

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO
DE OSCILACIONES EN UN SISTEMA DE CONTROL**

**SAMIR JOSE HADECHNI BONETT
JHON MARIO RAMIREZ PARRA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BARRANQUILLA - COLOMBIA
2020**

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO
DE OSCILACIONES EN UN SISTEMA DE CONTROL**

**SAMIR JOSE HADECHNI BONETT
JHON MARIO RAMIREZ PARRA**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico**

**ASESORES DISCIPLINARES:
ING. CARLOS DÍAZ SÁEZ, MSc.
ING. JAVIER JIMÉNEZ CABÁS, PhD.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BARRANQUILLA - COLOMBIA
2020**

Nota de aceptación

Firma del jurado 1

Firma del jurado 2

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a nuestras familias por haber sido de gran apoyo a lo largo de toda la carrera universitaria y a lo largo de la vida. A todas las personas especiales que nos acompañaron en esta etapa, aportando a la formación profesional y personal.

TABLA DE CONTENIDO

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO	1
LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABLAS.....	9
LISTA DE ECUACIONES.....	10
GLOSARIO	11
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN.....	15
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1. ANTECEDENTES	18
1.1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE.....	23
2. OBJETIVOS.....	28
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	28
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	28
3. MARCO DE REFERENCIA.....	29
3.1. ESTADO DEL ARTE	29
3.2. MARCO TEÓRICO.....	35
3.2.1 MARCO CONCEPTUAL	42
3.2.2 MARCO LEGAL	51
4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	53
4.1. METODLOGÍA	53
4.2. TIPO DE ESTUDIO.....	54
4.3. PARADIGMA	54
4.4. TIPO DE ESTUDIO.....	55
4.5. METODO DE LA INVESTIGACIÓN	55
4.6. POBLACION Y MUESTRA	55

4.7.	PROCEDIMIENTO.....	56
4.8.	RECOLECCIÓN DE DATOS	57
4.9.	PLAN DE TABULACION Y ANALISIS	57
4.10.	CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO.....	58
5.	PRESUPUESTO	62
5.1.	PRESUPUESTO GENERAL	62
5.2.	PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO.....	62
5.3.	CONSULTORIA ESPECIALIZADA.....	63
5.4.	MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS.....	63
6.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	65
6.1.	DISEÑO DEL PROTOTIPO	65
6.2.	DISEÑO DISPOSITIVO FINAL	66
6.3.	MATERIALES	68
6.3.3.	MUESTRA POBLACIONAL.....	68
6.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	69
6.4.3.	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL PROTOTIPO.	70
6.4.4.	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO FINAL	73
6.5.	MANUAL DE USUARIO.....	76
	CONCLUSIONES.....	77
	BIBLIOGRAFÍA.....	79
	ANEXOS	87
	Matriz de riesgo	87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto del pobre desempeño del control (M. Jelali) [20].....	25
Figura 2. Relación entre el desempeño económico y reducción de variabilidad (M. Jelali) [20].....	27
Figura 3. Diagrama de un PID (Mazzone, V.) [32].....	36
Figura 4. Componentes de un sistema de control de lazo cerrado (Borrero Salazar, A. A.) [28].	37
Figura 5. Diagrama de proceso de detección en un sistema de control (Fuente propia).....	37
Figura 6. Comunicación de un sistema automatizado (Fuente propia).	38
Figura 7. Monitoreo de sistema de control de lazo cerrado (Borrero Salazar, A. A.) [28].	38
• Figura 8. Ciclo de vida de una planta (Fuente propia).	39
Figura 11. Determinar con en el método basado en la función de auto covarianza (M. Jelali) [30].....	41
Figura 12. Diagrama de bloque de proceso metodológico. (Fuente propia).....	53
Figura 13. Etapas del proyecto. (Fuente propia)	56
Figura 14. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (propia autoría).....	65
Figura 15. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica para la detección de picos en OP. (propia autoría).....	65
Figura 16. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica para la detección de picos en PV. (propia autoría).....	66
Figura 17. Diseño final para la detección de oscilaciones. (propia autoría).	66
Figura 18. Método de detección de picos en el espectro de potencia. (propia autoría).....	67
Figura 19. Método ACF. (propia autoría).....	67
Figura 20. Sistema estable Método detección de picos. (propia autoría).	70
Figura 21. Sistema con perturbaciones Método detección de picos. (propia autoría).....	70
Figura 22. Sistema con perturbaciones Método ACF (propia autoría).	71

Figura 23. Sistema estable Método ACF (propia autoría).	71
Figura 24. Sistema estable Método IAE (propia autoría).....	72
Figura 25. Sistema estable Método IAElim. (propia autoría).	72
Figura 26. Detección de oscilaciones en planta con el método IAE (propia autoría).	74
Figura 27. Detección de oscilaciones en planta con el método ACF (propia autoría).	74
Figura 28. Detección de oscilaciones en planta con el método detección de picos en el espectro de potencia sistema con perturbación (propia autoría).	75
Figura 29. Detección de oscilaciones en planta con el método detección de picos en el espectro de potencia de un sistema estable (propia autoría).	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipo de ondas (Bibdigital.epn.edu.ec(n.d.)) [33].	36
Tabla 2. Valores de licencia de software (Fuente propia).	52
Tabla 3. Plan de trabajo. (Fuente propia).	58
Tabla 4. Cronograma (Fuente propia).	60
Tabla 5. Presupuesto general.	62
Tabla 6. Costo personal científico.	62
Tabla 7. Costo personal de apoyo.	63
Tabla 8. Costo consultoría especializada.	63
Tabla 9. Costo materiales e insumos.	63
Tabla 10. Costo de salida de campo.	64
Tabla 11. Costo de equipos usados.	64
Tabla 12. Formas de suministros de datos.	68
Tabla 13. Síntesis de datos para análisis.	69

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación (1). Determinar con el método basados en criterios de dominio de tiempo como la integral de error absoluto (IAE).....40

Ecuación (2). Determinar con el método basados en criterios de dominio de tiempo como la integral de error absoluto (IAElim)41

Ecuación (3). Determinar con el método basados en la función de auto covarianza.....41

GLOSARIO

Oscilaciones: Se denomina oscilación a una variación, perturbación o fluctuación en el tiempo de un medio o sistema.

Sintonizar: Poner un aparato receptor de ondas en sintonía con uno emisor.

Varianza: La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media.

Automatización: Es un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

Perturbaciones: Alteración o trastorno que se produce en el orden o en las características permanentes que conforman una cosa o en el desarrollo normal de un proceso.

Controlador: Un dispositivo que tiene una salida que varía para regular una variable controlada de una manera específica que puede ser un instrumento analógico-autónomo o digital, o puede ser el equivalente de un instrumento de este tipo en un sistema de control distribuido.

Lazo: Instrumentación dispuesta como una combinación de dos o más instrumentos o funciones dispuestas de manera que las señales pasen de una a otra con el propósito de medir, indicar o controlar una variable de proceso.

Monitoreo (Monitoring): La acción de vigilar los cambios en un estadístico que refleje el desempeño del control a lo largo del tiempo.

Evaluación (Assessment): Se refiere a la acción de evaluar el estadístico considerado en un momento determinado en el tiempo.

Proceso: Cualquier operación o secuencia de operaciones que involucre un cambio de energía, estado, composición, dimensión u otras propiedades que puedan definirse con respecto a cero o algún otro valor inicial definido.

Set-point: Una variable de entrada que establece el valor deseado de la variable controlada de forma manual, automática o por medio de un programa, en las mismas unidades que la variable controlada.

BPCS: Instrumentación y sistemas que se instalan para monitorear y controlar las operaciones de producción normales utilizando, pero no limitándose a combinaciones de monitores y controladores neumáticos y electrónicos de un solo lazo, controladores lógicos programables (PLC) y sistemas de control distribuido. Un BPCS es necesario para operar una planta o proceso.

DCS: Instrumentación, dispositivos de entrada/salida, dispositivos de control y dispositivos de interfaz de operador, que además de ejecutar las funciones de control e indicación establecidas, también permiten la transmisión de información de control, medición y operación hacia y desde ubicaciones especificables por el usuario, conectadas por enlaces de comunicación simples o múltiples.

Válvula de control: Un dispositivo diferente de una válvula común (la cual se acciona manualmente) o de una válvula de retención auto accionada, que manipula directamente el flujo de uno o más fluidos de corrientes de proceso.

Variable de proceso: Cualquier propiedad medible de un proceso; utilizado en este documento para aplicar a todas las variables que no sean señales de instrumentos entre dispositivos en un lazo.

RESUMEN

Los sistemas de control reciben señales de entradas, para ejecutar un proceso, el cual tiene como resultado una salida, las operaciones externas al sistema son las variables controladas producidas por perturbaciones del sistema. De esta manera la herramienta computacional tiene la función de detectar y diagnosticar las anomalías que presente el sistema, por lo general las causas de los malos resultados en un sistema de control son la no linealidad, ganancias excesivamente altas. El diagnóstico de oscilaciones de un sistema de control, se determinó a través de un método no invasivo. Con el fin de no alterar el proceso productivo de la planta. Las perturbaciones describen el tipo de oscilaciones presentes en el sistema, estos errores son generados por interacciones externas o internas. Para esto existen ciertos métodos para la detección de errores en el sistema, tales como la detección de picos en el espectro de potencia, método basado en los criterios de dominio de tiempo como la integral de error absoluto (IAE), métodos basados en la función de auto covarianza, entre otros.

El objetivo del proyecto es implementar una herramienta computacional para la detección de oscilaciones en los sistemas de control de lazo cerrado, para lograr identificar y diagnosticar las perturbaciones.

Palabras claves: Detección, Diagnóstico, Ganancias, Oscilaciones, Perturbaciones oscilatorias.

ABSTRACT

The control systems receive input signals, to execute a process, which results in an output, the external operations to the system are the controlled variables produced by system disturbances. In this way the computational tool has the function of detecting and diagnosing the anomalies that the system presents, generally the causes of the bad results in a control system are non-linearity, excessively high gains. The diagnosis of oscillations of a control system was determined by a non-invasive method. In order not to alter the production process of the plant.

The disturbances described the type of oscillations present in the system, these errors are generated by external or internal interactions. For this, there are specific methods for detecting errors in the system, stories such as the detection of peaks in the power spectrum, a method based on time domain criteria such as the integral of absolute error (IAE), a method controlled by the function self-covariance, among others.

The objective of the project is to implement a computational tool for the detection of oscillations in closed-loop control systems, to identify and diagnose disturbances.

Keyword: Detection, Diagnostic, Earnings, Oscillations, Oscillating Disturbances.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de control normalmente se presenta anomalías, que a su vez generan un mal rendimiento en el proceso productivo, los cuales producen desgaste, aumento en el consumo energético, entre otros.

A esto se le denomina perturbaciones que pueden ser tanto interna como externa, estas anomalías que son generadas por el sistema de control. En donde pueden detectar y diagnosticar a través de los siguientes métodos denominados como, detección de picos en el espectro de potencia (FFT), el método basado en los criterios de dominio de tiempo como la integral de error absoluto (IAE), método de basados en la función de auto covarianza (ACF). Para esto se creó una herramienta computacional en una interfaz gráfica de MATLAB®, llamada GUI, la cual nos permite detectar y diagnosticar perturbaciones en los sistemas de control de lazo cerrado, a través de los métodos mencionados anteriormente. Basado en los métodos implementados se garantizó que no fuesen invasivos.

Para la verificación y validación se desarrolló las pruebas experimentales y teóricas, mediante la herramienta de simulación Simulink de MATLAB®. Con base a los resultados obtenido en la simulación, se compararon con la herramienta computacional. Para esto se estructuró una metodología clara y precisa, con un fin específico. Creando un enfoque cuantitativo de investigación aplicada a través de método analítico, hacia una población industrial con una muestra hacia el sector productivo, utilizando técnicas e instrumento tales como encuestas diagrama de flujo e informe del rendimiento de la planta, para la cual se obtuvo un procedimiento en donde se identificó el proceso, las variables, las perturbaciones. Dando, así como resultado el diagnóstico del sistema de control.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad las industrias normalmente utilizan sistemas de control para diferentes procesos, para mantener un valor de referencia deseado y así satisfacer las especificaciones del cliente. En los sistemas puede haber miles de lazos de control, los cuales deben ser monitoreados constantemente, esto sumado a la alta complejidad de los procesos productivos, dificulta que el personal de planta mantenga los lazos de control operando a su máximo desempeño.

Una sintonización incorrecta, sumado a las perturbaciones y ruido presentado en la señal da a lugar un aumento indeseado en la varianza de las variables controladas. Muchas veces la mala sintonía del controlador puede dar lugar a una respuesta lenta, agresiva u oscilatoria del lazo de control, poca capacidad de rechazo de perturbaciones, poca robustez e incluso problemas de seguridad.

De los anteriores comportamientos, la presencia de perturbaciones oscilatorias resulta perjudicial no solo porque afecta los componentes mecánicos del proceso sino también porque se propaga el efecto oscilatorio de un lazo a otro y de un proceso a otro. Este aumento de la varianza trae como consecuencia un bajo desempeño del proceso y variabilidad en la calidad del producto conllevando a pérdidas económicas y de mercado.

Actualmente, la mayor parte de las compañías productoras utilizan sistemas de control automatizados para mantener las variables de proceso en su valor de referencia deseado y maximizar así ganancias transformando materia prima en productos terminados, cumpliendo restricciones de operación, calidad, seguridad, ambiental y legal.

En la estructura general de todo sistema de automatización se destacan tres niveles Control, el nivel bajo en línea directa con el proceso, Supervisión, como nivel intermedio, y Acciones globales como coordinación, optimización y administración

en un nivel superior. En el nivel inferior se encuentran lo que se conoce como controladores estándares de proceso (Controladores PID, Control predictivo basado en modelos – MPC, etc.) los cuales son los responsables de mantener la operación del proceso en condiciones satisfactorias mediante la compensación de los efectos por cambios en el proceso y en perturbaciones.

Sin embargo, estos controladores no trabajan adecuadamente frente a cierto tipo de situaciones como: cambios en las condiciones de operación del proceso, cambios en la naturaleza de las perturbaciones, problemas con actuadores y problemas con sensores, entre otros.

Estos cambios son considerados como fallas, las cuales se define como una desviación no permitida o no deseada de al menos una propiedad característica del sistema de su condición normal y/o usual de operación.

Un control de procesos óptimo sólo puede ser obtenido cuando todos los componentes antes mencionados están funcionando adecuadamente. Por ende, para sintonizar un lazo, es necesario verificar que cada componente esté operando según especificaciones y que tengan un diseño adecuado.

El monitoreo y evaluación del desempeño de lazos de control es un campo de investigación relativamente nuevo, cuyos mayores avances han tenido lugar en las últimas dos décadas.

1.1. ANTECEDENTES

A partir de la problemática se ha identificado que los sistemas de control de lazo cerrado a nivel industrial se han reconocido fallas, las cuales desde diferentes puntos de vista se han desarrollado investigaciones pertinentes a casos específicos para darle una solución, posteriormente nos conlleva a obtener aportes importantes para la solución de la problemática, las cuales se presentaran a continuación:

- **Detection of multiple oscillations in control loops**

El artículo expone la detección de oscilaciones en mediciones de un proceso químico, incluyendo el caso de que existan dos o más oscilaciones de diferentes frecuencias o que se presenten simultáneamente. La cual determinaron la utilización de un método basado en la regularidad de los cruces por cero de las funciones de auto covarianza filtradas. Se tomaron datos industriales el cual exhiben múltiples oscilaciones en toda la planta. Otro propósito de este artículo fue la discusión de implementar prácticamente una herramienta automatizada. Una de las características para la detección de lazo de control oscilantes sería:

- Detección de presencia de una o más oscilaciones que se encuentren indicadas por un patrón regular en los datos.
- Determinación de los periodos en las oscilaciones las cuales ayudan para inferir la presencia de una oscilación en toda la planta.
- Determinación de magnitudes de las oscilaciones, para este análisis se debe tener en cuenta más que todo la oscilación que presenta un mayor tamaño ya que estas tienen la facilidad de aumentar la variabilidad del proceso, a comparación de las oscilaciones que presenta un menor tamaño [1].

- **Oscillation Detection and Causality Analysis of Control Systems**

La investigación busca diagnosticar ciertas anomalías que presenta los procesos de un sistema de control para así detectar y caracterizar específicamente las oscilaciones. Para determinar la detención y estimar la frecuencia de oscilación la cual se pueden ocultar dentro de ruido. Otra de la manera la cual los sistemas de control producen oscilaciones serían por un ajuste agresivo o la falta de linealidad de la válvula o del proceso en sí. Para el desarrollo se evalúa la causa a raíz de las oscilaciones propagada, llevando a distinguir entre estos tres tipos de oscilaciones diferentes. Para así luego pasar a evaluar las características de la oscilación en el dominio de wavelet que permite el desarrollo de detectar y diagnosticar de forma independiente los diferentes componentes oscilatorios de las variables, utilizando simulaciones, experimento de laboratorio y estudios de casos industriales [2].

- **Online Oscillation Detection and Adaptive Control in Chemical Plants**

Este se basa en los procesos químicos se deben presentar una detección rápida y confiable de señales críticas. Una de las causas por la cual los controladores de retroalimentación dan a inicio a una oscilación serían por los cambios en las condiciones de operación, materia prima, grados de producto, tasas de producción así provocando no linealidades en el proceso. Al provocar estas oscilaciones en un proceso puede que la planta completa comience también a oscilar, esto provocando de cierta manera parada del equipo, tasas de producción pérdidas, productos fuera de grado o un mayor consumo de servicios [3].

