separador magnético y su plan de mantenimiento, lo cual aplica en casos.



Bajo este diagrama de bloques, explica el proceso de plan de mantenimiento e inspección del separador magnético, se puede apreciar un término más técnico y operatividad del personal, lo cual no se evalúa todas las horas. Sin embargo, implementar un control de temperatura con la finalidad de automatizar el sistema de lubricación es evitar el exceso de la temperatura medida hacia la temperatura máxima permitida operacional, sin intervención de mano de obra, por eso se analizó bajo un algoritmo de control PID. Este método facilita al operador monitorizar las 24 horas como varía la temperatura de manera continua, lubricando automáticamente y mejorando los indicadores de mantenimiento.

Esto se puede apreciar en el siguiente flujograma:



Al verificar como va a funcionar el sistema de control se pasa a la aplicación del algoritmo, de tal manera se estructuró en los siguientes tres controladores:

3.1 Control de temperatura

Con el fin de ejecutar el algoritmo y controlar la temperatura, se diseñó un sistema de control análogo bajo PID no iterativo, como se pudo apreciar en la figura 2.22 y las ecuaciones 1 y 2 del capítulo II, otorga una variable de proceso y prueba de error que permite una comparación hacia el valor real como se aprecia en la siguiente figura 3.12. Se inserta un while loop a fin de que se ejecute el sistema sin iteraciones necesarias e insertar un shift register, lo cual se repite los valores desde el comienzo. El algoritmo comienza bajo el Setpoint, este dirige el valor hacia el shift register que registra y mide la variable en proceso (PV-TEMPERATURA). El diferencial de medida será una constante añade un tiempo de cien milisegundos conectando al simulador de planta retroalimentando el flujo de control.

Para ver la variación de curvas se insertó un gráfico de ondas conectando a los parámetros, el PV y el Setpoint, mediante la herramienta Bundle, además para una comparativa del rango de salida haciendo una escala porcentual del cien por ciento, terminando con la ejecución de prueba de control de temperatura.

Figura 3.12

Simulación de control de temperatura

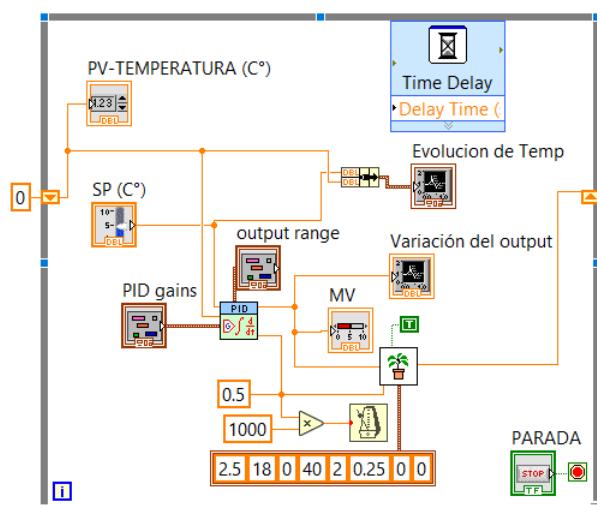


Figura 3.13

Sintonización de las ganancias proporcionales y salida del output range

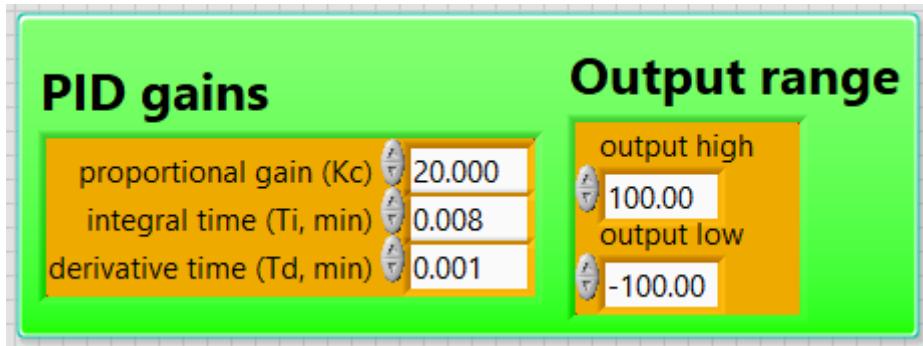


Figura 3.14

Gráfica comparativa de la temperatura real (setpoint) y la temperatura medida (PV)

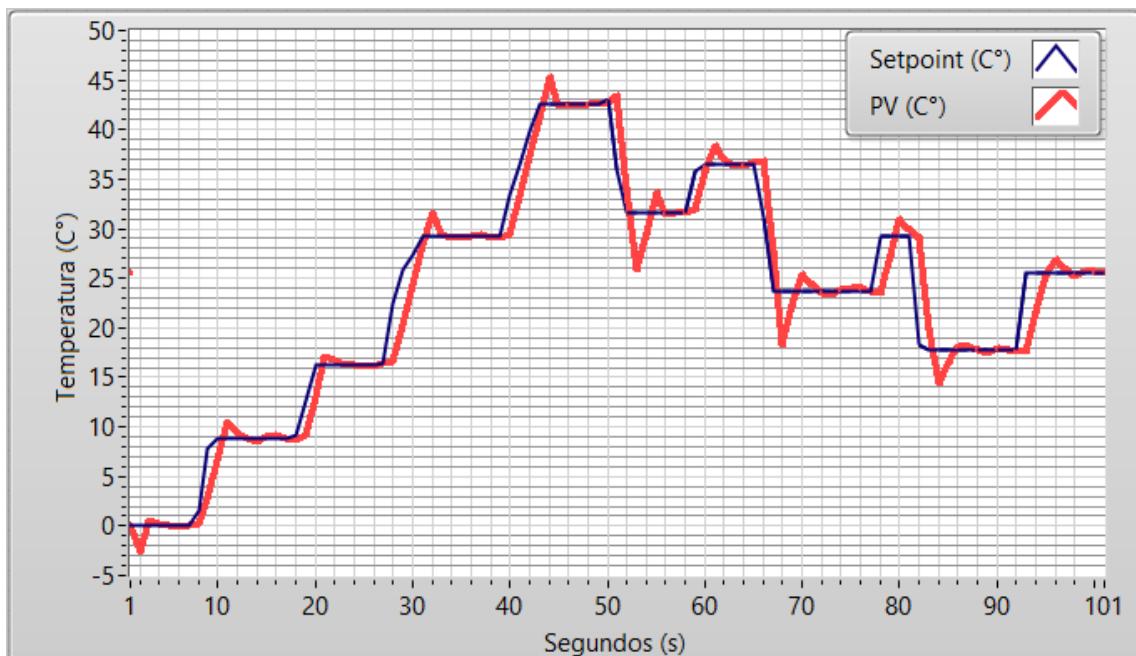
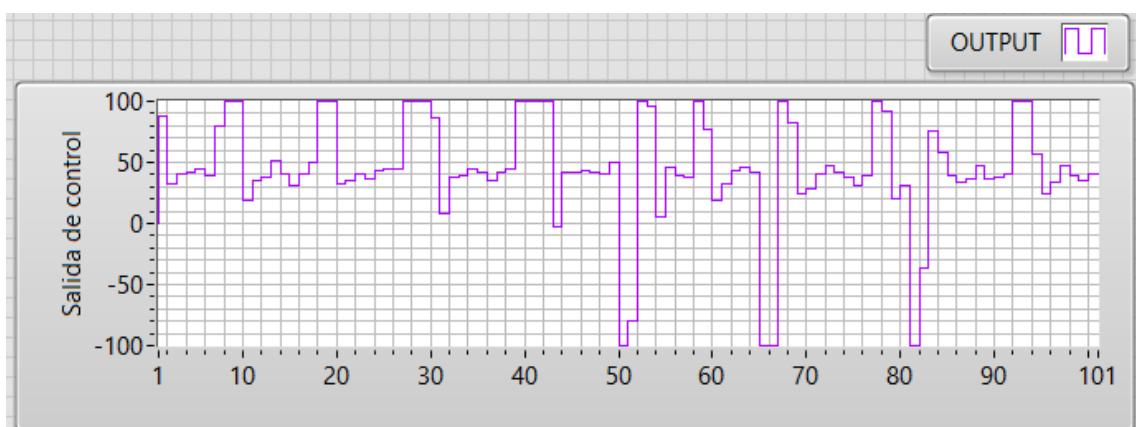


Figura 3.15

Gráfica de la salida de control u Output



3.2 Indicador de nivel de grasa

Cuando la temperatura registra una medida alta de sobrecalentamiento, este automáticamente lubrica comenzando del depósito de combustible y disminuyendo su contenido. El algoritmo de nivel de grasa funciona como un indicador y su relación de reducción del depósito se toma del indicador de tanque como referencia a una local variable del indicador del depósito de grasa cambiando a modo lectura, esto permite que lea el nivel de grasa y como resultado figura en el indicador de nivel de grasa (el tanque). Sin embargo, la condición es la disminución del nivel de grasa en el momento en que la temperatura medida aumente superando el valor óptimo de operatividad y cumpla su función de lubricador. En dirección al indicador numérico que toma como referencia el nivel de grasa, retroalimenta al depósito de grasa y reduce su capacidad hasta que la temperatura medida este en óptimas condiciones.