- **Closed Loop Control Performance Monitoring**

El Control de retroalimentación proporcional, integral y derivativo, este es una de las tecnologías más utilizada para procesos industriales las cuales tiene como características tomar decisiones automatizada. Pero esta dependencia de esta tecnología, como también los bajos niveles de mantenimiento y la medición del

rendimiento es la norma en la industria de procesos. Para esto existen técnicas de análisis para la identificación de oscilaciones para posteriormente resaltar las causas a raíz del problema. Estas técnicas o métodos pueden ser de carácter estadístico de dominio de tiempo y frecuencia, como también el análisis de wavelet que sirve para diagnosticar el rendimiento del lazo. En el estudio se analizaron más de 127 lazos de control con diferentes problemas para luego realizar una resolución de problemas con mayor profundidad [4].

- **Detection and Diagnosis of Plant-wide Oscillations: An application study**

Este artículo se basa en los datos industriales la detección y diagnóstico de oscilaciones en un proceso de sistema de control. El método utilizado para la función de auto correlación se utiliza para la detección de múltiples oscilaciones en ciertas mediciones del proceso también para identificar las señales que presentan oscilaciones comunes. Con la ayuda del método estadístico de orden superior, se busca que las señales que tienen un comportamiento oscilatorio común se analicen para así detectar las posibles presencias de válvula de bloqueo, también el método sirve para la identificación de las variables que están causando oscilaciones. En el artículo se presentaron algunas problemáticas relacionadas con el diagnóstico de las oscilaciones para potencializar a futuras investigaciones [5].

- **Detección y diagnóstico de oscilación en lazos de control.**

El trabajo anterior presentaba un algoritmo en tiempo real para la detección de oscilaciones en lazos de control de retroalimentación PI y PID. Este artículo examina otras oportunidades para la detección de oscilaciones en el análisis fuera de línea de conjuntos de datos de lazos de control. Se enfatiza su uso con mediciones de operaciones rutinarias.

En este artículo se presentan diferentes formas para la indicación de las causas de una oscilación. Por lo general, un diagnóstico completo requiere una prueba especial para la cual el ciclo se retira de la operación de rutina. Este proceso conduce a recomendaciones sobre qué prueba especial es la más adecuada. Por lo tanto, reducen el tiempo dedicado a la resolución de problemas al guiar la elección de la prueba [6].

- **Detección automática de lazos de control de retroalimentación excesivamente oscilatorios**

Se propone un enfoque basado en estadísticas para detectar lazos de control de retroalimentación excesivamente oscilatorios. La técnica es simple y sólo requiere datos operativos normales. La eficacia y la aplicabilidad generalizada del nuevo enfoque se demuestran en varias aplicaciones experimentales, incluida una columna de destilación industrial [7].

- **Un monitor de rendimiento de lazos de control.**

Se presenta un procedimiento para la monitorización automática del rendimiento de los lazos de control. El monitor de rendimiento de los lazos de control (CLIM) detecta las oscilaciones en el lazo de control. Estas oscilaciones normalmente son causadas por una fricción demasiado alta en la válvula de control, pero también hay otras razones. El "CLON" está diseñado principalmente para conectarse con los PID, pero a su vez también sirve para conectarse con otros diferentes controladores. El procedimiento es automático en el sentido de que no se deben especificar parámetros adicionales, excepto los parámetros normales del controlador [8].

- **Detección automática de bucles de control lento.**

El artículo describe un procedimiento para la detección automática de lazos de control lentos, obtenidos de controladores conservados. Se define una medida, el índice de inactividad, de la lentitud del bucle de control. El índice de inactividad describe la relación entre los tiempos de correlación positiva y negativa entre el control y los incrementos de la señal de medición. Se puede determinar con una cantidad muy pequeña de conocimiento del proceso y es adecuado tanto para aplicaciones en línea como fuera de línea [9].

- **Avances y nuevas direcciones en la detección y diagnóstico de perturbaciones en toda la planta.**

La revista investiga acerca de los avances en la detección y el diagnóstico de las alteraciones del sistema de control en toda la planta en los procesos químicos y discute nuevas direcciones que parecen prometedoras para el futuro. Las causas de las perturbaciones en toda la planta incluyen ciclos límites no lineales en bucles de control, interacciones del controlador y problemas de ajuste.

El diagnóstico de no linealidad, especialmente cuando se debe a la formación de válvulas, ha sido un área activa. Sin embargo, la detección de interacciones y perturbaciones del controlador debido a la estructura de la planta sigue siendo un problema abierto y necesitará nuevos enfoques. Para el futuro, la vinculación del análisis basado en datos con un modelo cualitativo del proceso es una perspectiva emocionante [10].

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo detectar las oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado, para el reconocimiento de las perturbaciones y ruidos en las señales tratadas?

1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

- **IMPORTANCIA**

Basado en que los sistemas de control presentan alteraciones, tales como: mala sintonización, desgaste por funcionamiento, perturbaciones internas. Puede mostrar de cierta manera un bajo rendimiento del sistema de control, donde se busca la causa raíz del problema. A través de las oscilaciones que a menudo indican un problema más grave que el aumento de la variabilidad irregular. Por lo tanto, requieren un mantenimiento más avanzado que simplemente ajustado el controlador. Para esto se utilizan métodos no invasivos, ya que se toman datos en tiempo real de los lazos de control para no detener proceso, ahorrar tiempo y dinero.

Para esto se desarrolló una herramienta, que permite la identificación y diagnóstico de los errores presente en el controlador. Con el objetivo de crear planes de futura mejoras en el proceso, para así disminuir el costo de operación. Mediante el cual se desglosaron las áreas de mayor impacto del proyecto, que nos permitió el desarrollo de la herramienta, tales como:

- **IMPORTANCIA AMBIENTAL**

Una de las formas más eficaces de aumentar las ganancias es mediante la reducción del consumo de energía en los procesos y la reducción de la variabilidad en el producto final.

Parte de la alta variación de los productos se denomina defecto cuando no se cumplen estrictamente las especificaciones requeridas causando el reproceso o el desecho de este. Se ha estimado que un alto porcentaje de los lazos de control de los procesos, causan más variación en la variable controlada cuando se ejecutan en modo automático con respecto a cuándo operan en modo manual.

Resolviendo la problemática de las oscilaciones que presenta un sistema de control podríamos disminuir el consumo de energía, esto ayudando al medio ambiente debido a que las empresas presentan un consumo de energía no renovable.

- **IMPORTANCIA SOCIAL**

En Estados Unidos hay más de 8.300 instalaciones de manufactura de procesos continuos [11], y se estima que hay entre 500 y 5.000 lazos de control regulatorios por instalación [18], llegando a tener, solamente en este país, entre cuatro y 41 millones de lazos de control.

Más del 90% de los controladores que existen actualmente en los sistemas de control son del tipo PID [12] [13] [14], este es el controlador más predominante en la industria. A pesar de las grandes ventajas que trae la implementación de los lazos de control PID, muchas veces los resultados no alcanzan su máximo desempeño, esto debido a la mala sintonía del controlador, lo que puede dar lugar a una respuesta lenta, agresiva u oscilatoria del lazo de control, poca capacidad de rechazo de perturbaciones, poca robustez e incluso problemas de seguridad.

Bialkowski [18] señaló que sólo el 20% de los controladores trabajan bien y realmente disminuyen la variabilidad del proceso; Desborough y Miller [11] mencionan que sólo un tercio de los controladores se pueden clasificar como aceptables y el resto tiene una gran oportunidad de mejora. Debido a esto muchas veces los controladores son dejados en manual o presentan un desempeño pobre o aceptable, de hecho, cerca de dos tercios de todos estos controladores presentan una oportunidad de mejora [13] [14].

- **IMPORTANCIA TECNOLÓGICA**

Las principales industrias de EE. UU. consumen aproximadamente treinta mil millones de dólares anuales en energía (US DOE, 1994), una mejora de solo un 1% en la eficiencia energética representaría un ahorro de más de 300 millones de dólares en consumo energético para el sector industrial de Estados Unidos [17].

Para el caso de Colombia, el consumo energético total fue equivalente a 9.040 millones de dólares en el 2015, de los cuales 29.36% corresponden al sector industrial, es decir 2.654 millones de dólares; una mejora de solo un 1% en la eficiencia energética representaría un ahorro de más de 20 millones de dólares en consumo energético para el sector industrial [18].



Figura 1. Efecto del pobre desempeño del control (M. Jelali) [20].

A un esquema del efecto de un pobre desempeño de los lazos de control en el desempeño financiero de una planta o proceso. Las causas más comunes del deterioro del desempeño del control son: pobre sintonía del controlador, fallas en los equipos, pobre diseño del proceso, interacciones entre lazos, presencia de no-linealidades y oscilaciones.

De estos comportamientos, la presencia de oscilaciones no deseadas suele ser más perjudicial porque no solo disminuye el desempeño del sistema de control, sino que también afecta a los componentes mecánicos en el proceso. De hecho, más del

30% de los lazos de control presentan un comportamiento oscilatorio [20]. Estas oscilaciones pueden tener una procedencia particular, pero se pueden propagar rápidamente de un lazo a otro y de una unidad de proceso a otra [17], por ejemplo, mediante lazos de retroalimentación y/o por interacciones entre lazos de control. Se ha reportado que estas oscilaciones resultan en aumentos de variabilidad del proceso, causando productos de menor calidad, altas tasas de rechazo, aumento del consumo de energía y bajo desempeño (capacidad de producción) promedio del sistema.

De igual manera, y como si fuera poco, se estima que el 80% de los lazos de control del proceso causan más variabilidad cuando se ejecutan en modo automático que cuando se ejecutan en modo manual [16] [19], es decir que los controladores para poder realizar su función de control terminan desmejorando el desempeño del sistema, convirtiéndose así en un “mal necesario”.

Los procesos son diseñados para trabajar bajo ciertos límites operacionales definidos por los diseñadores y/o fabricantes, definiendo una región de operación factible donde es eficiente y seguro utilizar los equipos o procesos. Por fuera de estos límites no hay garantía de una operación satisfactoria, eficiente y segura.

Sin embargo, en muchas ocasiones las plantas/procesos son utilizadas por debajo de su capacidad máxima para evitar sobrepasar estos límites operacionales antes mencionados, debido a la alta variabilidad de los procesos o la incapacidad de responder rápida y adecuadamente ante cambios inesperados. Reducir la variabilidad en las variables de proceso ayudaría a mejorar el desempeño de estos.

El efecto que tiene la variabilidad en el desempeño de una planta o proceso se muestra en la Figura 5, indicando que trabajando en el punto de referencia 2 (SP2) se obtendrían mejores resultados en comparación a los obtenidos en el punto de referencia 1 (SP1) debido a la alta variabilidad actual. La reducción de la variabilidad tiene como consecuencia beneficios como una operación más segura y reducción

del impacto ambiental (reducción de incidentes, emisiones indeseables al medio ambiente), una manufactura más sostenible (uso eficiente de la materia prima y uso de energía por unidad de producto) [5]. El pobre desempeño del control, por otra parte, conduce a un pobre desempeño de la planta, y eso a su vez implica bajo rendimiento financiero.

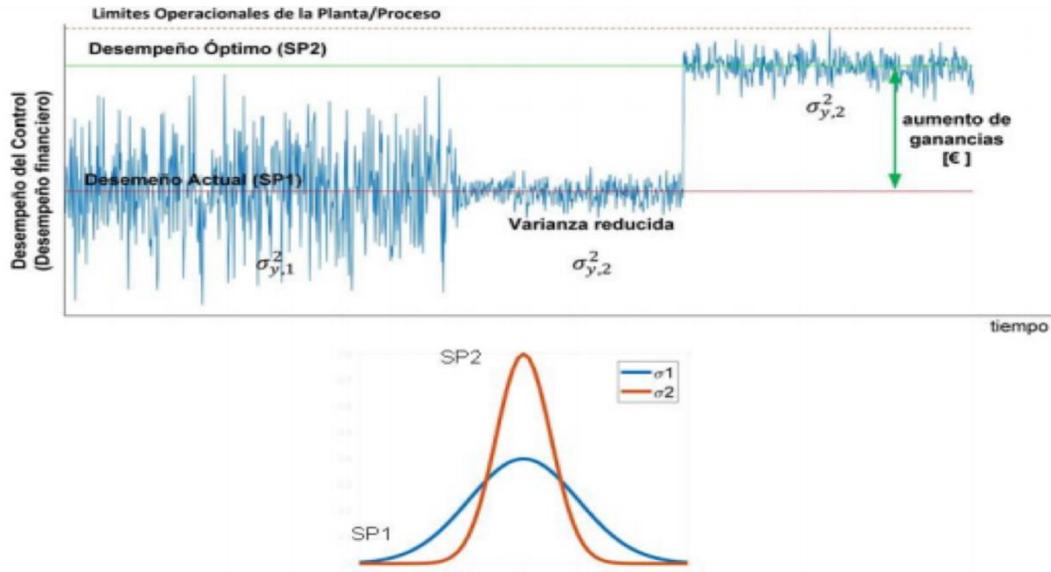


Figura 2. Relación entre el desempeño económico y reducción de variabilidad (M. Jelali) [20].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar una herramienta computacional para la detección de oscilaciones de los sistemas de control de lazo cerrado.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar un software adecuado para el desarrollo de la herramienta de detección de oscilaciones en un sistema de control.
- Realizar análisis comparativo de métodos para la detección de oscilaciones en un lazo de control.
- Integrar tres métodos de detección de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado para la determinación de oscilaciones.
- Validar la funcionalidad de la herramienta diseñada en entornos de simulación pertinentes.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. ESTADO DEL ARTE

- **Monitoreo del Desempeño del Lazo de Control (Control Performance Monitoring, CPM)**

El principal objetivo de un sistema CPM es proveer un procedimiento automático el cual entregue al personal de planta la información necesaria para determinar tanto si se están logrando los objetivos de desempeño y las características de respuesta deseada en las variables de proceso controladas, como evaluar el desempeño del sistema de control. Un sistema CPM debe ayudar a detectar deterioros en el desempeño de los sistemas de control debidos a variaciones en las condiciones de operación del proceso y emitir recomendaciones ya sea de inspección y/o mantenimiento de los componentes del lazo de control o de re-sintonización de los controladores [20].

- **Modelado, Simulación y control de sistemas con muestreo no convencional**

Se presenta una visión general de los principales desarrollos realizados en el análisis y diseño de un tipo especial de sistemas de control con muestreo no convencional (los sistemas multifrecuencia) desde sus inicios en 1955. En el modelado, diseño y simulación se toman como ejemplo algunos resultados obtenidos por los autores [21].

- **El estado actual de la supervisión del rendimiento del bucle de control: una encuesta de aplicación en la industria**

El objetivo general del monitoreo de rendimientos de bucle de control (CPM) en los procesos de producción industrial nos informamos sobre los resultados de una

encuesta entre usuarios de CPM. La encuesta hace un balance de los métodos existentes y su uso en la industria, así como qué fallas son más frecuentes y pueden detectarse. Se investigan y discuten los problemas de organización y de implementación. En este artículo se tiene como objetivo identificar temas de investigación abiertos y la dirección del desarrollo de CPM en los procesos de producción industrial [22].

- **Metodología para la detección de desajustes entre modelo y planta que afectan el rendimiento del control predictivo del modelo.**

La calidad del modelo para un modelo de control predictivo (MPC) es crítica para el rendimiento del bucle de control. Por lo tanto, evaluar el efecto del desajuste modelo-planta (MPM) es fundamental para la evaluación del desempeño y el monitoreo del MPC. Este artículo propone un método para evaluar la calidad del modelo basado en la investigación de datos de circuito cerrado y la función de sensibilidad de salida nominal, que facilita el procedimiento de evaluación para el desempeño real de circuito cerrado. La efectividad del método propuesto se ilustra mediante un estudio de caso multivariable, considerando plantas lineales y no lineales [23].

- **Diagnóstico automatizado basado en datos y reajuste iterativo de controladores proporcionales-integrales (PID)**

Los controladores mal ajustados contribuyen en gran medida al deterioro del rendimiento en las industrias de procesos, tanto directa como indirectamente, como en el caso del ciclo del actuador y la eventual falla debido a un ajuste agresivo. En este documento, se proporciona una extensa revisión y clasificación de la evaluación del rendimiento y los algoritmos de reajuste automático, tanto clásica como reciente.

Un rendimiento de diagnóstico compara un subconjunto de algoritmos más recientes que se basan en la clasificación del ajuste deficiente en las categorías generales de ajuste lento y ajuste agresivo.

El exponente de Hurst se presenta como un método para el diagnóstico de sintonización de bucle de control lento y agresivo. Además, en este documento se proporciona un marco para definiciones más rigurosas que las disponibles anteriormente de los términos "sintonización lenta" y "sintonización agresiva". Se compara el rendimiento de varios métodos de diagnóstico de sintonización, y se proponen e investigan nuevos algoritmos para usar estos métodos de diagnóstico de sintonización para la sintonización iterativa de los controladores PID utilizando estudios de simulación.

Los resultados de estos últimos estudios destacan el posible problema de la inestabilidad de los lazos cuando se vuelve a ajustar según los diagnósticos proporcionados por las medidas basadas en datos. Se compara el rendimiento de varios métodos de diagnóstico de sintonización, y se proponen e investigan nuevos algoritmos para usar estos métodos de diagnóstico de sintonización para la sintonización iterativa de los controladores PID utilizando estudios de simulación.

Los resultados de estos últimos estudios destacan el posible problema de la inestabilidad del lazo cuando se vuelve a ajustar según los diagnósticos proporcionados por las medidas basadas en datos. Se compara el rendimiento de varios métodos de diagnóstico de sintonización, y se proponen e investigan nuevos algoritmos para usar estos métodos de diagnóstico de sintonización para la sintonización iterativa de los controladores PI utilizando estudios de simulación. Los resultados de estos últimos estudios destacan el posible problema de la inestabilidad del bucle cuando se vuelve a ajustar según los diagnósticos proporcionados por las medidas basadas en datos [24].

- **Medidas no gaussianas y de persistencia para la evaluación de la calidad del bucle de control**

Se presenta una revisión y comparación de metodologías alternativas para controlar evaluación del desempeño. El enfoque utiliza no lineal análisis de series temporales, como las estadísticas no gaussianas, fractal crossover análisis, o enfoques basados en entropía. Hay una justificación práctica presentada para el análisis. La evaluación se basa en los datos reales recopilados de los sistemas industriales. No gaussiano análisis comienza con métodos estadísticos que utilizan diferentes funciones de distribución probabilística. Como otra medida potencial, el exponente de Hurst se calcula utilizando diferentes enfoques. Finalmente, en la trama R/S del análisis estadístico, junto con el fenómeno del punto de cruce se presenta una discusión. El documento termina con conclusiones y presentación de temas abiertos atractivos para un mayor desarrollo [25].

- **Evaluación de rendimiento de control multivariante y monitoreo del sistema de control mediante prueba de hipótesis en matrices de covarianza de salida.**

Los lazos de control existen ampliamente en los procesos industriales, cuyo desempeño influye directamente en la eficiencia, la seguridad y la calidad del producto de las plantas de producción. Por lo tanto, la evaluación del rendimiento del control (CPA) y el monitoreo del sistema de control (CSM) son de importancia crítica para el procesamiento industrial. En consideración de los sistemas de control multivariados, la matriz de covarianza de las salidas de circuito cerrado juega un papel importante tanto en CPA como en CSM.

Los métodos existentes se centran en comparar trazas o determinantes de las matrices de covarianza de salida, que sólo utilizan información parcial contenida en las matrices. Como resultado, los resultados de la evaluación y el monitoreo pueden ser engañosos.

Para esto proponen un esquema multiobjetivo para CPA y CSM de sistemas de control multivariados, que toma en cuenta todas las matrices de covarianza realizando una prueba de hipótesis sobre la igualdad de las matrices. Para cumplir con la presuposición de dicha prueba, se establecen filtros de media móvil autorregresiva (ARMA) para eliminar la autocorrelación contenida en los datos de salida de bucle cerrado [26].

- **Diagnóstico de bajo rendimiento en controladores predictivos modelo: perturbación no medida versus desajuste modelo-planta.**

La mala calidad del modelo en el controlador predictivo modelo (MPC) es a menudo una fuente importante de degradación del rendimiento. Un tema clave en la evaluación del modelo MPC es identificar si el mal desempeño proviene de desajustes modelo-planta (MPM) o perturbaciones no medidas (UD). Este documento propone un método para distinguir entre tales fuentes de degradación, donde la idea principal es comparar la distribución estadística de los resultados nominales estimados con el error de modelado real.

El enfoque propuesto se basa en la evaluación de tres estudios de caso: un MPC lineal SISO simple y dos casos multivariados, donde el controlador lineal está sujeto a una planta lineal y no lineal, respectivamente. Los resultados muestran que el método propuesto proporciona un buen indicador de la fuente de degradación del modelo, incluso cuando ambos efectos están presentes, pero uno de ellos es dominante [27].

- **Diseño de una estrategia de reducción de variabilidad en procesos con controladores tipo PID frente a perturbaciones oscilatorias.**

Inicialmente se realiza una contextualización a la problemática tratada en donde se aborda el contexto del monitoreo del desempeño del control. En segundo lugar, se presenta un análisis de la relevancia de la investigación, en donde se exponen algunas de las falencias de la ejecución actual del monitoreo del desempeño del control en donde además tiene como objetivo literario exponer los diferentes métodos de reducción de la variabilidad en procesos [28].

- **Evaluación del rendimiento del controlador en el seguimiento del punto de ajuste y el control reglamentario**

Examina los factores que influyen en la medida de rendimiento de varianza mínima de un lazo de control. Muestra un caso en el que el rendimiento del seguimiento del punto de ajuste difiere del rendimiento regulatorio durante la operación normal. La conclusión es que la evaluación del desempeño debe usar datos representativos de la intención de control.

Los resultados también demostraron cómo el rendimiento durante el funcionamiento normal estaba influenciado por la naturaleza de una perturbación, y que las correlaciones entre las señales dentro de un bucle de control indica la naturaleza de la perturbación. Los resultados sugieren que la variable manipulada se puede explotar en la evaluación del rendimiento del controlador [29].

3.2. MARCO TEÓRICO

Para esto se consideraron la siguiente teórica para el desarrollo de la herramienta tales como:

Sistema de control

Se denominan sistema a todo aquello que pueda combinar componentes para que ejecuten conjuntamente una función u objetivo, si se controlar un proceso se llama sistema de control los cuales se dividen en dos tipos que son de lazo cerrado y de lazo abierto. El Control de lazo abierto presenta una variable que controla el proceso en una sola dirección, mientras que en el control de lazo cerrado pretende mantener la relación preestablecida entre la variable de salida y la variable de entrada, comprobando sus funciones [39].

Las variables de un sistema de control, inicialmente se analizan los diferentes componentes del sistema de control que presentan una entrada y una salida, que es variable con el tiempo. Para determinar la entrada y la salida se debe tener en cuenta tanto las aplicaciones de leyes físicas como también el sistema de ecuación, los cuales pueden ser lineales y no lineales [35].

La obtención de la función de transferencia de control es aquella que se encuentra relacionada, la salida con la entrada del sistema. En base a esto se obtiene las ecuaciones diferenciales que presenta el sistema. $W(s)$ este es igualado a cero y se le denomina la ecuación característica, el cual nos permite obtener la estabilidad del sistema basado en el criterio de Nyquist [36].

Los PID son controladores que se denominan como lo más robustos en muchas de las aplicaciones industriales. El PID presenta una estructura, considerada como un

lazo de control, el cual tiene una entrada y una salida; El PID se divide en tres acciones proporcional (P), integral (I) y derivativa (D) [34].

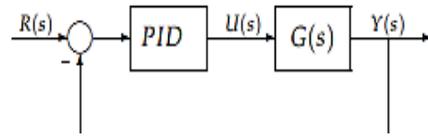


Figura 3. Diagrama de un PID (Mazzone, V.) [32]

- **Tipo de ondas**

Las ondas son conocidas como perturbaciones propagadas, que lleva a la intensidad en cualquier punto de un medio, en función del tiempo y la intensidad. Las ondas se pueden presentar en varios tipos tales como: eléctricas, electromagnéticas, acústicas o mecánicas [33]. Existen diferentes tipos de ondas las cuales se pueden clasificar como se observa en la tabla 2.

Tabla 1. Tipo de ondas (Bibdigital.epn.edu.ec(n.d.)) [33].

Tipo de ondas	Descripción
	<p>Onda senoidal</p> <p>Es considerada como la función matemática del seno de la trigonometría, tiene como característica de que la frecuencia única con una amplitud constante. Las ondas sinodales presentan periodo, frecuencia, voltaje y fase.</p>
	<p>Ondas cuadradas</p> <p>Se conocen como las ondas que pasan de un estado a otro de tensión, a intervalos regulares, en un tiempo limitado, son utilizadas para probar amplificadores, ya que esta presenta igual frecuencia.</p>
<p style="text-align: center;">onda triangular</p>	<p>Ondas triangulares</p> <p>Se presenta más que todo en circuito diseñado para poder controlar el voltaje linealmente un ejemplo sería el barrido horizontal de un osciloscopio analógico. Su función es la transición entre un nivel mínimo y máximo de la señal, la cual puede cambiar el ritmo constante que se conocen como rampas.</p>

Los lazos de control son la parte más representativa e importante debido a que los sistemas de control deben entregar un producto de calidad, mantener una seguridad de operación, en el consumo de materiales y energía, así interconectado el rendimiento financiero, como directamente y también indirectamente relacionado con el rendimiento de los sistemas de control. Para las empresas es fundamental alcanzar, restaurar y mantener un rendimiento óptimo de la planta [20].

En la figura 4 se puede observar los diferentes componentes de un sistema de control.

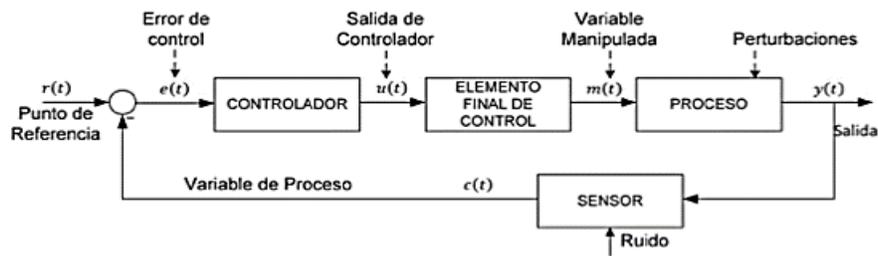


Figura 4. Componentes de un sistema de control de lazo cerrado (Borrero Salazar, A. A.) [28].

A continuación, se muestra en la figura 5 el diagrama respectivo de un proceso de detección en un sistema de control

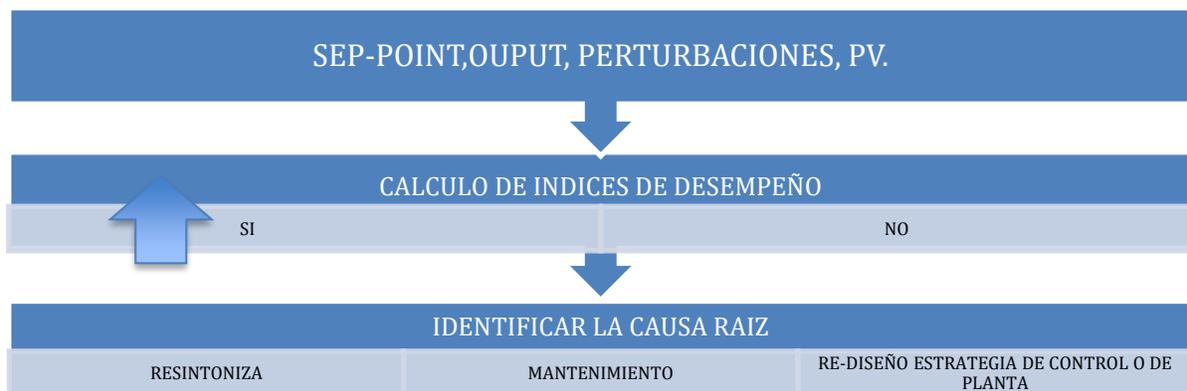


Figura 5. Diagrama de proceso de detección en un sistema de control (Fuente propia).

Se puede observar en la figura 6 la respectiva comunicación entre un sistema automatizado.



Figura 6. Comunicación de un sistema automatizado (Fuente propia).

Las causas de los malos resultados en un sistema de control se dividen en:

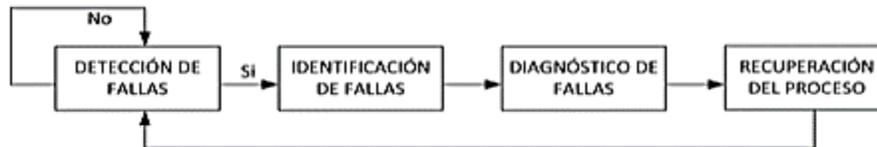


Figura 7. Monitoreo de sistema de control de lazo cerrado (Borrero Salazar, A. A.) [28].

La detección de la no linealidad del proceso se presenta más que todo los accionadores que puede ser la saturación, la banda muerta y los sensores, como también en el mismo proceso que puede ocasionar oscilaciones de ciclo límite. Detección de oscilaciones, esta se puede dar más que todo por las ganancias excesivamente altas, por los controladores y también por los trastornos o interacciones de oscilaciones, pero la más común sería por fricción que generan las válvulas de control.

- Las empresas presentan un ciclo de vida para la producción de sus plantas como se puede observar en la figura 8.



• Figura 8. Ciclo de vida de una planta (Fuente propia).

Bajo las condiciones establecida en el diagrama de la figura 8, se determinó el ciclo de operación óptimo de un proceso industrial. Tanto por razones de seguridad, rentabilidad y calidad es de gran beneficio la detección y diagnóstico de oscilaciones en un sistema de control. Para esto varios investigadores han sugerido diferentes métodos tales como:

- **Detección de picos en el espectro de potencia:**

Se denomina la amplitud del pico más alto que se presenta fuera de la zona baja de la frecuencia el cual tiene que ser comparada con la energía total que se encuentra en el área de la frecuencia, es decir la determinación del mando de la banda

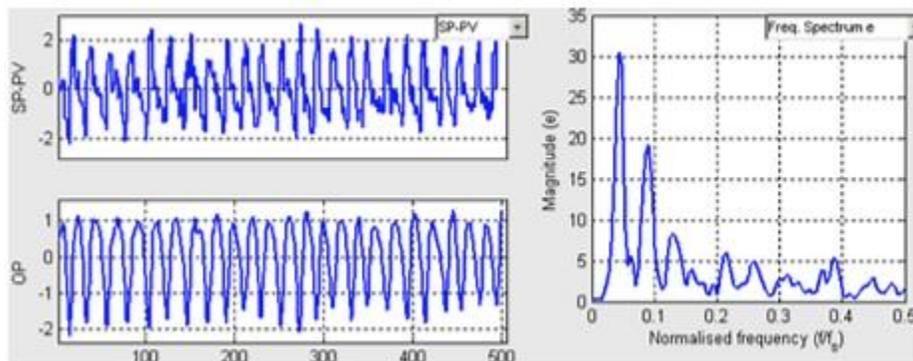


Figura 9. Detección de oscilaciones en un sistema de control no lineal (M. Jelali) [30].

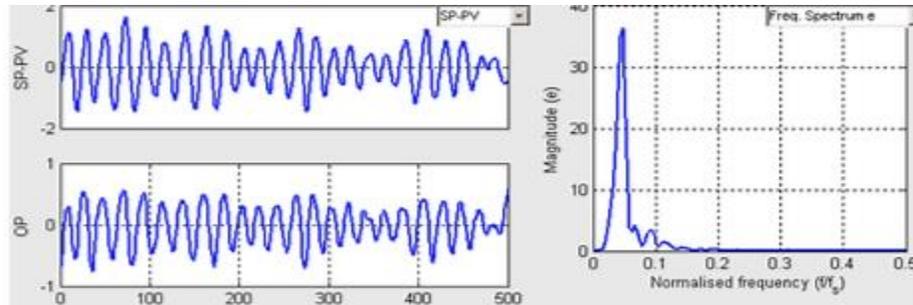


Figura 10. Detección de oscilaciones en un sistema de control que presenta perturbaciones (M. Jelali) [30].

Como se puede observar en la figura 9 y 10 se presenta la detección de oscilaciones de un proceso industrial el cual en figura 8 presenta las características de sinusoidal de oscilaciones así demostrado una indicación de no linealidad en el sistema de control en cambio en la figura 9 presenta un pico espectral distinto el cual este puede ser clasificado como una perturbación [30].

- **Métodos basados en criterios de dominio de tiempo como la integral de error absoluto (IAE):**

Este se divide en regularidad de “suficientemente grande” integral de error absoluto (IAE), este método fue prestado por Hagglund en 1995 que tiene como finalidad el cálculo IAE entre los cruces de cero del error de control., también está la detección de Load- Perturbación, este se da al aumentar las perturbaciones de carga, la magnitud aumenta así presentado un periodo relativamente largo sin cruces de cero, aumentado grandemente el valor de IAE. Al superar el límite de IAE, lo más probable que se presenten perturbaciones de carga. Este método tiene la finalidad de detección de carga de la perturbación para así detectar las oscilaciones en un sistema de control que puede ser tanto en la zona baja y gama media [30].

$$IAE = \int_{t_{i-1}}^{t_i} |e(t)| dt. \quad \text{Ecuación (1).}$$

El procedimiento de detección de perturbaciones de carga se puede utilizar para detectar oscilaciones. Suponer que el error de control es una onda sinusoidal pura con la amplitud A y la frecuencia ω , y que esta señal debe detectarse como una secuencia de perturbaciones de carga. Esto significa que la integral de cada medio período de la oscilación debe ser mayor que IAE_{lim} .

Luego se obtiene el siguiente límite superior de IAE_{lim} :

$$IAE_{lim} \leq \int_0^{\pi/\omega} |A \sin(\omega\tau)| dt = \frac{2A}{\omega}. \quad \text{Ecuación (2).}$$

- **Métodos basados en la función de auto covarianza:**

El ACF se denomina como la transformada de Fourier que se representa como la inversa del espectro que tiene potencia de dos lados. En este método ACF de una señal oscilante es en sí mismo oscilatorio con el mismo periodo que la oscilación en la tendencia temporal.