Figura 3.16

Diagrama de la simulación del indicador de nivel de grasa

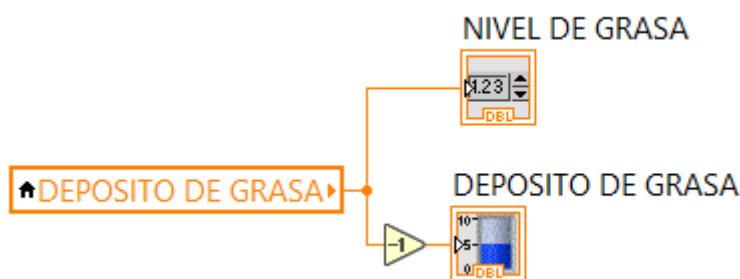
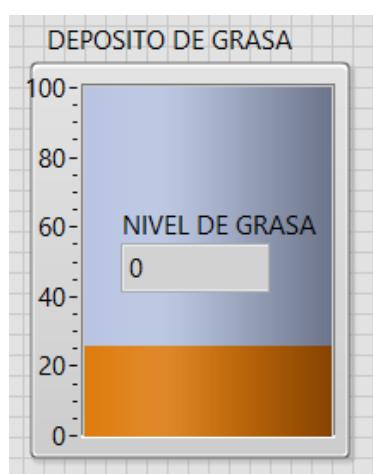


Figura 3.17

Resultado de panel de VI del depósito de grasa

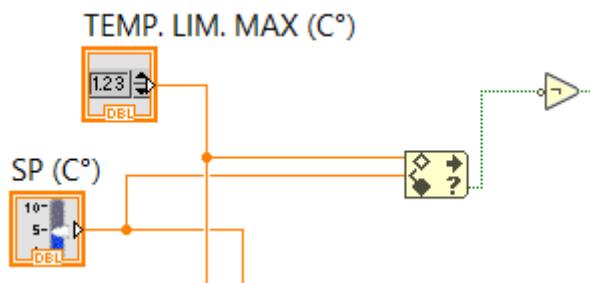


3.3 Algoritmo de alarma de temperatura y nivel de tanque

Este algoritmo notifica al operador de planta si la temperatura medida supera al valor máximo de operatividad con el propósito de lubricar automáticamente. Con respecto de la temperatura medida (PV) supere la temperatura máxima permitida de operatividad, activa un sistema de alarma, lo cual indica el algoritmo. Por lo tanto, a la aplicación de valores entre rangos se toma una condición negativa del sistema de alarma. Como resultado, aplica cuando la temperatura medida sea superior a la temperatura máxima permitida como se aprecia en la *figura 3.18*, uniendo la siguiente estructura de casos (case structure en inglés).

Figura 3.18

Aplicación de condición del setpoint y la temperatura máxima permitida ejecutando un booleano negativo para que cumpla la condición de alarma cuando supere el rango



Al tener esta condición, primero se toma el sistema de alarma de temperatura, bajo resultados por casos.

Al comienzo, se presenta el primer caso de la temperatura medida (PV), cuando supere la temperatura máxima permitida, si no cumple (caso falso), el indicador de alarma no se ejecuta como se puede apreciar en la *imagen 3.19*, no obstante, si cumple la condición mencionada (caso verdadero), se crea la local variable del indicador de alarma que recibe la señal como verdadero y se ejecuta en el panel como se estima en la *imagen 3.20*.

Figura 3.19

Condición de temperatura cuando no cumple el caso, el booleano no se ejecuta

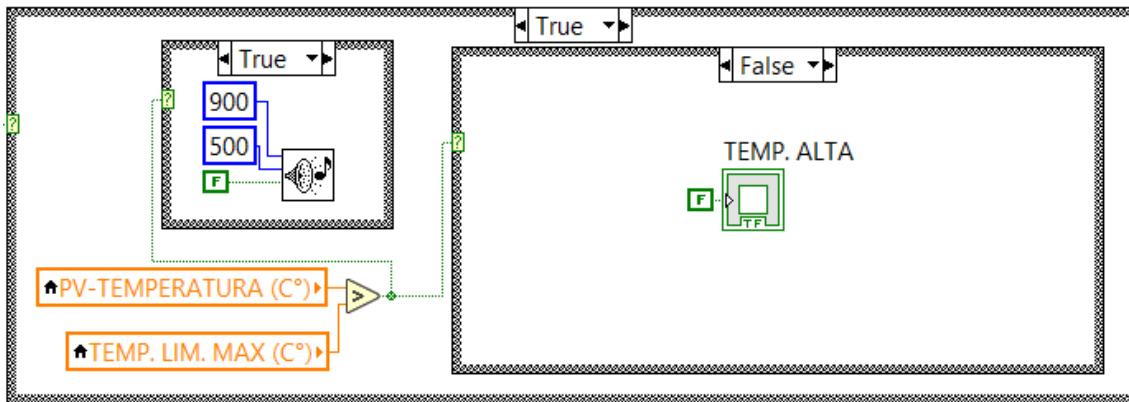
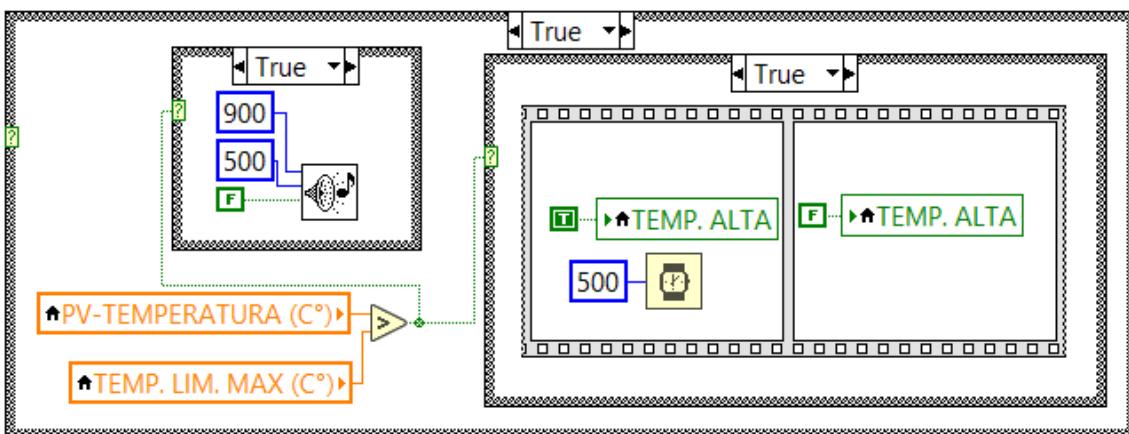


Figura 3.20

Condición de temperatura cuando cumple el caso, el booleano se ejecuta de forma intermitente usando una estructura de secuencia con una duración de cinco milisegundos, aplicando una alarma de quinientos milisegundos de duración y nueve cientos Hz



El caso de nivel de grasa en la realidad no se toma toda la cantidad depositada, siempre queda un mínimo que se considera vacío. Para relacionar este caso se basa en lo siguiente:

La cantidad de grasa es mayor que el límite mínimo de nivel, entonces disminuye si aumenta la temperatura medida (PV) como se muestra en la siguiente figura 3.21, pero si no cumple esta condición se lleva a la siguiente relación:

- El depósito de grasa no baja su nivel, además de verificar si el nivel es menor al límite mínimo, cumple el caso verdadero del algoritmo presentado con una duración de cien milisegundos de forma intermitente hacia el panel de control.