Este método presenta una gran ventaja que sería la detección de oscilaciones debido a que el impacto del ruido se reduce ya que el ruido blanco que presenta el ACF en teoría es cero, por los patrones de cruce de cero del ACF, puede diagnosticar la presencia de oscilaciones más claramente que en los cruces por cero de la tendencia temporal [30].

$$R_{acf} = \frac{a}{b}. \quad \text{Ecuación (3).}$$

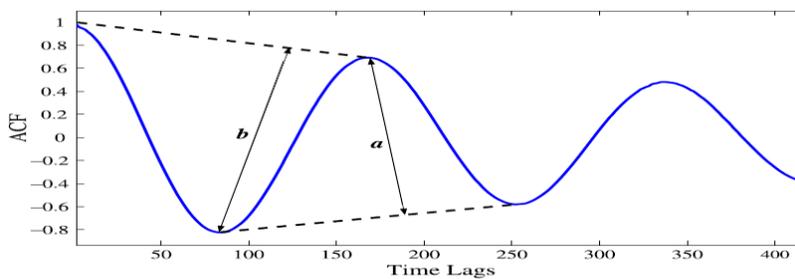


Figura 9. Determinar con en el método basado en la función de auto covarianza (M. Jelali) [30].

3.2.1 MARCO CONCEPTUAL

La idea general es detectar las fallas como una perturbación oscilatoria a partir del monitoreo del desempeño del lazo de control y atenuar dichas oscilaciones en línea, para identificar y diagnosticar las perturbaciones presentes en los lazos de control, para esto se realizó una revisión literaria, se dividió en tres líneas que abarcan toda la temática.

- La primera sección presenta los diferentes criterios de desempeño utilizados para evaluar el desempeño de los controladores.
- Posteriormente se presenta la revisión realizada de los métodos de detección de oscilaciones. Seguido de la revisión de las técnicas adaptativas para mejorar el desempeño de los controladores.
- Finalmente se presenta el estado de la técnica en el área del monitoreo del desempeño de lazos de control (CPM) es decir, validar la funcionalidad de la herramienta diseñada en entornos de simulación pertinentes.

La primera sección define los desempeños y sostenibilidad de todo proceso productivo industrial, lo cual dependen directa o indirectamente del desempeño de sus sistemas de control. El desempeño de un lazo de control se evalúa por medio de un indicador o criterio de desempeño el cual no hace más que expresar qué tan bien o mal se comporta un lazo de control ante una situación específica. En instalaciones industriales como procesos productivos continuos; los lazos de control resultan ser los componentes más importantes de los sistemas de automatización.

El desempeño económico de dichos procesos está directa o indirectamente ligado al desempeño de los lazos de control, ya que de éstos últimos dependen aspectos como garantía de condiciones de operación segura, calidad de los productos, consumo energético y de materia prima, entre otros.

Ahora bien, es importante resaltar que es natural que el desempeño de los lazos de control se degrade con el tiempo. El diseño, sintonía e implementación de estrategias de control se llevan a cabo en la primera fase en la solución de problemas de automatización.

Cuando se realiza correctamente, el resultado de esta fase debe ser un buen funcionamiento y desempeño del sistema de control. Sin embargo, después de algún tiempo de funcionamiento, aspectos como cambios en las características del material/producto utilizado, modificaciones de la estrategia de operación, cambios en el estado de los equipos de la planta (envejecimiento, desgaste, ensuciamiento, modificaciones de los componentes, etc.) y dificultades con los sensores y/o actuadores; pueden conducir a la degradación del desempeño del control.

De hecho, varios estudios demuestran que la vida útil promedio de una buena sintonía, es decir la duración promedio del buen desempeño en los lazos de control industrial, es de tan solo seis meses [15], [41], tiempo a partir del cual resulta conveniente evaluar su desempeño y tomar acciones correctivas de ser necesario. Por otra parte, se estima que alrededor del mundo hay más de tres millones de lazos de control en las industrias de procesos productivos continuos [11] y alrededor de diez mil ingenieros de control de procesos [42] lo que significa que en promedio cada ingeniero es responsable de al menos 300 lazos de control. Hay estudios que sugieren una cifra mayor, 450 lazos por ingeniero [43].

Esto sumado a la alta complejidad de los procesos productivos hace prácticamente imposible que el personal de planta mantenga los lazos de control operando a su máximo desempeño sin la ayuda de una herramienta de monitoreo CPM que utilice criterios de desempeño adecuados. El desempeño de control de un sistema está estrechamente relacionado con el esfuerzo de control y con la sintonía del controlador. El esfuerzo de control es de principal preocupación ya que se relaciona con el costo final del producto, y el tiempo de vida de los actuadores. El principal objetivo de un sistema CPM es proveer un procedimiento automático el cual

entregue al personal de planta la información necesaria tanto para determinar si se están logrando los objetivos de desempeño y las respuestas deseada en las variables de proceso, como para evaluar el desempeño del sistema de control [7]. Para lograr esto es necesario un correcto uso de indicadores de desempeño o criterios de desempeño al momento de evaluar el comportamiento del lazo de control.

Un criterio de desempeño se escoge en función de la respuesta que se espera que presente el lazo de control ante cierto tipo de entrada. Dado que más del 90% de los controladores empleados en la industria son de tipo PID, los cuales tienen restricciones de orden, estructura y tipo de acción; resulta conveniente definir índices de desempeño realistas para su evaluación, tal como los propuestos por Eriksson, Ko y Edgar en [44], [45]. Estos enfoques calculan un límite inferior de la varianza restringiendo el tipo de controlador a PID (benchmark del PID óptimo). En [46] Ko y Edgar obtuvieron una solución explícita para la salida del proceso en lazo cerrado en función de los parámetros del PID, mientras que otros desarrollos en este sentido han sido presentados por Grimble, Horton et al, Huang, Majecki & Grimble y Yu et al. En [47] – [48], respectivamente.

El estudio de los sistemas de control automático está dividido en tres partes importantes que son definidas a continuación:

1. Análisis: Consiste en obtener propiedades cuantitativas y cualitativas del sistema de control automático. Las propiedades cuantitativas están relacionadas con la obtención de la solución (respuesta transitoria) del sistema de ecuaciones que representa el comportamiento dinámico del sistema de control, el cual es llamado (modelo matemático). Mientras que las propiedades cualitativas de un sistema de control son propiedades que se obtienen sin solucionar el modelo matemático, tales como: estabilidad, controlabilidad, observabilidad, estabilizabilidad, etc.

2. Síntesis: Consiste en proponer una estrategia de control (controlador) que garantice que el sistema de control en lazo cerrado será un sistema de control estable.

3. Diseño: Consiste en buscar un controlador que garantice obtener en lazo cerrado una respuesta transitoria que satisfaga una serie de requerimientos previamente definidos; estos requerimientos están relacionados con el desempeño del sistema de control en lazo cerrado, así como su robustez.

- **Métodos de Detección de Perturbaciones Oscilatorias en Lazos de Control**

Las oscilaciones en los lazos de control de procesos son un problema muy común, estas a menudo indican un problema más grave que el aumento de variabilidad irregular y por lo tanto requieren un mantenimiento más avanzado que la simple re-sintonización del controlador.

Las revisiones recientes [11], [49] destacan la detección y el diagnóstico de perturbaciones en toda la planta como un problema clave que enfrentan las industrias de procesos. Las oscilaciones son un tipo común de alteración en toda la planta y la detección y diagnóstico de un comportamiento oscilatorio en un proceso químico es importante porque la variabilidad del proceso tiene un impacto en las ganancias [50].

Para consultores e ingenieros de control industrial, la detección de lazos de control oscilatorios es una actividad básica, en donde las principales características de interés son:

- (a) Detección de la presencia de una o más oscilaciones indicadas por un patrón regular en los datos.

- (b) Determinación de los periodos de las oscilaciones el cual se puede utilizar para inferir la presencia de una oscilación de toda la planta.
- (c) Determinación de las magnitudes de las oscilaciones.

Es necesario abordar una oscilación de gran magnitud porque aumenta la variabilidad del proceso, mientras que una oscilación de pequeña magnitud puede no ser motivo de preocupación [51].

Las oscilaciones (o vibraciones) son una forma muy drástica de degradación del desempeño de la planta, que en muchos casos puede ser inducida por el propio mecanismo de retroalimentación. En un sistema multi-lazos con interacciones mutuas, si un lazo comienza a oscilar, es probable que esta oscilación se extienda a otros lazos de control circundantes. Una oscilación se puede definir como “variaciones periódicas que no están completamente ocultas en el ruido y por lo tanto son visibles para los ojos humanos” según Horch en [52] o como “señal periódica con amplitud y frecuencia bien definidas. Una señal sinusoidal” según Choudhury [17].

Por lo tanto, el conocimiento de las propiedades cuantificables de las señales oscilatorias es necesario para hacer una correcta evaluación de si la falla es significativamente grande y requiere tomar una acción correctiva o no. La fuerza de las oscilaciones se puede cuantificar usando el período, la regularidad y la potencia según Thornhill [51], [53], [54]:

- Periodo. El recíproco de la frecuencia de oscilación se denomina el período de oscilación.
- Regularidad. La regularidad de la señal oscilatoria se traduce en una cantidad que representa el comportamiento no aleatorio.
- Potencia. El poder de las oscilaciones es un medio para cuantificar la amplitud de la señal oscilatoria.

Las oscilaciones ocurren con frecuencia en los sistemas industriales, y la mayoría de ellas están causadas por un ajuste agresivo del controlador, la presencia de no linealidades o debido a interacciones entre lazos. Las oscilaciones o vibraciones son una forma drástica de degradación del desempeño de la planta o proceso según Sanjuán [92]. Las causas más comunes de oscilaciones son:

- Sintonía agresiva. Ganancias muy altas del controlador puede conllevar a oscilaciones inaceptables en las variables de proceso.
- No-linealidades. Las razones más comunes de las no linealidades presentadas en los sistemas son debido a la fricción estática, zona muerta, histéresis, saturación, cuantificación digital (error de truncamiento).
- Perturbaciones. Las perturbaciones externas generalmente provienen de procesos aguas arriba transferidas por el material o de otros lazos de control debido a interacciones.

Interacciones entre lazos. Los lazos de control a menudo están mutuamente interactuando, de manera que, si un lazo está oscilando, lo más probable es que este afecte otros lazos también. En muchos casos, las oscilaciones se encuentran en un rango de frecuencia tal que el controlador no puede eliminarlas. Debido a esto, es posible que haya oscilaciones presentes incluso cuando el controlador esté bien sintonizado, ya que pudo haber sido sintonizado bajo otra tarea de control según Horch [55].

Las oscilaciones pueden estar presentes en las mediciones de indicadores, variables controladas (variables de proceso), errores del controlador, salidas del controlador o en el punto de referencia (set-point). Diversos autores han abordado la detección de mediciones oscilatorias en datos de proceso. Kedam [56], formuló una teoría para la determinación del comportamiento oscilatorio a partir de los cruces cero de una serie de tiempo.

Hagglund en 1995 [18], describe un método para la detección de oscilaciones dentro de un lazo de control donde detectó cruces por cero de la señal de error en un lazo de control y calculó el error absoluto integrado (IAE) entre cruces por cero sucesivos y otros autores también consideraron el problema (Thornhill y Hagglund en 1997 [57], Forsman y Stattin en 1999 [58], Rengaswamy et al. en 2001a [59]). Una tendencia de tiempo oscilatorio tiene valores IAE más grandes que para una tendencia de tiempo aleatoria. Miao y Seborg en 1999 [60].

Consideraron el valor absoluto de la función de auto covarianza oscilatoria en el primer mínimo junto con ciclos adicionales. Los autores demostraron que el método podría distinguir una oscilación en decaimiento de una oscilación sostenida. Xia y Howell en 2003 [61] dieron un análisis del estado del lazo que determinó si un lazo individual se vio afectado por transitorios a largo o corto plazo o una perturbación oscilatoria lenta o rápida.

Estos enfoques estaban dirigidos a lazos de control individuales. Ettaleb [62] consideraron el diagnóstico de oscilaciones en un lazo de control en cascada y mostraron que el origen de una oscilación podría aislarse entre el lazo maestro y esclavo utilizando un análisis de función descriptiva. Taha [63] presentaron un procedimiento de diagnóstico basado en las características de la válvula, mientras que [64] distinguió la oscilación del ciclo límite causada por la no linealidad en un lazo de control de efectos lineales como la sintonización oscilatoria. Horch [65] mostró que la covarianza de la entrada del controlador y la entrada del proceso sería una función impar en presencia de una válvula con histéresis. Xia y Howell en el 2001 [66], [67] proporcionaron un análisis del estado del lazo que determina si un lazo individual se ve afectado por transitorios de largo o corto plazo o por una perturbación oscilatoria lenta o rápida.

Las perturbaciones oscilatorias rápidas se atribuyeron a la sintonización o no linealidad. Thornhill [68] dieron una prueba de no linealidad capaz de identificar la fuente de una oscilación en toda la planta debido a los ciclos de limitación y

demonstraron su aplicación en un ejemplo industrial. Es necesario encontrar todas las mediciones o los lazos de control en una planta que tenga la misma perturbación porque la causa raíz estarán en ese grupo.

Pryor [69] destacó la utilidad de las funciones de auto covarianza y los espectros para tal propósito. Harris [70] reportó que el análisis espectral fue útil en la evaluación de lazos de control en toda la planta. M. Sanjuán. En el 2006 presentaron un método de detección de oscilaciones basado en la detección de picos [71].

K. Meléndez en 2015 [72] propone la detección de oscilaciones utilizando primitivas que son una secuencia de combinaciones de funciones para representar una señal medida del sensor. A continuación, se presentan las técnicas más utilizadas para detección de oscilaciones [51], las cuales son: cruces por cero, análisis de la función de auto covarianza, análisis de los datos, análisis de los parámetros de la señal (periodo, regularidad y potencia). Uso de cruces por cero de la función de auto covarianza.

Los intervalos entre cruces de cero de una tendencia de tiempo oscilatorio son regulares y se pueden aprovechar para la detección de oscilaciones fuera de línea. Sin embargo, en se ha reportado que el ruido en la tendencia temporal causó cruces por cero falsos [57].

Los cuadrados de las magnitudes de la transformada discreta de Fourier DFT dan una estimación del espectro de potencia de dos lados (los problemas numéricos relacionados con el método se discuten en [73]). La función de auto covarianza (ACF) es la transformada de Fourier inversa del espectro de potencia de dos lados (el Teorema de Wiener-Khinchin, [73]).

El ACF de una señal oscilante es en sí mismo oscilatorio con el mismo período que la oscilación en la tendencia temporal. La ventaja del ACF para la detección de oscilaciones es que el impacto del ruido se reduce porque el ruido blanco tiene un

ACF que, en teoría, es cero para los retrasos mayores que cero. El patrón de cruces por cero del ACF, por lo tanto, revela la presencia de una oscilación más claramente que los cruces por cero de la tendencia temporal. Conjuntos de datos con más de una oscilación Los cruces por cero de la ACF pueden no ser regulares si hay más de una oscilación presente. Los intervalos entre los cruces por cero de la función de auto covarianza no reflejan ninguna oscilación con precisión porque los cruces por cero de las oscilaciones rápidas y lentas destruyen la regularidad del patrón del otro [57].

El problema se resuelve mediante el filtrado del dominio de la frecuencia. Una ACF filtrada se calcula a partir de la transformada inversa de Fourier del espectro de potencia filtrada. El filtrado de dominio de frecuencia es preferible ante un banco de filtros wavelet porque las tendencias de tiempo oscilatorio son globales [74] Por lo tanto, no hay ninguno 39 requisitos para la localización en el dominio del tiempo, mientras que existe la necesidad de una ubicación precisa del filtro en el dominio de la frecuencia.

El filtro de dominio de frecuencia establece la potencia en los canales de frecuencia no deseados en cero. Debido al teorema de muestreo de Nyquist, la mitad superior del espectro de potencia es una imagen reflejada de la mitad inferior.

El alias del canal m' th es el canal $N - m + 2$, donde N es el número de muestras en la tendencia de tiempo (N es impar en esta formulación). El filtro de dominio de frecuencia opera en los canales requeridos y también en los canales con alias. El filtro es una realización aproximada de un filtro Wiener [73].

Un verdadero filtro de Wiener también requiere una estimación de la potencia de ruido dentro de los canales de frecuencia deseados que luego se restarían de esos canales. El costo por la simplificación es que la potencia presente en la banda de frecuencia deseada no puede atribuirse únicamente a ninguna oscilación presente.

3.2.2 MARCO LEGAL

En base a la certificación ISO establecida en el año 2015 ayuda a las empresas u organización a desarrollar y mejorar el rendimiento, para poder demostrar un alto nivel de calidad en sus productos para obtener esta certificación se debe tener en cuenta el siguiente ítem tales como

- Operar de forma más eficiente
- Cumplir los requisitos reglamentarios y estatutarios
- Llegar a nuevos mercados
- Identificar los riesgos y abordarlos

Posteriormente las empresas deben ofrecer servicios y productos de calidad con un margen de fiabilidad y sostenibilidad para mantener y mejorar su cuota de mercado. Con base a la ISO 9001, es la que permite la gestión de la calidad obteniendo un proceso continuo que serían implementación, mantenimiento y mejora. Teniendo en cuenta el proceso continuo las empresas o industrias serán altamente beneficiadas, debido a que obtendrán un sistema de gestión de la calidad, la cual le permite tener un nivel que es establecido internacionalmente [76].

Teniendo en cuenta que las oscilaciones presentan un aumento de la producción de una empresa debido a que la energía consumida es mayor puede ocasionar incumplimiento en el decreto número 2331 del año 2007, el cual establece una medida tendiente al uso racional y eficiente de energía eléctrica [75].

Por otra parte, el artículo 66 de la ley 143 de 1994, “establece que el ahorro de la energía, así como su conservación y uso eficiente, es uno de los objetivos prioritarios en el desarrollo de las actividades del sector eléctrico “[78]. Como también el artículo de la ley 697 de 2001, “la cual declaró el Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional y en ese sentido su artículo 2º dispuso que el Estado debe crear la estructura legal, técnica, económica y financiera necesaria para lograr el desarrollo de este tipo de proyectos a corto, mediano y largo plazo, económica y

ambientalmente viables, asegurando el desarrollo sostenible, al tiempo que generen la conciencia URE “[79].

El Decreto Reglamentario 3683 de 2003 que establece básicamente, “Es promover el uso racional y eficiente de la energía y demás formas de energía no convencionales, de tal manera que se tenga la mayor eficiencia energética para asegurar el abastecimiento energético pleno y oportuno, la competitividad de la economía colombiana, la protección al consumidor y la promoción de fuentes de energía no convencionales, de manera sostenible con el medio ambiente y los recursos naturales” [80].

Teniendo en cuenta las leyes establecida en la constitución colombiana, las empresas deben tener las medidas adecuadas que permitan mantener un sistema de ahorro de energía. También se debe obtener las licencias del software que puede ser libres o que se deban comprar.

Valores de las diferentes licencias, como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 2. Valores de licencia de software (Fuente propia).

NOMBRE	SOFTWARE	VALOR
Estándar	MATLAB	COP 8.070.682/USD 2,350, Licencia permanente , COP 3.228.273/USD 940, Licencia anual
Educación	MATLAB	COP 1.889.134/USD 550, Licencia permanente, 944.567/USD 275, Licencia anual
Hogar	MATLAB	COP 326.263/USD 95
Estudiante	MATLAB	COP 99.596/USD 29, Licencia de estudiante COP 188.889/USD 55, Licencia de suite de estudiante
SCILAB 6.0.2	SCILAB	Licencia libre
GNU OCTAVE 5.1.0	OCTAVE	Licencia libre

En lo establecido en la tabla 2, la ley colombiana tiene un decreto para protección de licencia pagas que sería la ley 603 de 2000, establece en el artículo 2º “Las autoridades tributarias colombianas podrán verificar el estado de cumplimiento de las normas sobre derechos de autor por parte de las sociedades para impedir que, a través de su violación, también se evadan tributos”

4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

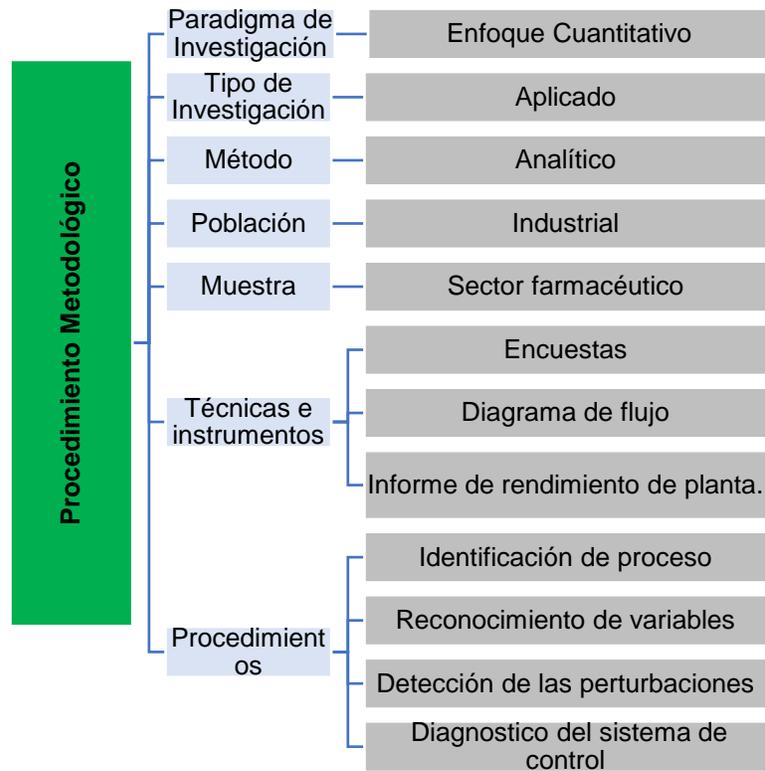


Figura 10. Diagrama de bloque de proceso metodológico. (Fuente propia).

4.1. METODLOGÍA

El método aplicado en la investigación es analítico, se integró varios análisis que sería las variables de entrada como también las variables de salida del sistema de control. También se llevó el análisis de los diferentes métodos para la detección de oscilaciones en los sistemas de control, que nos permite el progreso de obtener una variable de salida acorde para el sistema. Este análisis se debe realizar de manera no invasiva porque este método nos permite obtener el estudio de las variables sin detener el proceso del sistema de control de la empresa en estudio.

4.2. TIPO DE ESTUDIO

El tipo de estudio va dirigido de manera aplicada, debido a que toman datos experimentales o teóricos como también datos reales obtenidos por empresas. Estos antecedentes serian estudiado por la herramienta computacional que nos permitirá detectar las oscilaciones que generan perturbaciones tanto externas como internas en el sistema de control en estudio.

Primero se harán ciertos estudios teóricos como también experimentales, para posteriormente pasar con los datos de las industrias a estudiar, se hace de esta manera para tener certeza de que la herramienta esta generado una detección correcta de las oscilaciones en el sistema de control.

4.3. PARADIGMA

Con respecto al estudio realizado, se plantea que el paradigma de investigación es de tipo cuantitativo, debido a que nos favorece en la recolección de datos experimentales y teóricos para así aplicarlo en los sistemas de control afectado, tanto por las perturbaciones externas como las internas.

Para esto se debe recolectar las variables de entras y salidas del sistema de control, al obtener dicha información se realiza la hipótesis o estudio de las variables que están siendo afectada por la oscilación. Este estudio se hace estadísticamente con la asistencia de la herramienta computacional que nos permite diseñar y recolectar los datos de los sistemas de control, para así de manera estadística obtener sus respetivas soluciones.

4.4. TIPO DE ESTUDIO

El tipo de estudio va dirigido de manera aplicada, debido a que toman datos experimentales o teóricos, como también datos reales obtenidos por empresas. Estos antecedentes serian estudiado por la herramienta computacional que nos permitirá detectar las oscilaciones, que generan perturbaciones tanto externas como internas en el sistema de control en estudio. Primero se harán ciertos estudios teóricos como también experimentales, para posteriormente pasar con los datos de las industrias a estudiar, se hace de esta manera para tener certeza de que la herramienta esta generado una detección correcta de las oscilaciones en el sistema de control.

4.5. METODO DE LA INVESTIGACIÓN

El método aplicado en la investigación es analítico, se integró varios análisis que seria las variables de entrada como también las variables de salida del sistema de control. También se llevó el análisis de los diferentes métodos para la detección de oscilaciones en los sistemas de control, que nos permite el progreso de obtener una variable de salida acorde para el sistema. Este análisis se debe realizar de manera no invasiva porque este método nos permite obtenerte el estudio de las variables sin detener el proceso del sistema de control de la empresa en estudio.

4.6. POBLACION Y MUESTRA

El desarrollo de la investigación va dirigido a nivel industrial, en donde en la actualidad se utilizan o se implementan sistemas de control, con el fin de mantener una variable o una serie de ellas en un valor deseado, los sectores que más utilizan los lazos de control son los manufactureros, químicos, farmacéutico, etc. Con el fin de mantener la satisfacción cliente/usuario y maximizar así ganancias transformando materia prima en productos terminados; cumpliendo restricciones de operación, calidad, seguridad, ambientales y legales.

En latino América se han estado implementando sistemas de control con el fin de optimizar procesos, garantizando calidad y bajo costo, pero esta puesta en marcha de sistemas de control no alcanzan un 60%, en Colombia están en proceso de innovación e implementación de estas tecnologías para el desarrollo de productos con estándares de calidad y rentabilidad frente a procesos, la cual con un 30 % de las industrias contienen procesos que integren sistemas de control, un claro ejemplo de ella son: Tecnoglass (Barranquilla), Nacional de chocolate (Medellín), Reficar(Cartagena), entre otras. En donde todas sus operaciones están diseñadas a ser coordinadas o procesadas por un controlador previamente programado para el o los procesos pertinentes.

4.7. PROCEDIMIENTO

La investigación consta de cuatro etapas o fases de desarrollo para la herramienta funcional, clasificándolos de la siguiente manera (figura 11).

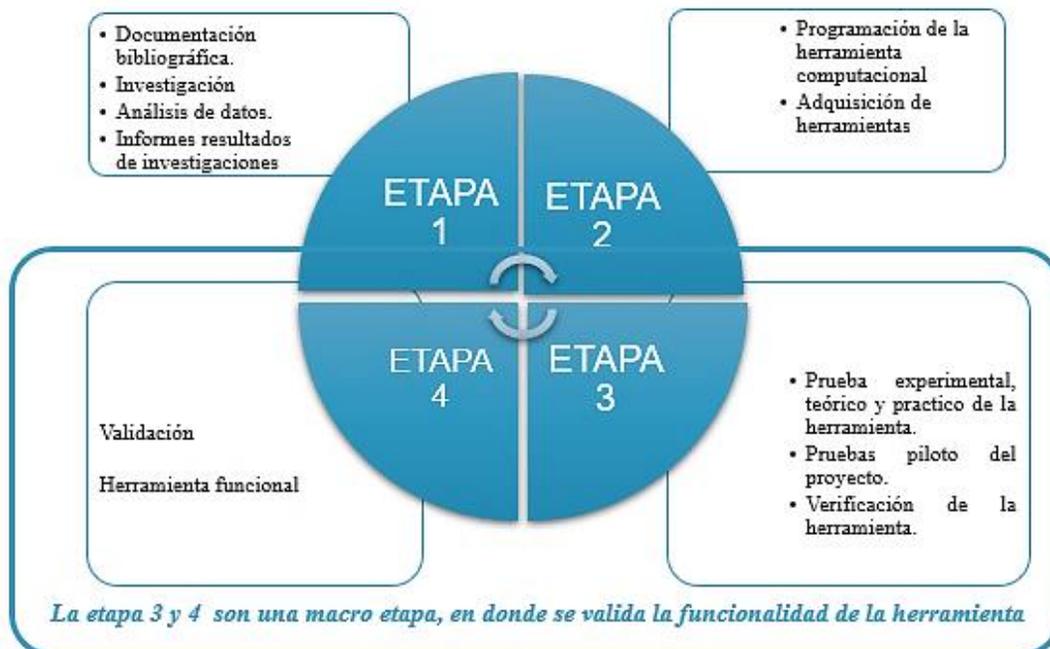


Figura 11. Etapas del proyecto. (Fuente propia)

Las fases del proyecto se darán mediante el desarrollo de la investigación, por otra parte, se debe tener en cuenta la problemática y los pasos rigurosos del procedimiento para la solución planteada. De tal manera que el primer paso sería conocer las diferentes perturbaciones que presenta el sistema de control que puede ser tanto internas como externas, luego se deben conocer los diferentes métodos para la detección de oscilaciones como también para su respectiva solución. Por otro caso para tener en cuenta sería el manejo o conocimiento de la herramienta a manipular, teniendo en cuenta todo el proceso lineal establecido luego se pasaría a la validación de la investigación con datos reales de empresas como con los experimentales.

4.8. RECOLECCIÓN DE DATOS

Las técnicas utilizadas en la recolección de información fueron encuestas, observaciones e información relacionada con el tema, como diagrama de flujo. En función a todo lo anterior se determina hacia qué sectores se visionaria la investigación y la muestra en donde se va a desarrollar la investigación.

Las fuentes utilizadas en esta investigación son académicas ya que a partir de la literatura del tema se desarrollará la herramienta computacional basados en principios y leyes que conllevan la utilización de sistemas de control para determina el rendimiento de una planta, generando diagnósticos y solución a los bajos a fallas.

4.9. PLAN DE TABULACION Y ANALISIS

La elaboración del plan de tabulación se fracciona de la siguiente manera, determinar las variables de entradas del sistema de control a utilizar como también las variables de salida, para así proceder a la detección de la problemática entre las variables analizadas para dar respuesta a la contrariedad que presenta el sistema de control. Esta tabulación se dará mediante análisis estadístico de manera computacional con la ayuda de herramientas.

4.10. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO

Tabla 3. Plan de trabajo. (Fuente propia).

 Universidad Autónoma del Caribe Proyecto de Grado - Ingeniería Mecatrónica PLAN DE TRABAJO 			
Componentes	Descripción	Tareas	Responsables
OBJETIVO 1	Identificar un software adecuado para el desarrollo de la herramienta de detección de oscilaciones en un sistema de control.	Determinar si es necesario la utilización de software libre o software con licencia.	Samir José Hadechni y Jhon Mario Ramírez
Entregable # 1	Documentación de los tipos de software que contengan requerimientos específicos para la solución del problema.		
Actividad 1	Investigaciones pertinentes frente a las variedades de software (libre o con licencias).		
Actividad 2	Tipificación y clasificación de los requerimientos para la implementación de la herramienta computacional.		
Actividad 3	Indagar costo/ beneficios de la utilización del software.		
Actividad 4	Selección del software más adecuado.	Compra de la licencia del software.	
Entregable # 2:	Informe del software seleccionado como plataforma de programación para el desarrollo		
Actividad 5	Evaluar el rendimiento de tipos de software tanto libre como con licencia.		
Actividad 6	Identificación de la interfaz donde se va a desarrollar la herramienta.		
Actividad 7	Validación del software	Realizar investigaciones pertinentes para la investigación.	
OBJETIVO 2	Realizar análisis comparativo de métodos para la detección de oscilaciones en un lazo de control.		
Entregable # 3	Identificación y documentación de los tipos de métodos utilizados para la detección de oscilaciones en sistema de control.		
Actividad 8	Investigación de métodos de detección de oscilaciones.		
Actividad 9	Análisis de las características de cada uno de los métodos.		
Actividad 10	Realizar un cuadro comparativo de los métodos utilizados exponiendo los beneficios y los contras al utilizar uno de estos métodos.		

Entregable # 4	Informe de exploración e identificación de los métodos más efectivos, eficaces y económico, para la integración a una interfase del desarrollo de un software.		
Actividad 11	Determinar que métodos son los más usados y que métodos contienen características específicas para el desarrollo de la herramienta.		
Actividad 12	Identificación de la utilización de métodos óptimos y prácticos para la detección y diagnósticos de perturbaciones existentes en un sistema de control.		
OBJETIVO 3	Integrar tres métodos de detección de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado para la determinación de oscilaciones.		
Entregable # 5	Expediente de los Método para utilizar en la interfaz para la detección de oscilaciones en lazos cerrados		
Actividad 13	Buscar el método de integración de métodos para que la herramienta genere datos precisos frente a perturbaciones externas o internas.		
Actividad 14	Garantizar que la herramienta no sea invasiva, para no alterar procesos	Desarrollar la herramienta con especificaciones precisas para diferentes procesos	
Actividad 15	Realización de la programación adecuada.		
Actividad 16	Realización de prueba/error en la programación.		
Entregable # 6	Informe de la Herramienta computacional funcional.		
Actividad 17	Realización de pruebas frente a procesos, para garantizar el rendimiento de plantas.		
Actividad 18	Puesta en marcha de la herramienta en base a procesos reales.	Programar e integrar métodos de detección y diagnóstico de oscilaciones en los lazos cerrados de control.	
OBJETIVO 4	Validar la funcionalidad de la herramienta diseñada en entornos de simulación pertinentes.		
Entregable # 7	Documentación final de la Herramienta computacional totalmente funcional validado a partir de pruebas experimentales y practicas frente a perturbaciones existentes en una planta.		
Actividad 19	Desarrollo de pruebas/error en los lazos de control.		
Actividad 20	Generación de informe frente al rendimiento de procesos y dispositivos de la planta.	Verificar a través de diferentes dispositivos la programación, integración de conceptos, métodos y funcionalidad de la herramienta computacional.	
Actividad 21	Validación de las herramientas experimentales/teórica/prácticas en dispositivos de simulación		

Tabla 4. Cronograma (Fuente propia).