Figura 3.21

Condición del límite mínimo de nivel en el depósito de grasa cuando cumple la secuencia

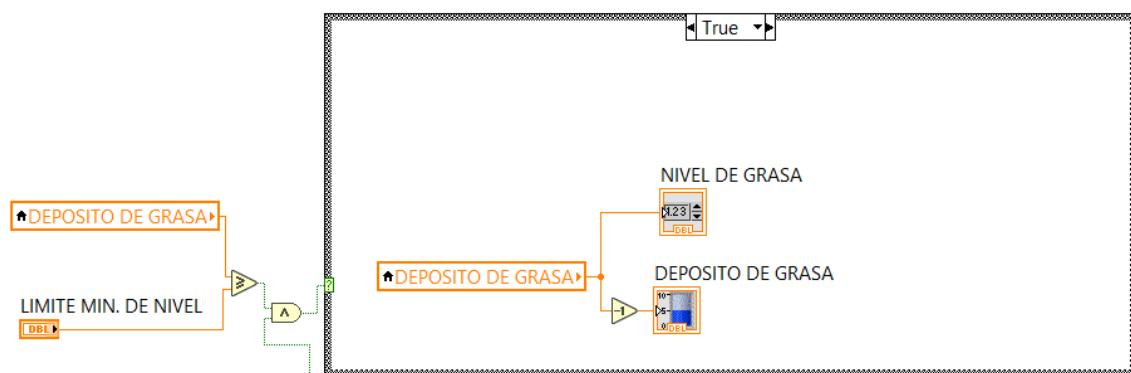
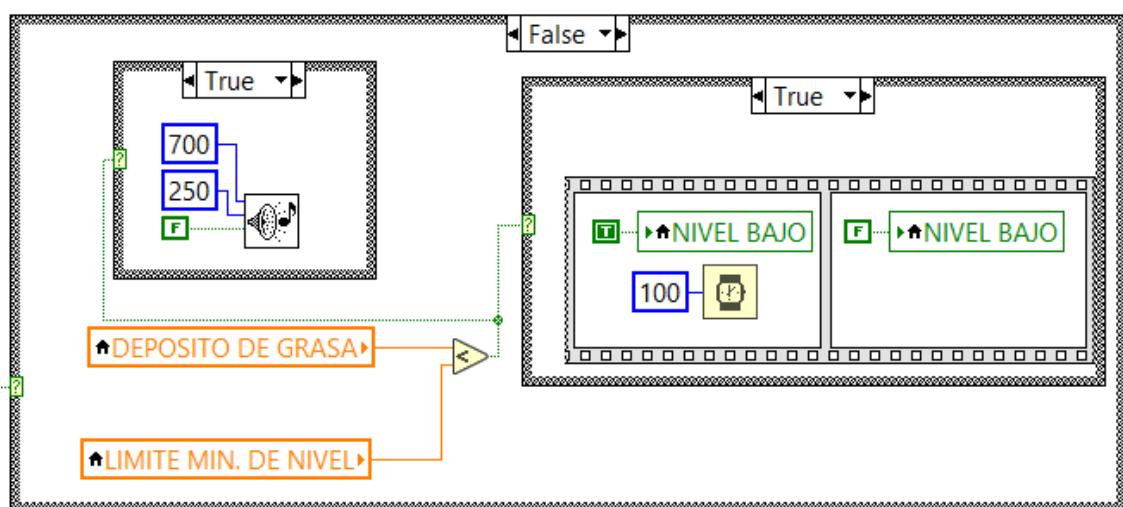


Figura 3.22

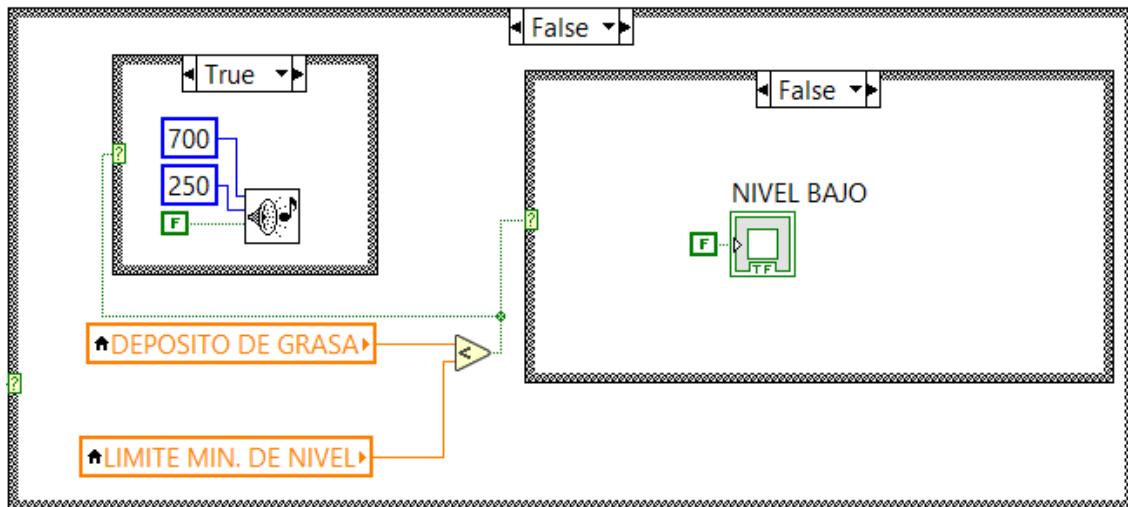
Condición del límite mínimo de nivel en el depósito de grasa, cuando no cumple la secuencia, activa el indicador de nivel de grasa



- Si el nivel del depósito de grasa supera el valor mínimo de nivel, el indicador de nivel de grasa se encuentra apagado (caso falso).

Figura 3.23

Condición cuando cumple la relación del nivel mínimo de grasa, el indicador de alarma no responde, caso falso.



Cuando aplica estos casos, según la estructura, se obtiene el panel de control mostrando las siguientes imágenes:

Figura 3.24

Ejecución del algoritmo cuando se encuentra en condiciones normales y los LED's están apagados

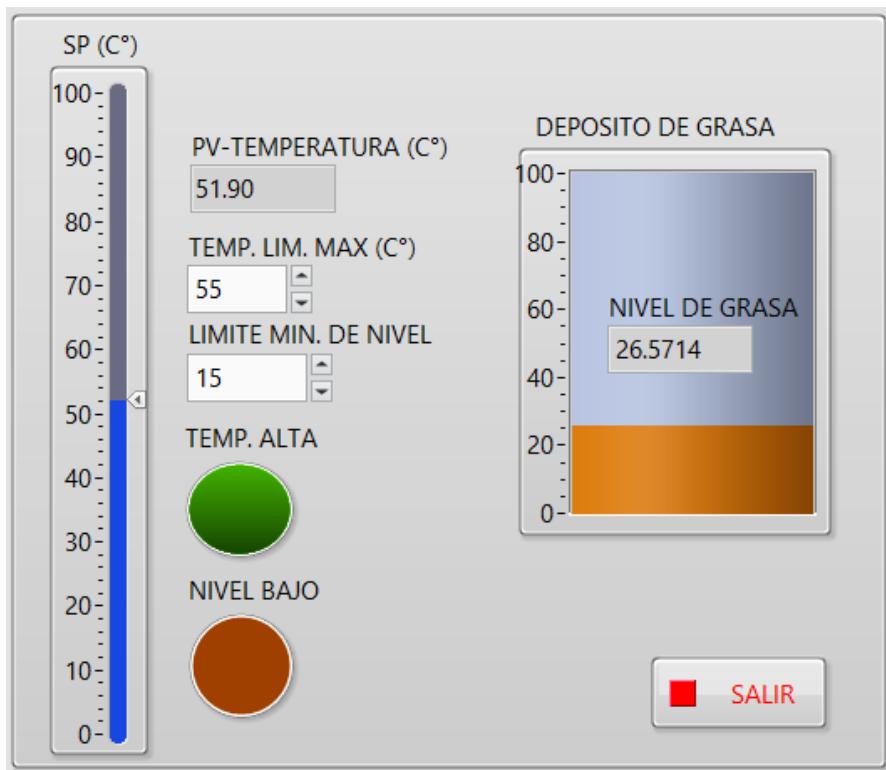


Figura 3.25

Ejecución del algoritmo cuando la temperatura medida (PV) supera el límite máximo de temperatura y el LED verde enciende