 <div style="text-align: center;"> Universidad Autónoma del Caribe Proyecto de Grado - Ingeniería Mecatrónica Cronograma de actividades </div> 				
Componentes	Descripción	Fecha Inicio	Fecha Final	Valores Presupuesto
OBJETIVO 1	Identificar un software adecuado para el desarrollo de la herramienta de detección de oscilaciones en un sistema de control.	5/11/2019	5/12/2019	\$ 8.270.998,00
Entregable # 1	Documentación de los tipos de software que contengan requerimientos específicos para la solución del problema.	5/11/2019	16/11/2019	\$ 8.070.998,00
Actividad 1	Investigaciones pertinentes frente a las variedades de software (libre o con licencias).	5/11/2019	6/11/2019	\$ 0,00
Actividad 2	Tipificación y clasificación de los requerimientos para la implementación de la herramienta computacional.	7/11/2019	8/11/2019	\$ 0,00
Actividad 3	Indagar costo/ beneficios de la utilización del software.	9/11/2019	10/11/2019	\$ 0,00
Actividad 4	Selección del software más adecuado.	11/11/2019	12/11/2019	\$ 8.070.998,00
Tarea 1	Determinar si es necesario la utilización de software libre o software con licencia.			
Entregable # 2:	Informe del software seleccionado como plataforma de programación para el desarrollo	15/11/2019	1/12/2019	\$ 200.000,00
Actividad 5	Evaluar el rendimiento de tipos de software libre o con licencia.	15/11/2019	17/11/2019	\$ 0,00
Actividad 6	Identificación de la interfaz donde se va a desarrollar la herramienta.	18/11/2019	21/11/2019	
Actividad 7	Validación del software	22/11/2019	1/12/2019	\$ 200.000,00
Tarea 2	Compra de la licencia del software.			
OBJETIVO 2	Realizar análisis comparativo de métodos para la detección de oscilaciones en un lazo de control.	10/12/2019	25/12/2019	\$ 0,00
Entregable # 3	Identificación y documentación de los tipos de métodos utilizados para la detección de oscilaciones en sistema de control.	10/12/2019	16/12/2019	\$ 0,00
Actividad 8	Investigación de métodos de detección de oscilaciones.	10/12/2019	11/12/2019	\$ 0,00
Actividad 9	Análisis de las características de cada uno de los métodos.	12/12/2019	13/12/2019	\$ 0,00
Actividad 10	Realizar un cuadro comparativo de los métodos utilizados exponiendo los beneficios y los contras al utilizar uno de estos métodos.	14/12/2019	16/12/2019	\$ 0,00
Tarea 3	Realizar investigaciones pertinentes para la investigación.			
Entregable # 4	Informe de exploración e identificación de los métodos más efectivos, eficaces y económico, para la integración a una interfaz del desarrollo de un software.	17/12/2019	25/01/2020	\$ 0,00

Actividad 11	Determinar que métodos son los más usados y que métodos contienen características específicas para el desarrollo de la herramienta	17/12/2019	19/12/2019	\$ 0,00
Actividad 12	Identificación de la utilización de métodos óptimos y prácticos para la detección y diagnósticos de perturbaciones existentes en un sistema de control	20/12/2019	23/12/2019	\$ 0,00
Tarea 4	Determinación del método a utilizar para el sistema de control.			
OBJETIVO 3	Integrar tres métodos de detección de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado para la determinación de oscilaciones.	12/01/2020	6/03/2020	\$ 770.000,00
Entregable # 5	Expediente de los Método para utilizar en la interfaz para la detección de oscilaciones en lazos cerrados	12/01/2020	25/02/2020	\$ 770.000,00
Actividad 13	Buscar el método de integración de métodos para que la herramienta genere datos precisos frente a perturbaciones externas o internas.	12/01/2020	17/01/2020	\$ 0,00
Actividad 14	Garantizar que la herramienta no sea invasiva, para no alterar procesos	18/01/2020	20/01/2020	\$ 0,00
Actividad 15	Realización de la programación adecuada.	21/01/2020	15/02/2020	\$ 570.000,00
Actividad 16	Realización de prueba/error en la programación.	16/02/2020	25/02/2020	\$ 200.000,00
Tarea 5	Desarrollar la herramienta con especificaciones precisas para diferentes procesos.			
Entregable # 6	Informe de la Herramienta computacional funcional.	26/02/2020	9/03/2020	\$ 0,00
Actividad 17	Realización de pruebas frente a procesos, para garantizar el rendimiento de plantas.	26/02/2020	1/03/2020	\$ 0,00
Actividad 18	Puesta en marcha de la herramienta en base a procesos reales.	2/03/2020	6/03/2020	\$ 0,00
Tarea 6	Programar e integrar métodos de detección y diagnóstico de oscilaciones en los lazos cerrados de control.			
OBJETIVO 4	Validar la funcionalidad de la herramienta diseñada en entornos de simulación pertinentes.	10/03/2020	3/04/2020	\$ 1.800.000,00
Entregable # 7	Documentación final de la Herramienta computacional totalmente funcional validado a partir de pruebas experimentales y practicas frente a perturbaciones existentes en una planta.	10/03/2020	3/04/2020	\$ 1.800.000,00
Actividad 19	Desarrollo de pruebas/error en los lazos de control.	10/03/2020	14/03/2020	\$ 1.000.000,00
Actividad 20	Generación de informe frente al rendimiento de procesos y dispositivos de la planta.	15/03/2020	19/03/2020	\$ 200.000,00
Actividad 21	Validación de las herramientas experimentales/ teórica/prácticas en dispositivos de simulación	20/03/2020	3/04/2020	\$ 600.000,00
Tarea 7	Verificar a través de diferentes dispositivos la programación, integración de conceptos, métodos y funcionalidad de la herramienta computacional.			-
				\$ 83.831.142,00
				Valor total del presupuesto

5. PRESUPUESTO

5.1. PRESUPUESTO GENERAL

Tabla 5. Presupuesto general.

PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO					
RUBROS	Fuentes de Financiamiento				Total
	Vicerrectoría de Investigación y Transferencia UAC	Facultad / Programa	Otras fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Personal Científico	\$ 0	\$ 0	\$ 0	\$ 60.270.144	\$ 60.270.144
2. Personal de Apoyo	\$ 0	\$ 0	\$ 520.000	\$ 80.316	\$ 600.316
3. Consultoría Especializada y Servicios Técnicos	\$ 0	\$ 0	\$ 2.000.000	\$ 0	\$ 2.000.000
4. Materiales e Insumos	\$ 0	\$ 8.070.682	\$ 300.000	\$ 0	\$ 8.370.682
5. Salidas de Campo	\$ 0	\$ 1.000.000	\$ 2.000.000	\$ 0	\$ 3.000.000
6. Equipos	\$ 0	\$ 0	\$ 3.000.000	\$ 0	\$ 3.000.000
7. Bibliografía	\$ 0	\$ 0	\$ 120.000	\$ 0	\$ 120.000
8. Difusión de Resultados	\$ 0	\$ 0	\$ 6.000.000	\$ 0	\$ 6.000.000
9. Viajes	\$ 0	\$ 0	\$ 470.000	\$ 0	\$ 470.000
TOTAL, PRESUPUESTO DEL PROYECTO	\$ 0	\$ 9.070.682	\$ 14.410.000	\$ 60.350.460	\$ 83.831.142

5.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO

Tabla 6. Costo personal científico.

1. PERSONAL CIENTIFICO								
Nombres y Apellidos	Función dentro del Proyecto	Tipo de Contrato	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento		
						Facultad / Programa	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Ingeniero Carlos Díaz Sáenz	Invest. Principal	Instructor	\$ 33.911	3	48	Ing. mecatrónica	\$ 4.883.184	\$ 4.883.184
2. Ingeniero Javier Jiménez	Coinvestigador	Instructor	\$ 33.911	1	48	Ing. mecatrónica	\$ 1.627.728	\$ 1.627.728
3. Samir José Hadechni bonett	Invest. Principal	Titular	\$ 46.666	12	48	Ing. mecatrónica	\$ 26.879.616	\$ 26.879.616
4. Jhon Mario Ramírez Parra	Invest. Principal	Titular	\$ 46.666	12	48	Ing. mecatrónica	\$ 26.879.616	\$ 26.879.616
SUB-TOTAL						\$ 0	\$ 60.270.144	\$ 60.270.144

Tabla 7. Costo personal de apoyo.

2. PERSONAL DE APOYO								
Nombres y Apellidos	Función dentro del Proyecto	Tipo de Vinculación	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento		
						Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Diego Ramirez	Aux. Investigación	Practicante	\$ 2.231	4	9	\$ 520.000	\$ 80.316	\$ 600.316
SUB-TOTAL						\$ 520.000	\$ 80.316	\$ 600.316

5.3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA

Tabla 8. Costo consultoría especializada.

3. CONSULTORIA ESPECIALIZADA Y SERVICIOS TECNICOS EXTERNOS			
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento	
		Otras Fuentes Externas	SUB-TOTAL
1. validación de la herramienta	verificación de la funcionalidad de la herramienta	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
SUB-TOTAL		\$ 2.000.000	\$ 2.000.000

5.4. MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS

Tabla 9. Costo materiales e insumos.

4. MATERIALES E INSUMOS				
Descripción	Justificación	Fuentes de Financiamiento		
		Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	SUB-TOTAL
1.Licencia de Matlab®	Para el desarrollo de la herramienta computacional	\$ 8.070.682	-	\$ 8.070.682
2.Investigación y consultas	Desarrollo de la investigación	-	\$ 200.000	\$ 200.000
3.Papelaria	Documentación de la investigación	-	\$ 100.000	\$ 100.000
SUB-TOTAL		\$ 8.070.682	\$ 300.000	\$ 8.370.682

Tabla 10. Costo de salida de campo.

5. SALIDAS DE CAMPO									
Descripción	Lugar	No. de Días	No. de Personas	Costo/día por persona	Fuentes de Financiamiento				
					Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1.Verificación de la programación	simuladores	10	\$ 2,00	\$ 50.000,00	-	-	\$ 1.000.000	-	\$ 1.000.000
2.Prueba/error de la herramienta	Laboratorios	5	\$ 4,00	\$ 50.000,00	-	\$ 1.000.000	-	-	\$ 1.000.000
3.Validación de la herramienta funcional	Planta	5	4,00	50.000,00	-	-	\$ 1.000.000	-	\$ 1.000.000
SUB-TOTAL					\$ 0	\$ 1.000.000	\$ 2.000.000	\$ 0	\$ 3.000.000

Tabla 11. Costo de equipos usados.

6. EQUIPOS							
Descripción	Justificación	Cantidad	Fuentes de Financiamiento				SUB-TOTAL
			Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Computadores	Para el desarrollo de la herramienta en la interfaz	2			\$ 3.000.000		\$ 3.000.000
SUB-TOTAL			\$ 0	\$ 0	\$ 3.000.000	\$ 0	\$ 3.000.000

6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El diseño del prototipo tiene como finalidad establecer un modelo adecuado para la herramienta computacional, como se puede observar en la figura 14 el GUI® de MATLAB® cuenta con una tabla, la cual cumple con la función de conocer los datos del sistema a analizar, posteriormente se debe graficar tanto el sistema total como también PV Y OP, con la finalidad de observar el comportamiento del sistema en estudio. Para así continuar con la detección de picos en PV y OP.

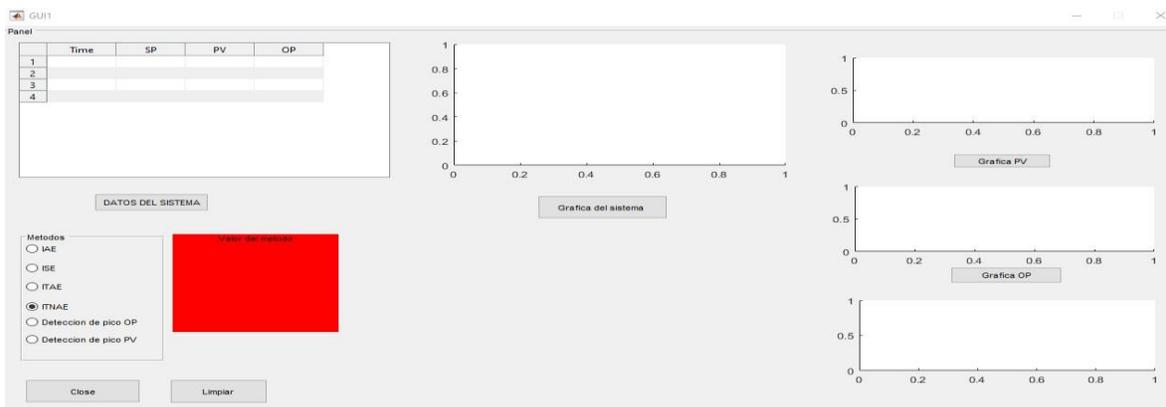


Figura 12. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (propia autoría)

En la figura 15 y 16 se puede observar funcionamiento del GUI, básicamente de enlazar los datos en la interfaz. Y también se puede ver la detección de los picos en PV Y OP.

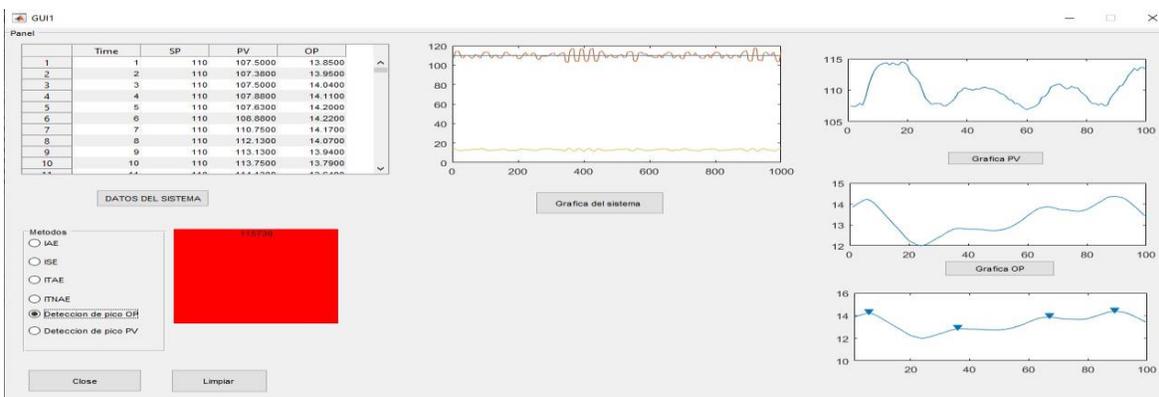


Figura 13. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica para la detección de picos en OP. (propia autoría)

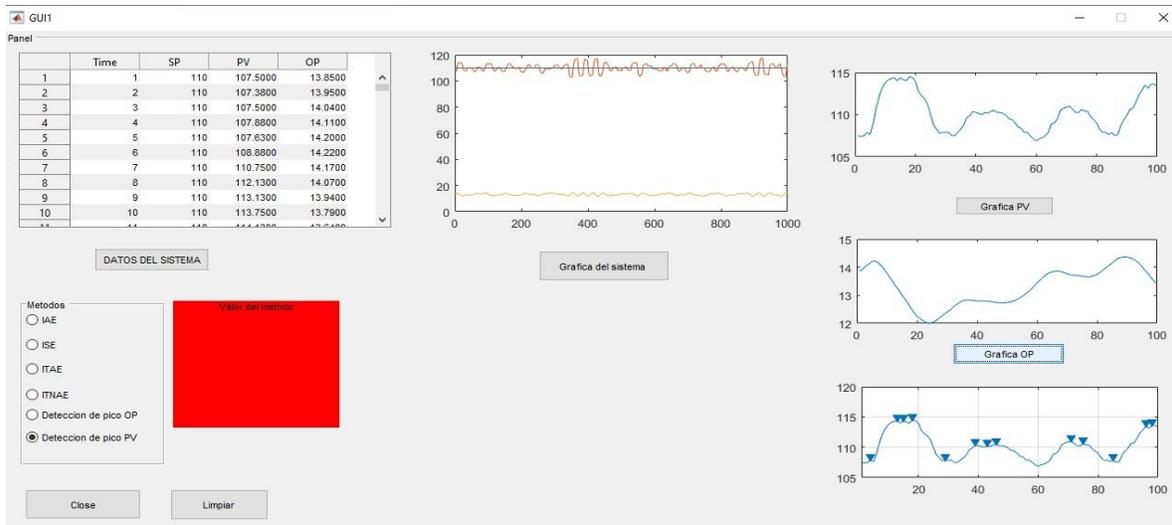


Figura 14. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica para la detección de picos en PV. (propia autoría).

6.2. DISEÑO DISPOSITIVO FINAL

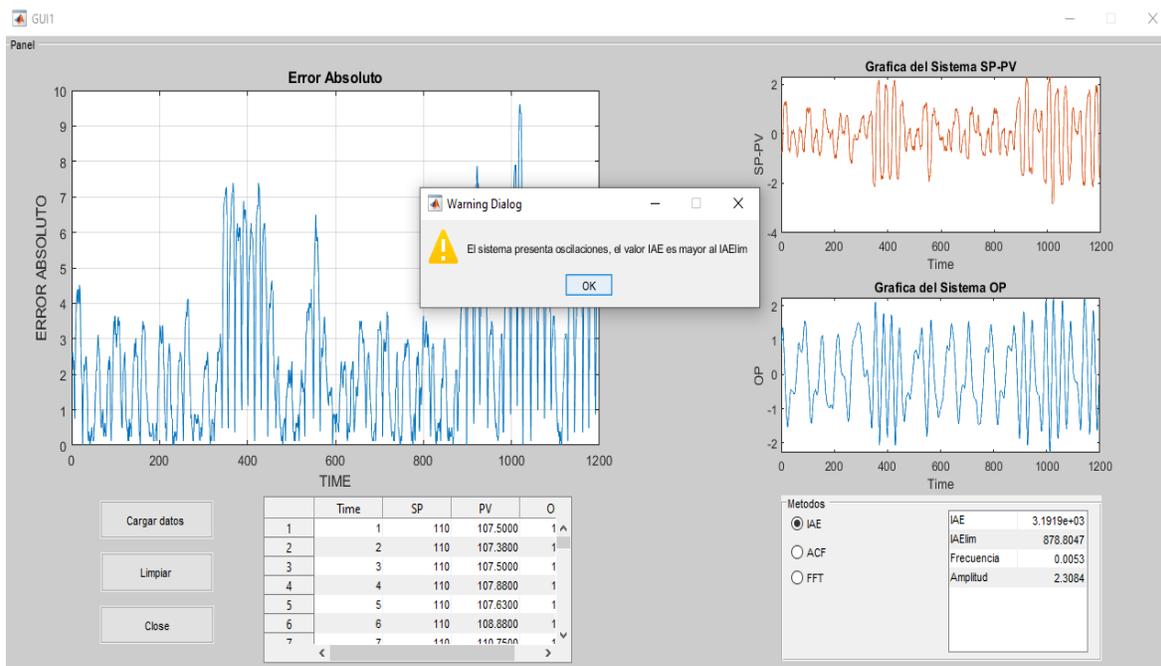


Figura 15. Diseño final para la detección de oscilaciones. (propia autoría).