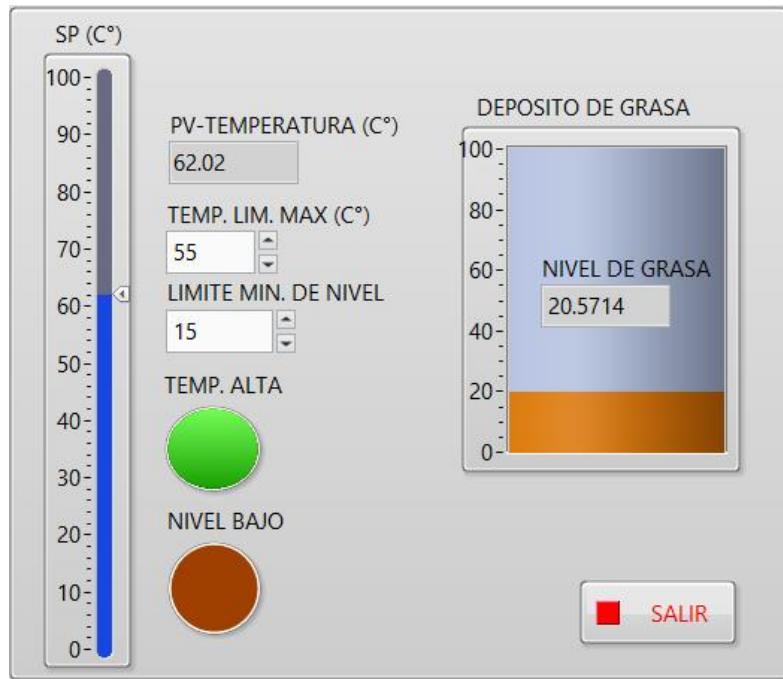
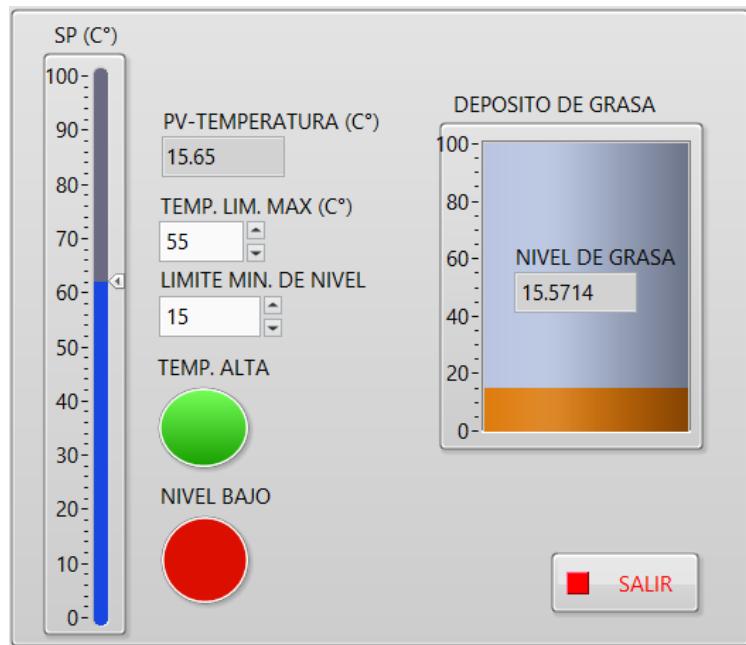


Figura 3.26

Ejecución del algoritmo cuando el nivel de grasa es menor o cerca al mínimo, como respuesta, enciende el LED rojo

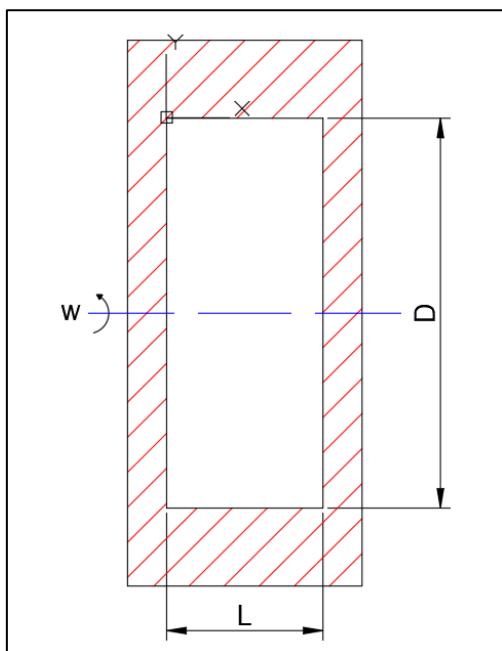


3.4 Modelo matemático de temperatura medida por convección entre el rodamiento y grasa

Con la finalidad de diseñar un modelo de función de transferencia de temperatura nos basamos en las ecuaciones 16, 17 y 18, tendemos lo siguiente.

Figura 2.27

Diseño de flujo de lubricante entre la chumacera y el cojinete



Como valores de propiedades químicas del lubricante se presenta como la viscosidad y conductividad térmica del lubricante

El flujo de la grasa entre el cojinete y la chumacera se puede aproximar como un flujo paralelo, una referencia móvil y la otra inmóvil. Si tomamos como referencia "x" como dirección de flujo e "y" como dirección normal, el resultado será $v=0$. Por lo tanto, la ecuación de continuidad se reduce a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 ; \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$u = u(y)$$

Por lo tanto, el componente "x" de la velocidad no cambia en la dirección del flujo, teniendo en cuenta que $u = u(y)$, $v = 0$, y (el flujo se mantiene por el movimiento de la placa superior y no por el gradiente de presión), la ecuación del momento x se reduce a la siguiente forma:

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$$

$$u(y) = C_1 y + C_2$$

Si tomamos un punto referencia al extremo izquierdo del cojinete hacia su espesor, $u(0)=0$ y $u(L)=V$ remplazamos los valores se muestra la siguiente ecuación de u :

$$u(y) = \frac{y}{L} V$$

El calentamiento por fricción debido a la disipación viscosa en este caso es significativo debido a la alta viscosidad del aceite y a la gran velocidad de las placas. Las placas son isotérmicas y no hay cambio en la dirección del flujo, por lo que la temperatura depende sólo de y , $T = T(y)$. Además, $u = u(y)$ y $v = 0$. Entonces la ecuación de energía con disipación se reduce a la ecuación mostrada:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 = 0$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = - \frac{\mu}{k} \left(\frac{V}{L} \right)^2$$

$$T = - \frac{\mu}{2k} \left(\frac{V}{L} \right)^2 y^2 + C_3 y + C_4$$

Aplicando derivada y y tomando la máxima temperatura del lubricante se determina lo siguiente

$$\frac{\partial T}{\partial y}_{y=L} = - \frac{\mu}{k} \left(\frac{V}{L} \right)^2 y + C_3 = 0$$

$$C_3 = \frac{\mu}{k} \left(\frac{V}{L} \right)^2$$

Reemplazando a la ecuación de distribución de temperatura.

$$T = - \frac{\mu}{2k} \left(\frac{V}{L} \right)^2 y^2 + \frac{\mu}{k} \left(\frac{V}{L} \right)^2 y + C_4$$

Reemplazando $y=y(t)$

$$T = -\frac{\mu}{2k} \left(\frac{V}{L}\right)^2 y(t)^2 + \frac{\mu}{k} \left(\frac{V}{L}\right)^2 y(t) + C_4$$

Aplicando transformada de Laplace a la ecuación de temperatura se formula lo siguiente:

$$T_{(s)} = -\frac{\mu}{2k} \left(\frac{V}{L}\right)^2 \mathcal{L}(y(t)^2) + \frac{\mu}{k} \left(\frac{V}{L}\right)^2 \mathcal{L}(y(t)) + C_4$$

CAPÍTULO IV

Resultados, Contratación de Hipótesis y Discusión de Resultados

Este capítulo presenta los resultados de la ejecución del programa sobre el comportamiento y variación de temperatura que detecta el controlador y el sistema de alarma que avisa al operador. Se examina diversos aspectos como el indicador de nivel de grasa, el sistema de alarma de nivel bajo del tanque, el valor condicional de rangos de variables, finalizando en cálculo de sintonización de PID para mejoramiento de evolución de la variable independiente (PV-Temperatura).

4.1 Resultado de función de confiabilidad de los separadores magnéticos

Como se presentó en el siguiente diagrama del capítulo V se muestra una comparación de función de Confiabilidad de cada separador magnético, presentando lo siguiente:

Figura 4.1

Gráfico comparativo de función de confiabilidad de los separadores magnéticos

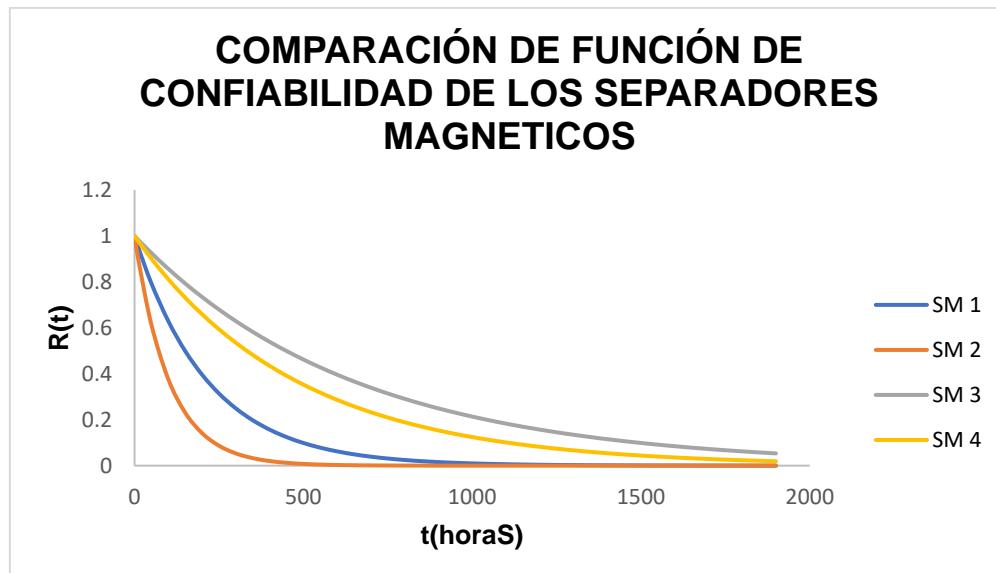
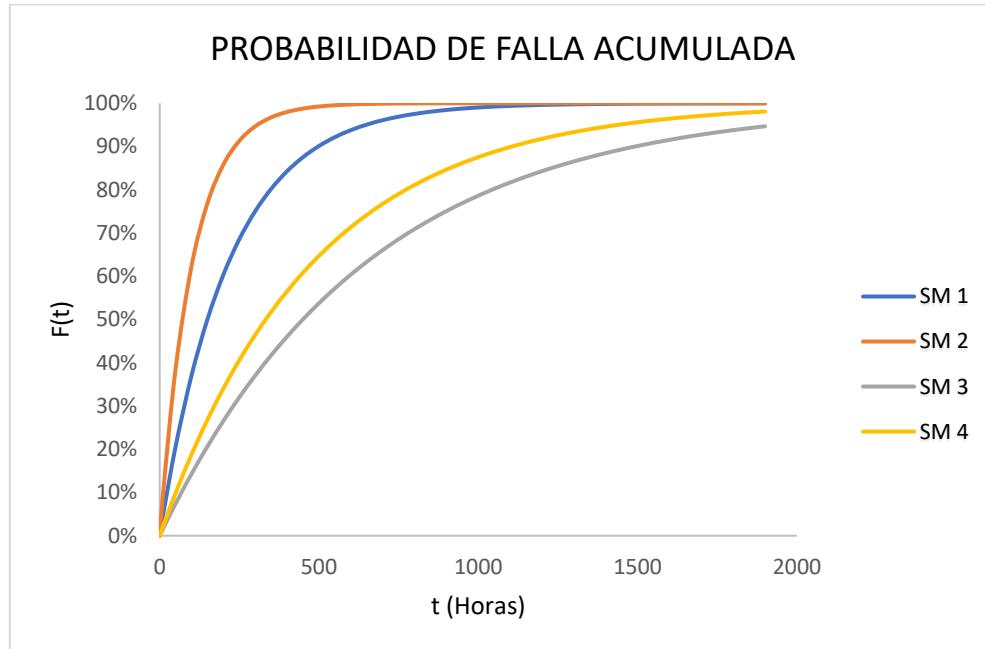


Figura 4.2

Gráfico comparativo de falla acumulada de los separadores magnéticos



Esto puede determinar que el separador magnético 2 tienen a fallas más pronto que otros separadores, si tomamos la ecuación 2 de MTBF, podremos determinar lo siguiente:

Tabla 4.1

Tiempo medio entre fallas de los separadores magnéticos

Tiempo medio entre fallas de los separadores magnéticos				
Indicadores	SM1	SM2	SM3	SM4
Tasa de falla	0.00463	0.00977	0.00154	0.00208
MTBF (horas)	216	102.32	648	480

Por lo tanto, se puede determinar que el separador magnético 2 tiende a fallar cada 102 horas de operatividad. Por otro lado, el separador magnético 3 tiende a mejorar y su viabilidad es mejor debido que su MTBF es mayor comparado de los separadores magnéticos restantes, como resultado hay un excelente control de variables, como es la temperatura.

4.2 Resultados de variación de la variable en proceso y sintonización de la simulación

Como se presentó en las gráficas de confiabilidad, se tomó datos de manera continua la temperatura, con la finalidad de analizar su varianza y función de planta para un óptimo control del proceso.

Los datos obtenidos son lo siguiente:

Tabla 4.2

Toma de medidas te temperaturas del separador magnético 3

Registro de temperatura del separador magnético 3 por cada segundo

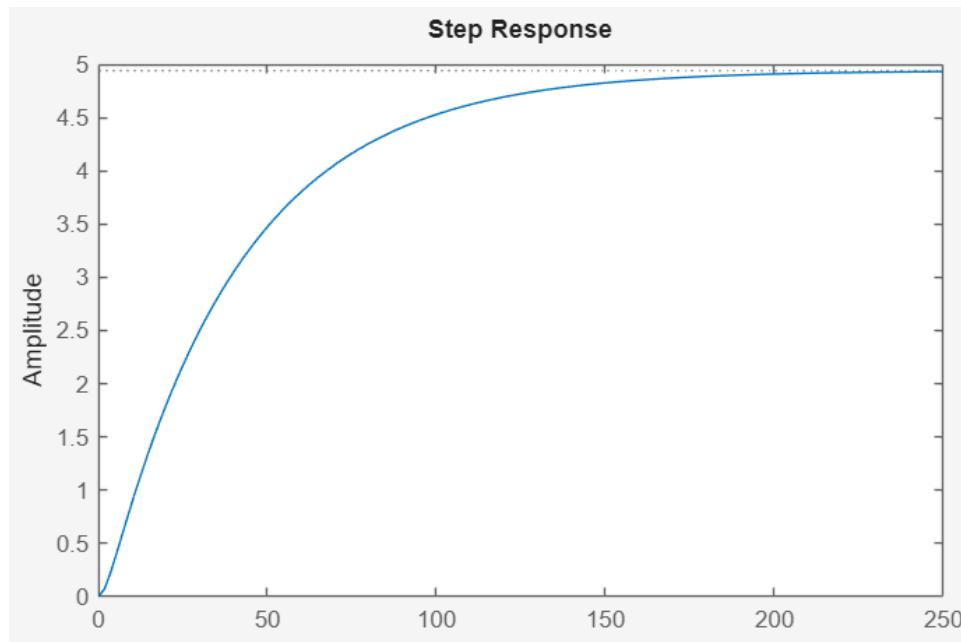
t (segundos)	T (°C) medido por el instrumento
0	0.00
1	27.73
2	34.66
3	38.62
4	46.54
5	45.06
6	48.52
7	47.53
8	51.99
9	48.52
10	50.50
11	49.51
12	50.26
13	51.99
14	47.53
15	49.51
16	48.52
17	48.52
18	51.00

Desarrollando la función de transferencia por método de datos experimentales tenemos la siguiente ecuación:

$$T3_{(s)} = \frac{0.05883}{s^2 + 0.4943s + 0.01191}$$

Figura 4.3

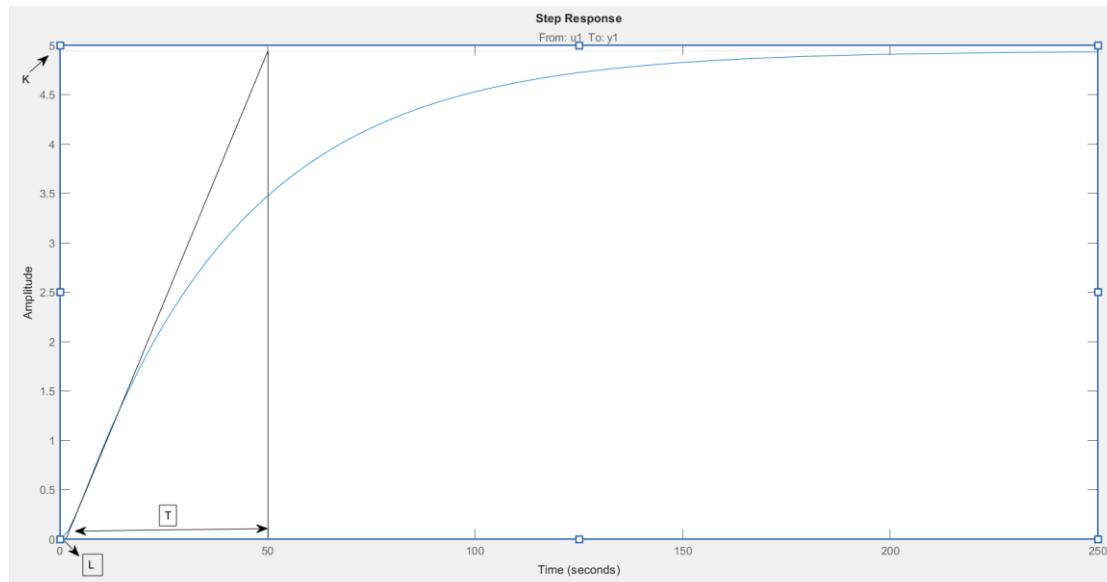
Gráfico de función de transferencia aplicando 2 polos y ningún cero obteniendo una estimación del 82.86%



Este gráfico se puede desarrollar por el primer método de Ziegler-Nichols trazando una tangente y tomar el tiempo de retardo como se aprecia en la siguiente figura:

Figura 4.4

Traza de tangente para determinar los valores de T y L



Tomando los valores de L y T midiendo en el gráfico tenemos lo siguiente:

- Método de Ziegler-Nichols

Tabla 4.3

Valores de L , T y K para desarrollar el PID

Valores de tiempo de retardo, tiempo constante y ganancia estática		
L	T	K
1.408450704	48.5915493	5