En la figura 17 se puede observar el diseño del GUI para la detección de oscilaciones de esta manera podrá ver el comportamiento SP, PV y OP. Incluso se

puede observar la aplicación del método IAE, en donde indicamos la amplitud, frecuencia, valor IAE y valor de IAElim el cual será comparado con el IAE. Además, en la figura 18 se puede observar el método de detección de picos en el espectro de potencia.

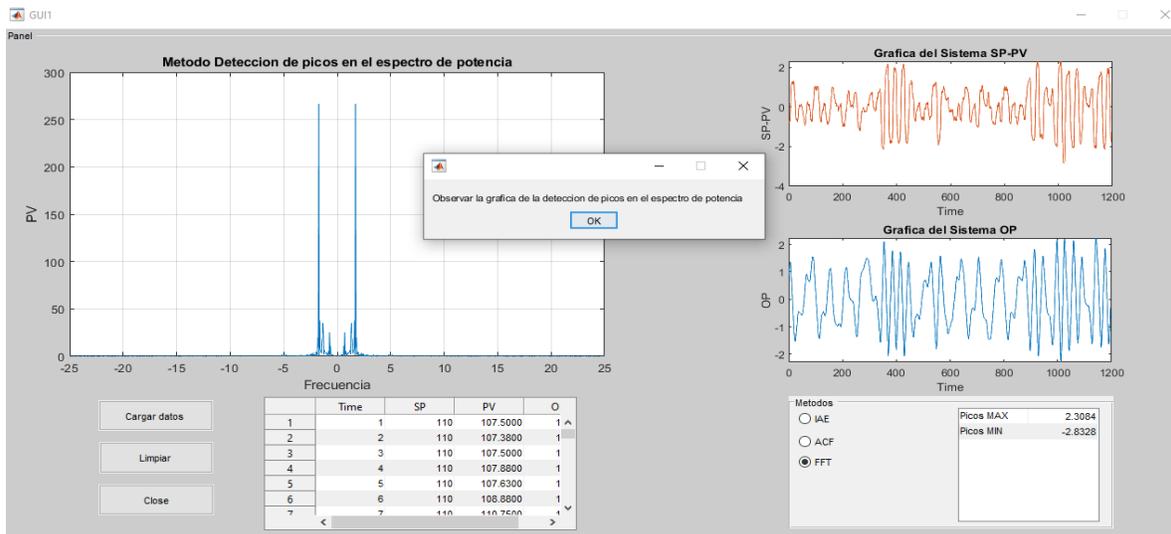


Figura 16. Método de detección de picos en el espectro de potencia. (propia autoría).

En la figura 19 el método aplicado es el ACF con respecto a los picos mínimo y máximo seleccionado por el usuario, determinara si el sistema presenta oscilaciones.

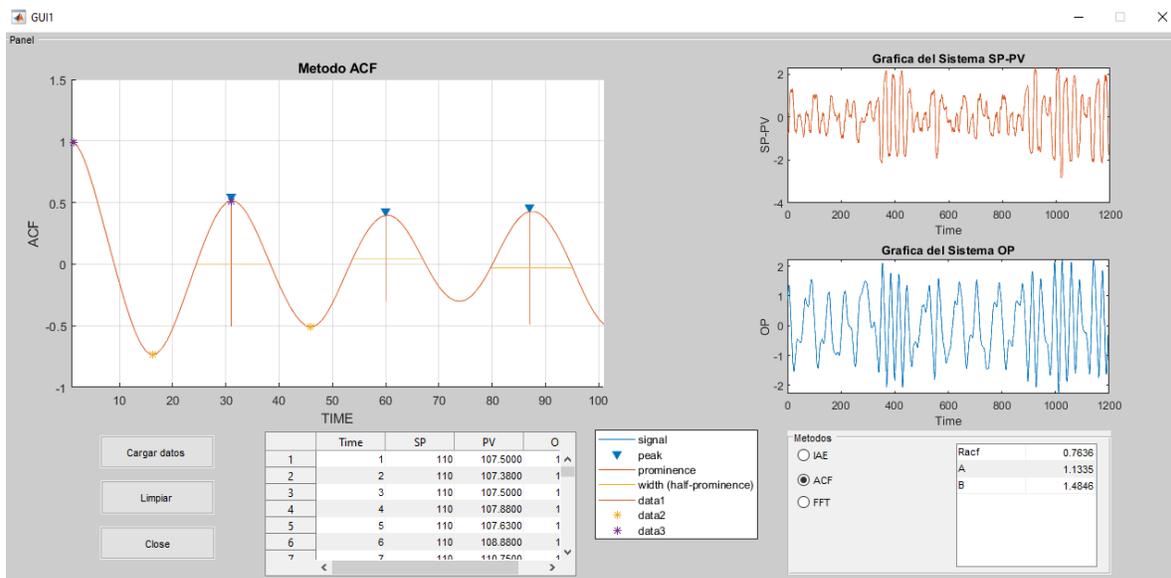


Figura 17. Método ACF. (propia autoría).

6.3. MATERIALES

MATLAB ®: Es un sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.

- **GUI DE MATLAB:** Las GUI (también conocidas como interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) permiten un control sencillo (con uso de ratón) de las aplicaciones de software, lo cual elimina la necesidad de aprender un lenguaje y escribir comandos a fin de ejecutar una aplicación.

COMPUTADORES (PC)

6.3.3. MUESTRA POBLACIONAL

Los datos que usamos para la prueba y realización de la herramienta computacional fueron obtenidos del repositorio web de parte de SACAC (the South African Council of Automation and Control). Los datos están repartidos en paquetes, en cada paquete se encuentra un documento Excel y se dividen en 4 columnas, a continuación, una muestra de un paquete de estos datos.

Tabla 12. Formas de suministros de datos.

Time	SP	PV	OP
1	110	107.5	13.85
2	110	107.38	13.95
3	110	107.5	14.04
4	110	107.88	14.11
5	110	107.63	14.2
6	110	108.88	14.22
7	110	110.75	14.17
8	110	112.13	14.07
9	110	113.13	13.94
10	110	113.75	13.79
11	110	114.13	13.64
12	110	114.25	13.48
13	110	114.38	13.32
14	110	114	13.18

Siendo; TIME el tiempo de muestreo, SP el set point, PV la variable de proceso, y OP la salida del controlador

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 13. Síntesis de datos para análisis.

FILE NAME	DATA LEGNTH	TYPE OF MEASURE- MENT	Descripción
stiction-F-paper-horch-2003	1196	Flujo	El lazo de flujo muestra la tensión en la válvula de control. El rango fotovoltaico es 0-400 y el rango de funcionamiento 0-100%.
stiction-L-chemicals-Thornhill-2003	8640	Nivel	El análisis en [1] mostró que el lazo de control de nivel LC2 tenía una válvula de adherencia que hizo que el lazo de control tuviera una oscilación de ciclo límite. La perturbación causada por este bucle de control (Tag 22) se propagó por toda la planta. Una segunda perturbación también está presente en la Columna 3 (Etiquetas 23-28 y Etiqueta 30) en forma de excursiones transitorias no periódicas. Entra con la inyección directa de vapor en la columna, y se propaga desde la parte inferior hasta la parte superior de la columna.
stiction-L-paper-horch-2003	1147	Nivel	Este lazo de nivel muestra la sticción de la válvula de control. El rango fotovoltaico es 0-100, el rango de funcionamiento 0-100%.
stiction-L-power-baccidicapaci-2018	8641	Nivel	Este es un ejemplo de sticción de válvula en una planta de energía.
stiction-P-chemical-baccidicapaci-2018	1000	Presión	Este es un ejemplo de sticción de la válvula en un bucle de control de presión. Los datos se normalizan a partir de un conjunto de datos más grande.
stiction-P-oilgas-baccidicapaci-2018	721	Presión	Este es un ejemplo de sticción de la válvula en un bucle de control de presión.
stiction-P-oilgas-DB-N-baccidicapaci-2018	721	Presión	Este es un ejemplo de sticción de la válvula en un bucle de control de presión (comportamiento constante entre las diferentes corridas).

6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A través de los estudios realizados se seleccionó el software más adecuado para el desarrollo de la herramienta computacional (anexos entregables 1 y 2). Con base al software seleccionado se realizó un análisis comparativo de los métodos existentes para la detección de oscilaciones en sistemas de control de lazo cerrado, para así determinar e integrar, tres métodos de detección de oscilaciones (Métodos basados en criterios de dominio de tiempo como la integral de error absoluto (IAE), Los métodos basados en la función de auto covarianza (ACF), Detección de picos espectrales (FFT)). Finalmente se verifico y valido la funcionalidad de la herramienta diseñada.

6.4.3. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL PROTOTIPO.

Para el análisis del prototipo se realizó un sistema estable, el cual nos permitiría determinar si los métodos se están ejecutando de la manera óptima. En la figura 20 se puede observar el comportamiento de la gráfica es lineal y presenta ningún pico excesivo. En cambio, en la figura 21 se puede observar los picos excesivos, determinado de esta manera que el sistema presenta perturbaciones o ruido.

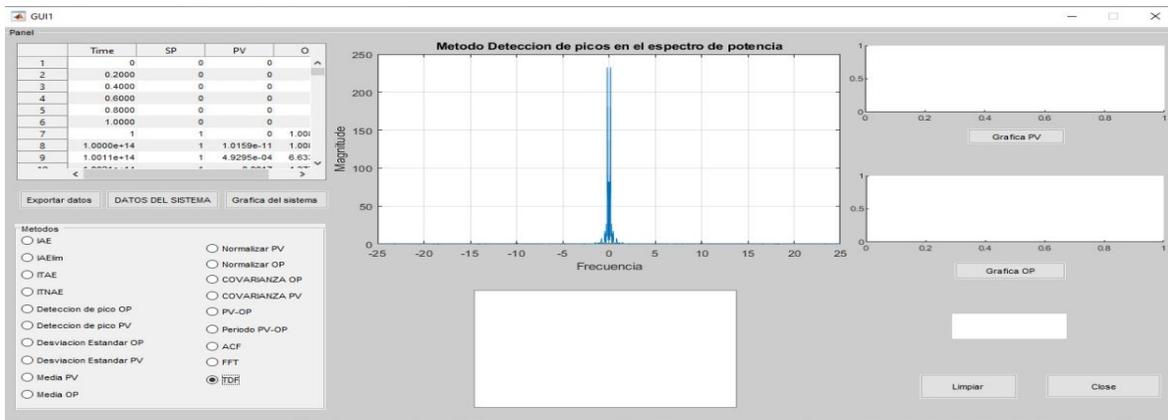


Figura 18. Sistema estable Método detección de picos. (propia autoría).

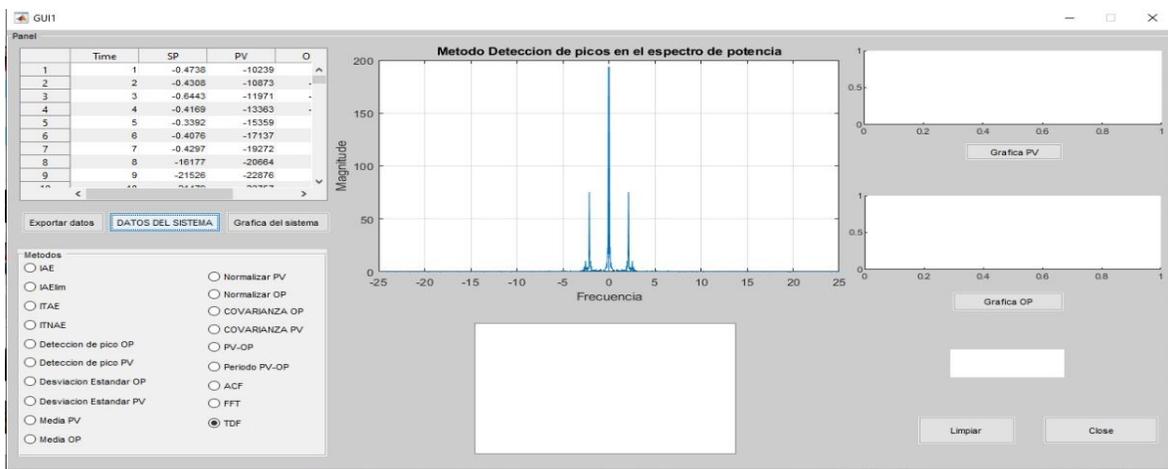


Figura 19. Sistema con perturbaciones Método detección de picos. (propia autoría).

En la figura 22 y 23 se puede detallar la aplicación del método ACF este busca los picos mínimos y máximo para poder determinar a y b. En la figura 22 se observa que el sistema presenta perturbaciones esto pasa debido a que el Rab es mayor al rango establecido que es de 0.5. En cambio, en la figura 23 el método ACF no se puede determinar, debido a que no cuenta con las características para poder realizar la determinación.

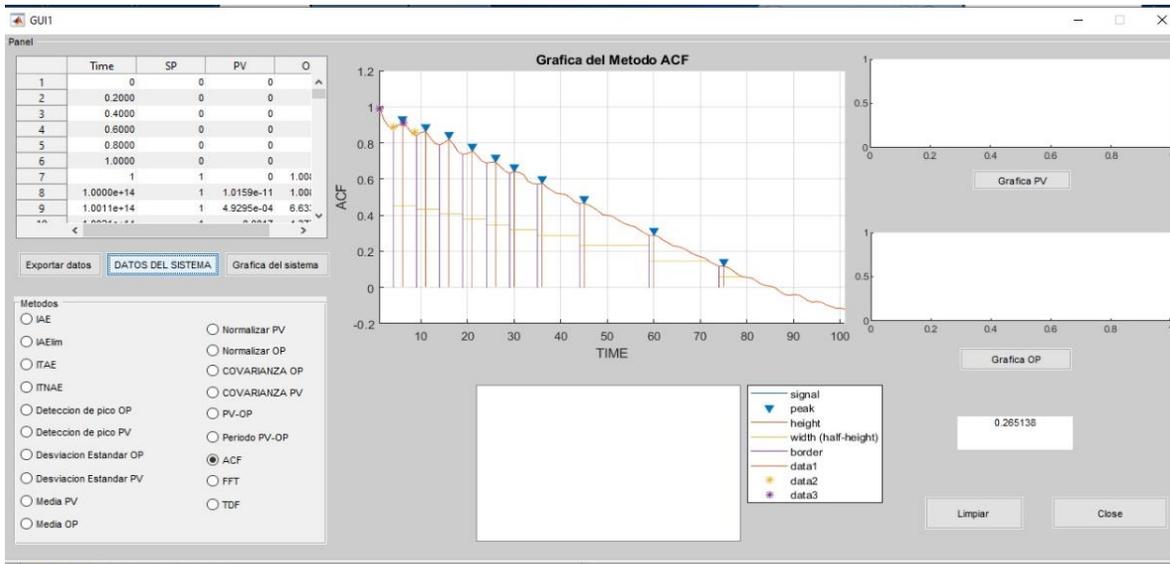


Figura 20. Sistema con perturbaciones Método ACF (propia autoría).

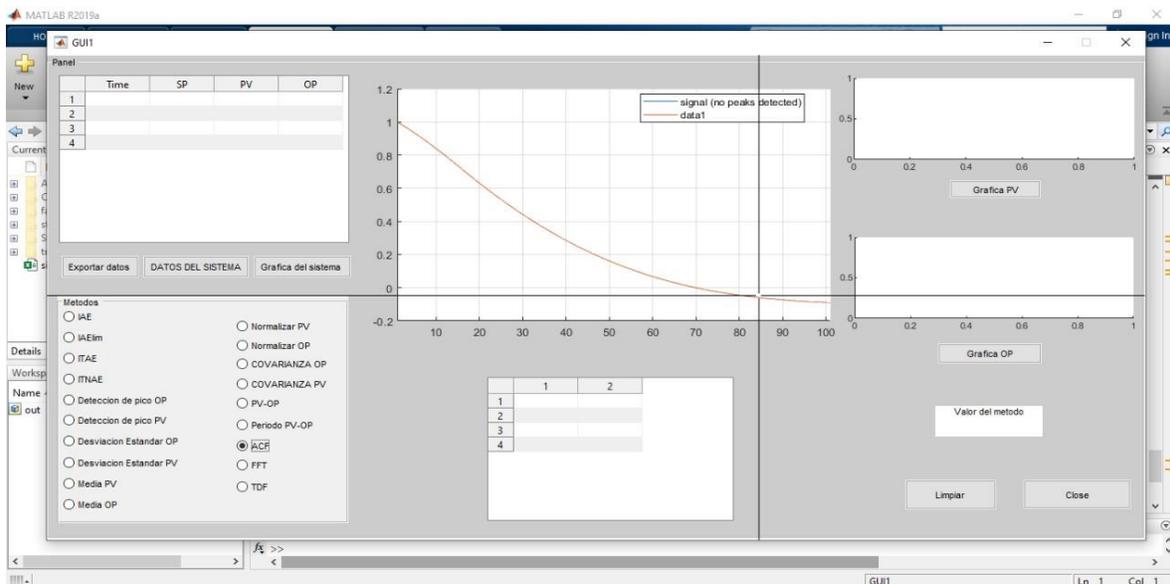


Figura 21. Sistema estable Método ACF (propia autoría).