Aplicando la ecuación 21, tenemos la siguiente función modelo:

$$G_p(s) = 5 \frac{e^{-1.40845s}}{48.5915s + 1}$$

Desarrollando las ganancias proporcionales PID de las ecuaciones 28, 29 Y 30 por método de Ziegler-Nichols se presenta lo siguiente:

Tabla 4.4

Ganancias proporcionales por primer método de Ziegler-Nichols

Valores de ganancias proporcionales por primer método de Ziegler-Nichols		
K _p	T _i	T _d
8.28	2.81690	0.70423

Reemplazando los valores mostrados tenemos la siguiente ecuación 20 desarrollada:

$$U(s) = 8.28 \left(1 + \frac{1}{2.8169s} + 0.70423s \right)$$

$$U(s) = 8.28 + \frac{2.9394}{s} + 5.831s$$

Desarrollando nuestro diagrama de control de planta tenemos lo siguiente:

Figura 4.5

Diagrama de control de planta

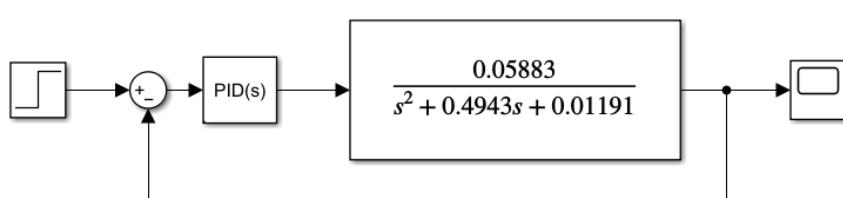
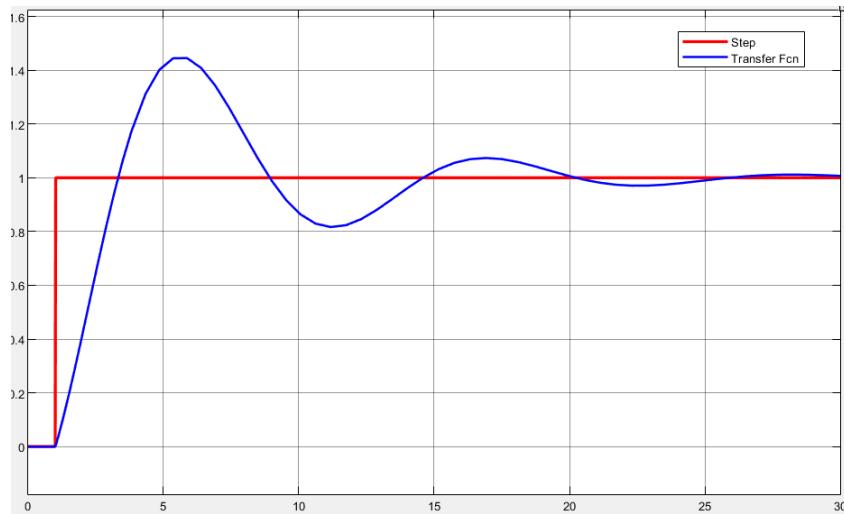


Figura 4.6

Gráfico de control de planta por sintonización de Ziegler-Nichols



El gráfico azul representa el PID por método de ziegler-Nichols

- Método por Cohen-Coon

Como se presenta en el capítulo II, marco teórico, podemos desarrollar bajo la sintonización de Cohen-Coon siguiendo las ecuaciones 46, 47 Y 48 y tenemos lo siguientes resultados:

Tabla 4.5

Ganancias Proporcionales por método de Cohen-Coon

Valores de ganancias proporcionales por primer método de Cohen-Coon

K _p	T _i	T _d
9.25	3.42471	0.50948

Reemplazando los valores mostrados tenemos la siguiente ecuación desarrollada:

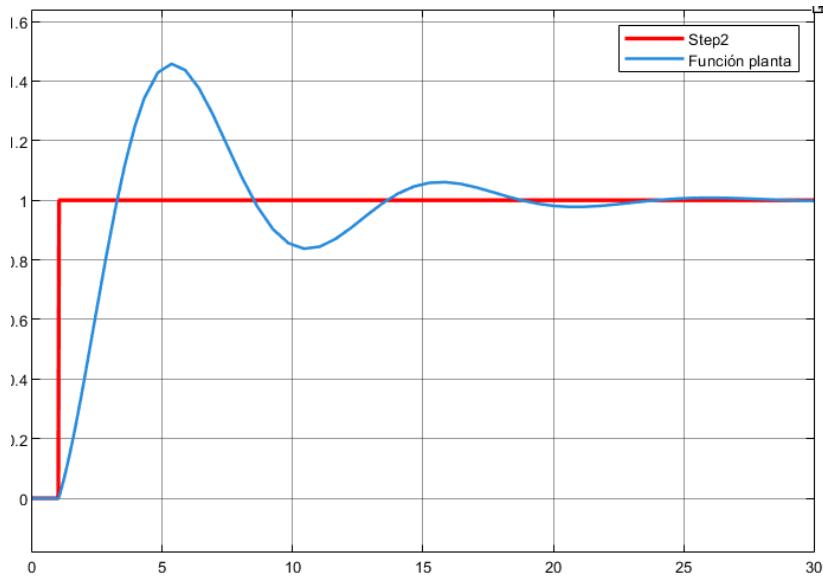
$$U(s) = 9.25 \left(1 + \frac{1}{3.42471s} + 0.50948s \right)$$

$$U(s) = 9.25 + \frac{2.70096}{s} + 4.71268s$$

Aplicando el control PID al diagrama de control tenemos el siguiente gráfico:

Figura 4.7

Gráfico de control de planta por sintonización de Cohen-Coon

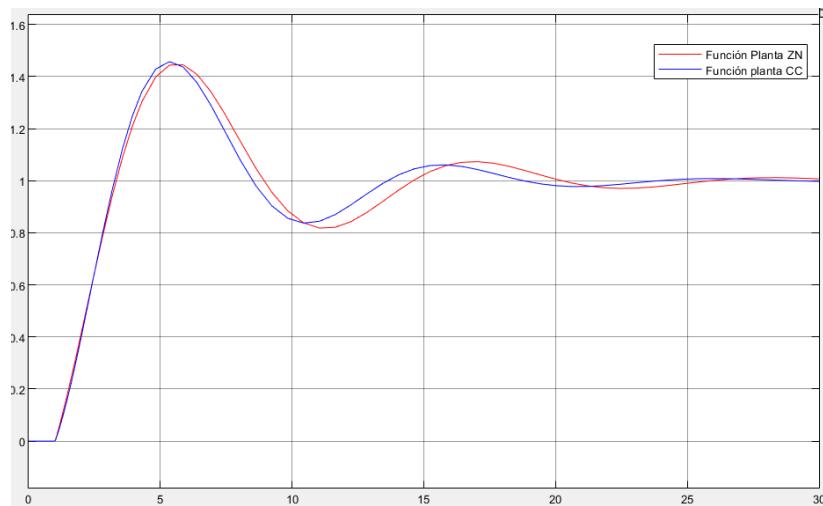


El gráfico celeste representa el PID por método de Cohen-Coon

Comparando ambos gráficos tenemos lo siguiente figura:

Figura 4.8

Gráficos por sintonización de Ziegler-Nichols y Cohen-Coon



Nota: Gráfico de color rojo es control por método de Ziegler-Nichols y azul es método de Cohen-Coon

4.3 Resultado de confiabilidad por un controlador de temperatura

Según el modelo tomado de 70°C por índice de falla, se podrá mantener el tiempo de vida útil de los componentes dentro de la chumacera del separador magnético, que es caso de los cojinetes, esto se puede presentar cada mes comercial

para del equipo por desgaste y contaminación del cojinete y chumacera, esto se va presentar la siguiente manera:

- Determinación de MTBF del separador magnético controlado por cada mes comercial:

$$MTBF_{CONTROL} = 30 \times 24 = 720 \text{ horas de operacion sin parar la maquina}$$

- Determinación de tasa de falla del separador magnético controlado por cada mes comercial:

$$\lambda_{CONTROL} = \frac{1}{MTBF_{CONTROL}} = \frac{1}{720}$$

$$\lambda_{CONTROL} = 0.00138889 \text{ falla/hora}$$

- Determinación de función de confiabilidad del separador magnético controlado:

$$R_{CONTROL}(t) = e^{-(\lambda_{CONTROL})t}$$

$$R_{CONTROL}(t) = e^{-0.0013889t}$$

Figura 4.9

Gráfico de función de confiabilidad del separador magnético controlado

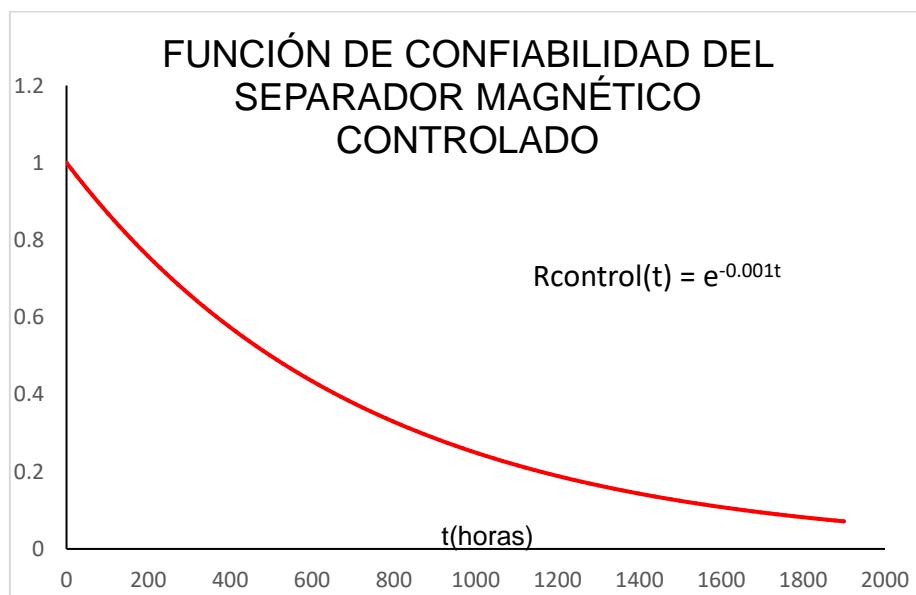
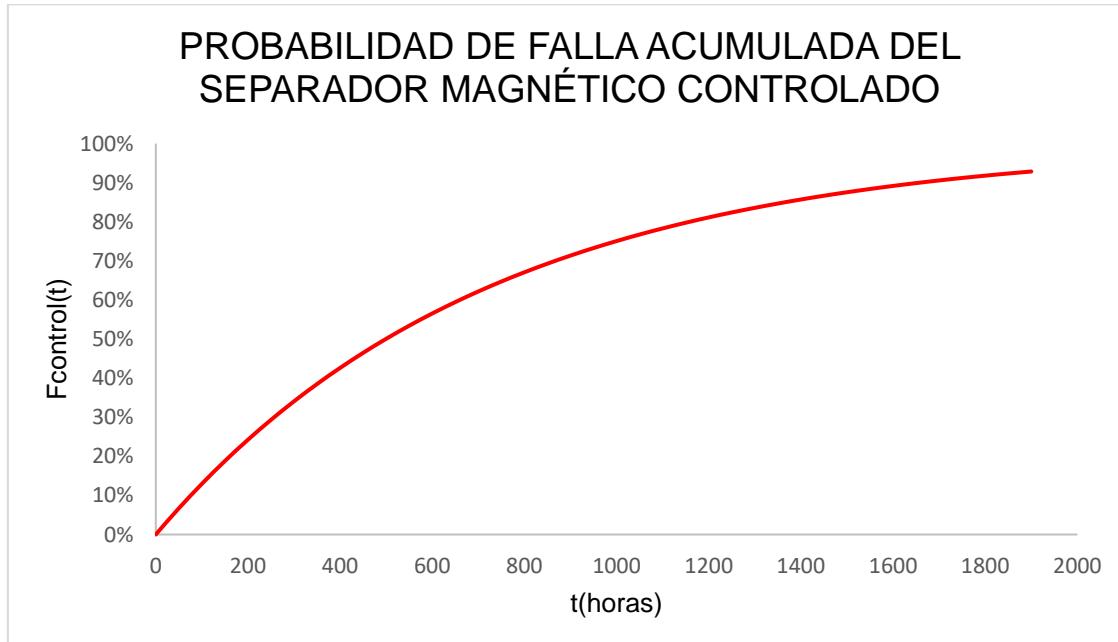


Figura 4.10

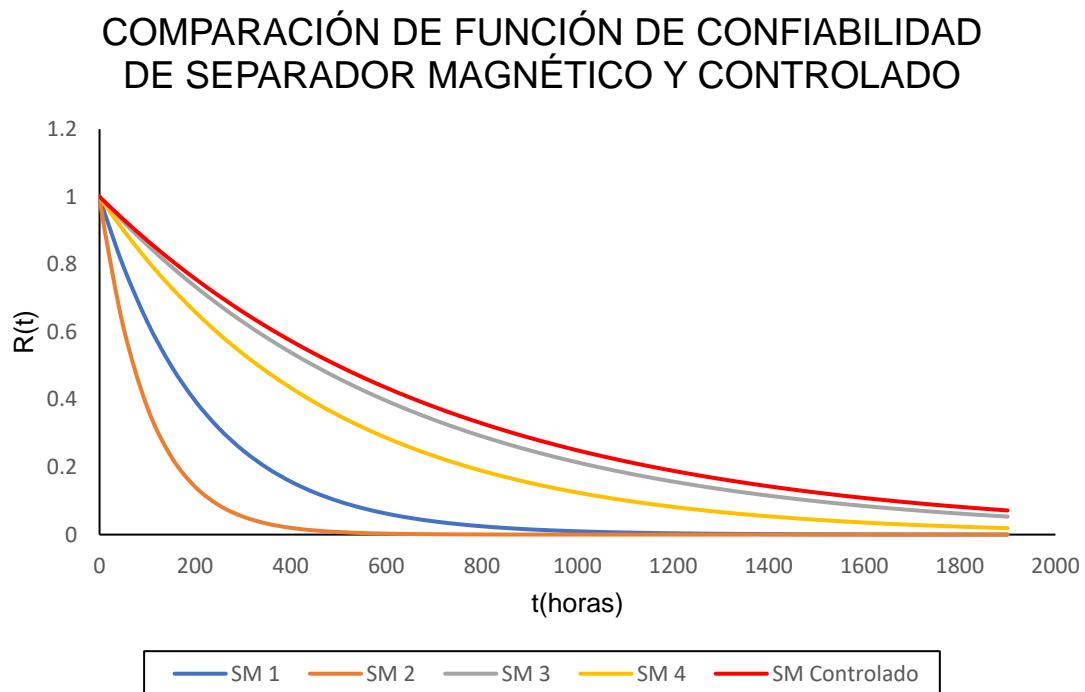
Gráfico de falla acumulada del separador magnético controlado



- Comparación de confiabilidad de los separadores magnéticos y controlado

Figura 4.11

Comparación de confiabilidad de los separadores magnéticos y controlado



Al determinar podemos comparar la confiabilidad de los separadores magnéticos determinando el área de cada gráfica aplicando la siguiente ecuación:

$$R(t) = \int_0^t e^{-\lambda t}$$

Si calculamos para un mes comercial determinamos que tan confiable es cada separador magnético, aplicando la *ecuación 11* resolvemos lo siguiente:

Tabla 4.6

Confiabilidad de los separadores magnéticos y controlado por un mes comercial

Confiabilidad de los separadores magnéticos por cada 720 horas o un mes comercial				
R(t) SM1	R(t) SM2	R(t) SM3	R(t) SM4	R(t) SM controlado
208.2944	102.225	434.6829	372.8978	455.12665
28.9298%	14.1979%	60.3726%	51.7914%	63.2120%

CONCLUSIONES

De acuerdo a la hipótesis general del capítulo I de la presente tesis se plantea la implementación de control de temperatura vinculado a un sistema de lazo cerrado y análisis para mejorar la confiabilidad del separador magnético, con el fin de regular el estado térmico de los cojinetes, los cuales se sobrecalentan por causa de la fricción existente entre el eje y el propio cojinete. De acuerdo al capítulo III (Desarrollo de la tesis), se pudo comprobar que el algoritmo implementado simula con precisión el control de inyección de grasa y temperatura en las chumaceras, mostrando variaciones de temperatura en comparación con el setpoint, como se aprecia en la *figura 3.14*. Cuando la temperatura supera el límite máximo, el programa alerta al operador sobre el aumento de temperatura y se verifica una disminución en el nivel de grasa, indicando que el lubricante se está inyectando hasta que la temperatura regresa a su valor óptimo de operación, como se puede observar en la *figura 3.24*.

Además, se comparó los gráficos de función de confiabilidad de cada separador magnético y se pudo determinar que el separador magnético 3 tiene mayor índice de confiabilidad a comparación de otros separadores magnéticos, esto es debido a su curva que tiene mayor área y su probabilidad de que falle el equipo es muy baja a comparación de otros separadores como se puede apreciar en la *figura 4.1*. A cambio en separador magnético 2 tiende a fallar muy pronto que otros separadores, esto es por el bajo índice de área de la curva del separador magnético 2, por lo cual su probabilidad de falla al mes es más alta comparado a otros separadores magnéticos, esto se puede apreciar en la *tabla 4.1* del capítulo de análisis y discusión de resultados.

Por otro lado, se desarrolló una función de transferencia del separador magnético 3 debido a su eficiencia y se desarrolló un modelo matemático con la finalidad de estimar su control de planta del separador magnético, lo cual en óptimas condiciones de control de temperatura se determinó que el separador magnético controlado es 2.84% más confiable que el separador magnético 3, lo cual el equipo controlado tiene

la probabilidad de un 63.212% de que no falle y ocurra una parada y el separador magnético 3 tiende al 60.3726%.

Finalmente, se determinó las ganancias proporcionales de los métodos de sintonización por Ziegler-Nichols y Cohen-Coon fueron comparados, demostrando que el control sintonizado por Ziegler-Nichols es ligeramente mejor, debido que responde con mayor velocidad ante cambios de set-point y perturbaciones, tendiendo más rápido su estabilidad.

RECOMENDACIONES

Este método de control se puede mejorar bajo Machine Learning, debido que el separador magnético puede ser lubricado de manera automática detectando temperaturas altas de operatividad, así lubricando de manera autónoma y mejorando la vida útil de los componentes que son las chumaceras, los cojinetes y el eje del tambor magnético, además de mejorar los índices de mantenimiento como puede ser los indicadores KPI.

Por otro lado, la toma de medidas se puede mejorar usando un instrumento termográfico, con la finalidad de determinar la variación de calor transmitido a través del espesor de referencia del cojinete. De esta manera se podría determinar como influye la temperatura entre las dimensiones exactas de los componentes del separador magnético influyendo además el tiempo por condiciones físicas y propiedades de la grasa, como se puede apreciar en la tabla de distribución de temperatura medidas por cada segundo mostrado en la *tabla 4.2* y como resultado presentó una estimación de función al 82.86%

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardenas Loardo, N. (2018). *Influencia de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad en la Disponibilidad Mecánica de los Equipos Scaler en la Unidad Minera Yauli* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico]. Universidad Nacional de del Centro del Perú.

Carmona Trani, J. I., Emigdio Leon, E., Gomez Morales, N., Montes de Oca Mancilla, J. C., & Salgado Galván, S. (2010). *Diseño de la Secuencia del Algoritmo de Control en un Sistema de Lubricación API 614* [Tesina para título de Ingeniería Mecánica]. Instituto Politécnico Nacional.

Chanco Pastrana, J. D. (2023). *Diseño de un Sistema de Control para la Eficiente Lubricación de Cojinetes en las Chumaceras de Carga-Central Hidroeléctrica Cashaucro* [Tesis para título profesional Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <https://fieeuncp.edu.pe>

Esquivel Guerrero, M. del P. (2021). *Diseño de un Modelo de Soporte Técnico de Lubricación como Herramienta de Mantenimiento Predictivo* [Tesis para obtener el grado de maestro en Administración]. Instituto Tecnológico Superior de Cajeme.

Gamboa Montalvo, J. A. (2017). *Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad para el Molino de Bolas Kurimoto 8'X6' en la Unidad Minera Catalina Huanca* [Tesis para título profesional de Ingeniero Mecánico]. Universidad Nacional de Trujillo.

Gómez de León, F. C. (1998). *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones.

González Fernández, F. J. (2005). *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado* (Vol. 28006). Fundación Confemetal.

Ibarra Viteri, I. R. (1990). *Simulación y control analógico de temperatura en líquidos* [Tesis para título de Ingeniería Electrónica y Control]. Escuela Politécnica Nacional.

Lajara Vizcaíno, J. R., & Pelegrí Sebastiá, J. (2011). *LabVIEW: Entorno gráfico de programación* (2da Edición). Marcombo.

Taconi, E., Mantz, R., Solsona, J., & Puleston, P. (2005). *Controladores Basados en Estrategias PID*.

Cengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2004). *Transferencia de Calor y Masa, fundamentos y aplicaciones* (4ta Edición). McGraw-Hill.

ANEXOS

ANEXO A: Matriz de Operacionalización de Variables	2
ANEXO B: Matriz de Consistencia	3
ANEXO C: Determinación y exportación de la función de transferencia de 2 polos y ningún cero con una estimación del 82.86%	4
ANEXO D: Determinación de función de Transferencia por Matlab a través de Datos Experimentales	4

ANEXO A

Matriz de Operacionalización de Variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Descripción
Independiente:			
Análisis de confiabilidad de la chumacera del separador magnético	Temperaturas medidas.	Temperatura (°C)	<p>El análisis de la confiabilidad del separador magnético basado en la medida de temperaturas registrados en la chumacera del separador magnético.</p> <ul style="list-style-type: none"> 1) Temperaturas medidas de 30 a 45°C, son óptimas e indican menor índice critico de los componentes. 2) Temperaturas de 45 a 60°C, indican un gasto de lubricante por rozamiento entre cojinetes, indica defecto de grasa en la chumacera. 3) Temperaturas medidas de 60°C a más, toman como referencia una cantidad muy baja de lubricante en los cojinetes, provocando un contacto entre componentes dentro de la chumacera y degastando el material, futuro problema de falla mecánica y parada del separador magnético.
Dependientes:			
Algoritmo de control de temperatura	Monitoreo de temperaturas	Gráfica de temperatura medida y temperatura real (°C)	Proceso del desarrollo del algoritmo ejecuta a la variable de proceso de temperatura regulando al valor del setpoint o temperatura real.
Tasa de falla	Cantidad de fallas por horas de operación	Fallas/horas	Constante para determinar la media de tiempo entre fallos reparables y la confiabilidad del equipo en horas de operación.
Sintonización de variables del sistema de control	Precisión de la temperatura medida respecto a la temperatura real	1) Ganancia proporcional (Kc) 2) Tiempo integral (Ti) 3) Tiempo derivativo (Td)	<p>El proceso de sintonización de variables sometido bajo los siguientes parámetros:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1) Valores de ganancia proporcional es directamente proporcional a la velocidad del controlador temperatura, pero inversamente proporcional a la estabilización. 2) Valores de Tiempo derivativo es inversamente proporcional a la velocidad del controlador de temperatura, sin embargo, es directamente proporcional a la estabilización. 3) Valores de Tiempo derivativo es directamente proporcional a la velocidad del controlador de temperatura y la estabilización.

ANEXO B

Matriz de Consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables e Indicadores	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo podemos evaluar y monitorear posibles fallas de los separadores magnéticos tomando medidas de temperaturas con la intención de reducir tiempos muertos de parada y optimizando la gestión del personal de mantenimiento?	<p>Objetivo general: Evaluar la confiabilidad de los separadores magnéticos en la minería mediante el desarrollo de un algoritmo de control de temperatura. Este algoritmo tiene como objetivo gestionar y monitorear los separadores, garantizando su rendimiento y eficacia en el sector minero.</p> <p>Objetivos específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Desarrollar un algoritmo que facilite el control de temperatura de manera continua medido hacia las chumaceras de los separadores magnéticos. b) Optimizar la temperatura ajustando los parámetros de ganancias proporcionales y tiempos (integrativos y derivativos). c) Analizar la tendencia de curvas de confiabilidad de los separadores magnéticos 	<p>Hipótesis general: Llevar a cabo una evaluación de temperaturas bajo un sistema de control mejora en tiempo real la confiabilidad y reduce el tiempo de parada de las chumaceras de los separadores magnéticos.</p> <p>Hipótesis específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) El algoritmo automatiza el control de temperatura en las chumaceras de los separadores magnéticos, previniendo el sobrecaleamiento de los cojinetes. b) Optimizar la sintonización entre la temperatura medida y la temperatura real mejora la precisión de la temperatura registrada por el algoritmo en menor tiempo. c) Las temperaturas altas pueden determinar una tendencia de confiabilidad y falla acumulada de los separadores magnéticos. 	<p>Independiente: Temperatura medida registrada en el controlador del sistema de lazo control cerrado, lo cual mide hacia la chumacera del separador magnético.</p> <p>Dependiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Algoritmo de control de temperatura. b) Variables de sintonización de proporcionalidad de temperatura c) Tasa de falla del separador magnético 	Toma de medidas de temperaturas que son registrados al día hacia las chumaceras de los separadores magnéticos.

ANEXO C

Determinación y exportación de la función de transferencia de 2 polos y ningún cero con una estimación del 82.86%.

```
tf1 =  
  
From input "u1" to output "y1":  
    0.05883  
-----  
s^2 + 0.4943 s + 0.01191  
  
Name: tf1  
Continuous-time identified transfer function.  
  
Parameterization:  
    Number of poles: 2    Number of zeros: 0  
    Number of free coefficients: 3  
    Use "tfdata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.  
  
Status:  
Estimated using TFEST on time domain data "mydata".  
Fit to estimation data: 82.86% (stability enforced)  
FPE: 7.287, MSE: 4.251
```

ANEXO D

Determinación de función de Transferencia por Matlab a través de Datos Experimentales