La figura 24 y 25, se aplica el método de IAE y IAElim, el cual se compara uno con el otro si IAE es mayor al IAElim, entonces el sistema presenta oscilaciones y si el IAE es menor al IAElim, quiere decir que el sistema no presenta oscilaciones. Como puede observar en la figura 24 el IAE tiene un valor de 0.29 y en la figura 25 el IAElim presenta un valor de 419.6, esto nos permite determinar que el sistema no presenta oscilaciones.

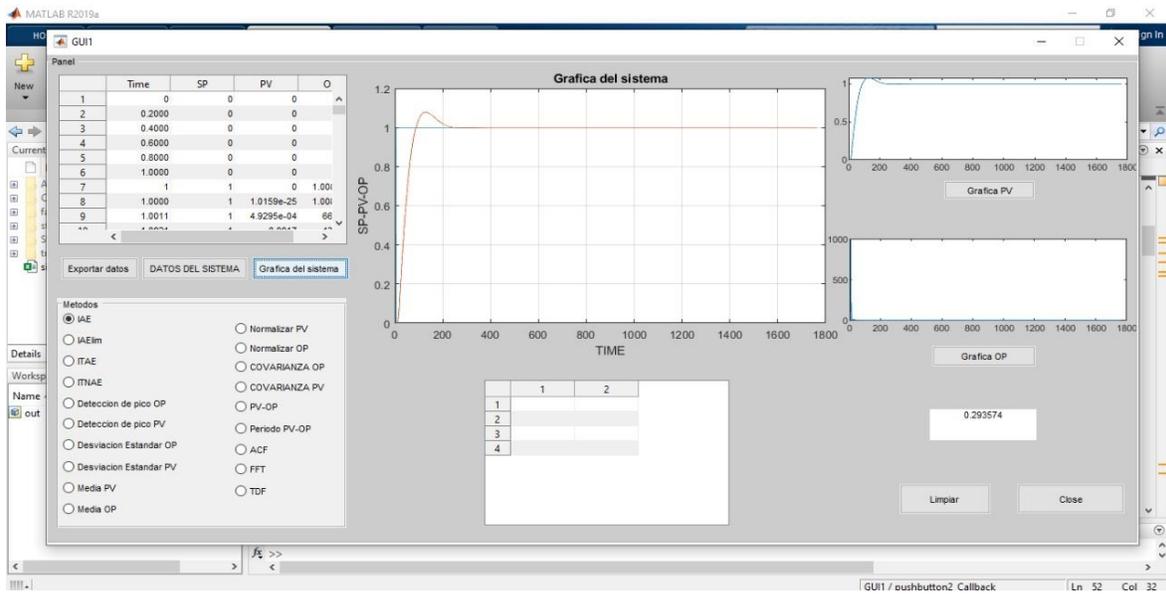


Figura 22. Sistema estable Método IAE (propia autoría).

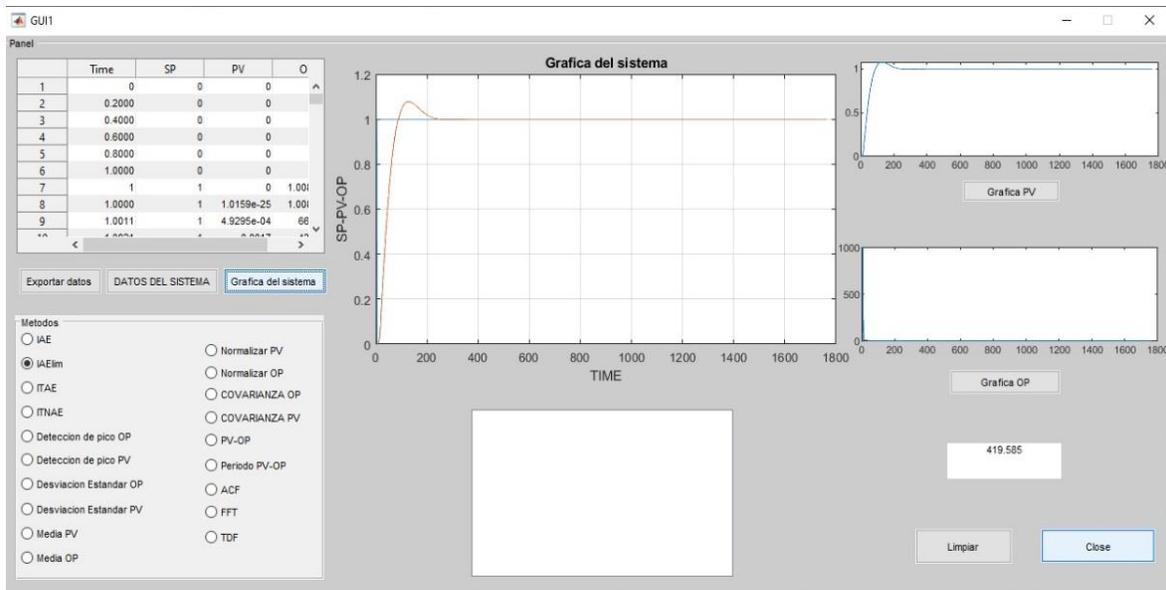


Figura 23. Sistema estable Método IAElim. (propia autoría).

6.4.4. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO FINAL

Descripcion del proceso examinado

Archivo: sensor-F-oilgas-thornhill-2007.csv

Tipo de medida: flujo

Industria: petróleo y gas

Longitud de datos: 1500

Frecuencia de muestreo: 20 segundos

Empresa: Anónimo

Normalizado: si

Colaborador: Nina F. Thornhill, Imperial College London

Año de origen: 2007

Descripción: Se sabe que hubo un sensor de vapor defectuoso en el circuito de flujo de vapor FC1. Era un medidor de flujo de placa de orificio, pero no había ningún orificio de drenaje en la placa que tuviera el efecto de que el condensado se acumulara en el lado aguas arriba hasta que alcanzara un nivel crítico, y el líquido acumulado se despejaría periódicamente por sifón a través del orificio. El desafío para el análisis de esta unidad es verificar que el circuito de flujo de vapor defectuoso sea la causa principal de la perturbación.

Teniendo en cuenta la descripción del sistema se busca comprobar el comportamiento del proceso para así determinar si presenta oscilaciones. Como se puede observar en la figura 26 basado en el método IAE y el IAElim se hace una comparación estableciendo que el proceso presenta oscilaciones debido a que el IAE sobre pasa al IAElim.

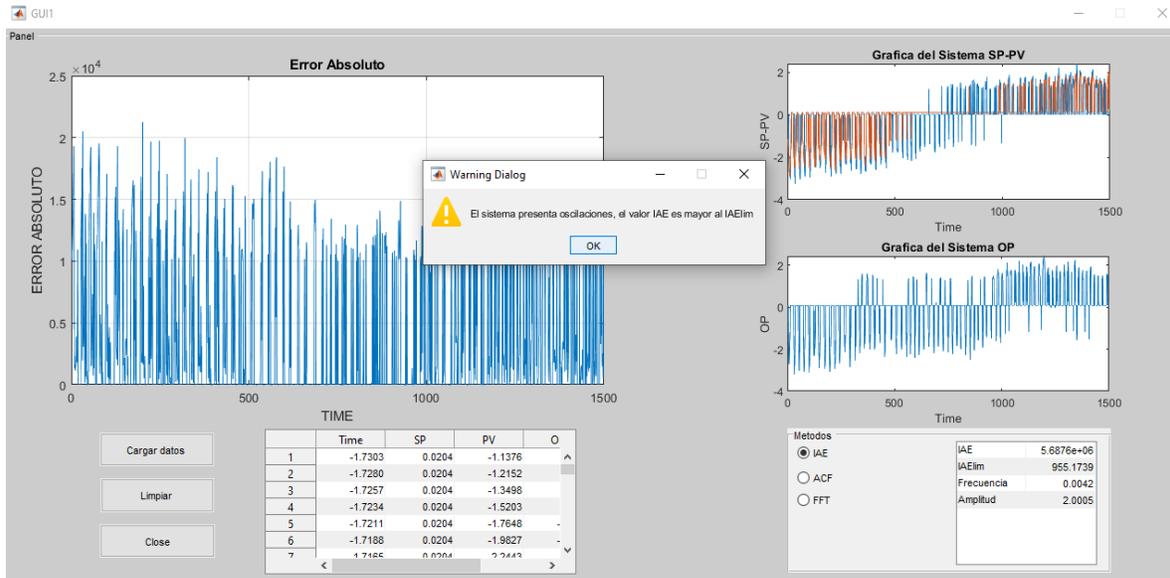


Figura 24. Detección de oscilaciones en planta con el método IAE (propia autoría).

Por otra parte en la figura 27 basado en el método de ACF se determino que el sistema presenta oscilaciones, debido a que el Racf es mayor al rango limite que es de 0.5.

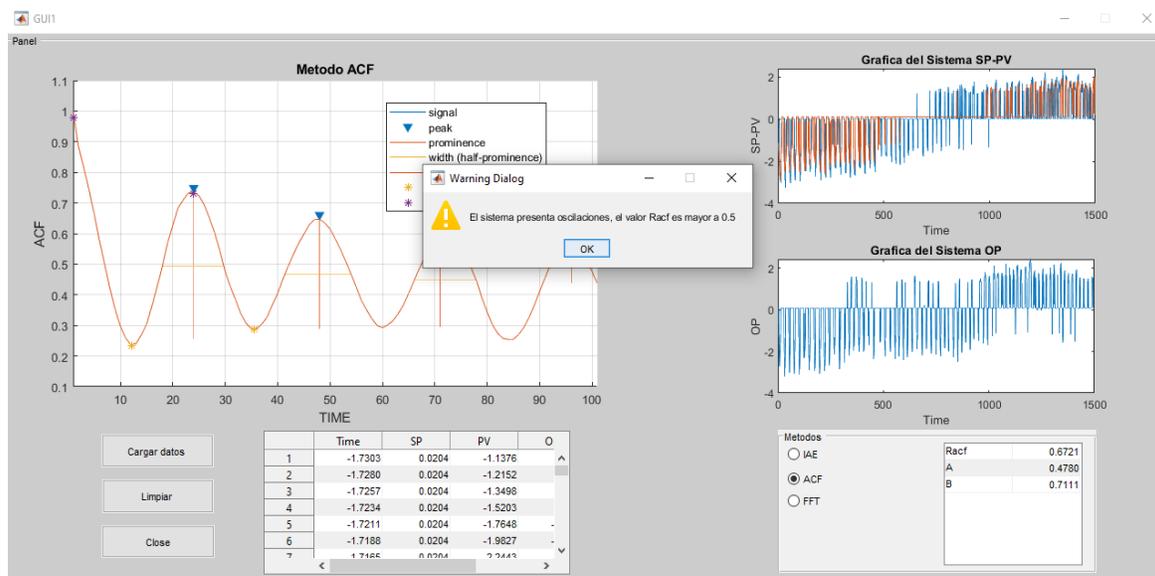


Figura 25. Detección de oscilaciones en planta con el método ACF (propia autoría).

En la figura 28 se empleó el método de detección de picos en el espectro de potencia, este método se determina visual mente. De esta manera determina que el sistema presenta un pico espectral distinto debido a la oscilación, que se puede

clasificar como una perturbación. A comparación de la figura 29 se observa basado al método de detección de picos que el sistema es estable.

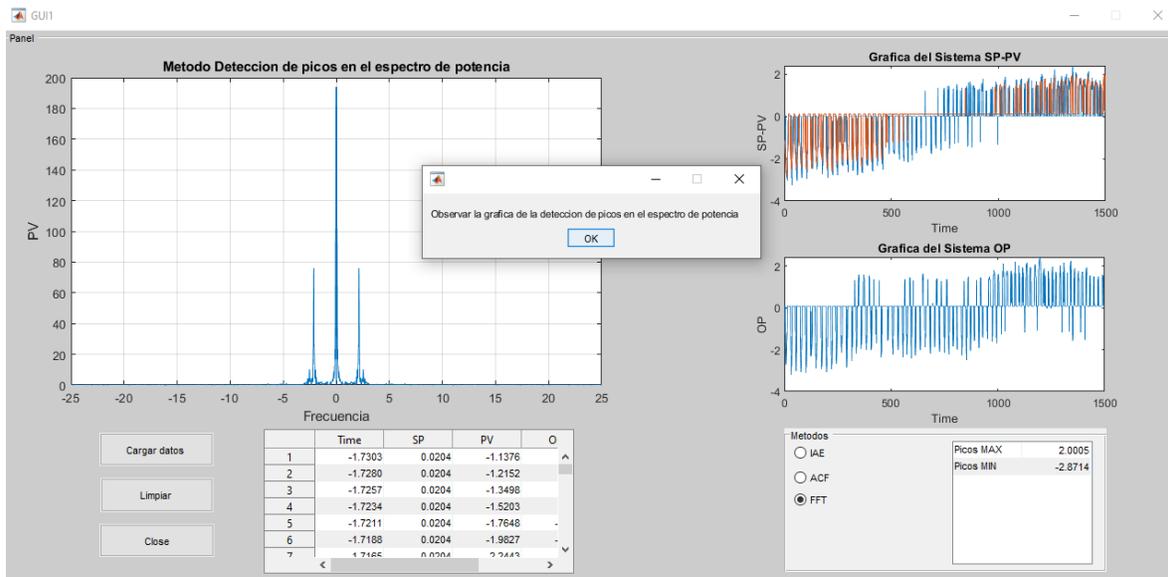


Figura 26. Detección de oscilaciones en planta con el método detección de picos en el espectro de potencia sistema con perturbación (propia autoría).

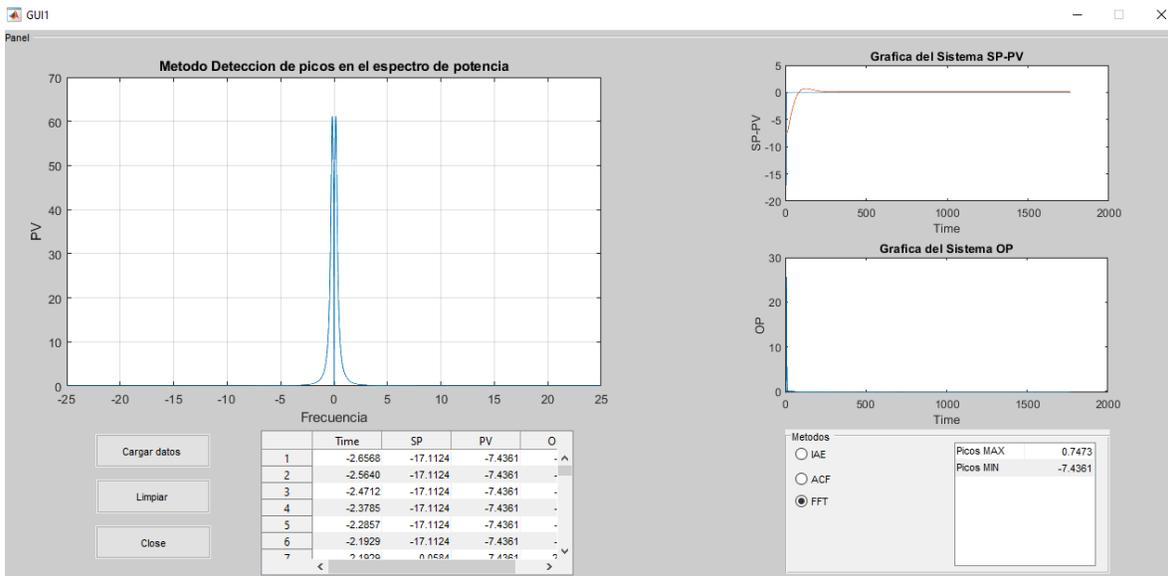


Figura 27. Detección de oscilaciones en planta con el método detección de picos en el espectro de potencia de un sistema estable (propia autoría).

6.5. MANUAL DE USUARIO

El presente documento pretende mostrar al usuario el funcionamiento del aplicativo, desarrollada en el GUI. Para ingresar a la interfaz se requiere disponer del software de MATLAB®, de lo contrario se debe descargar RUNTIME®, al cual accederemos al uso de la herramienta computacional para la detección de oscilaciones en sistemas de control de lazo cerrado, utilizando los métodos integrales de error absoluto (IAE), Los métodos basados en la función de auto covarianza (ACF) y método de detección de pico en el espectro de potencia (FFT).

Para todos los métodos la herramienta representa gráficamente el comportamiento de OP, PV y la del sistema en función de los datos suministrados. En el método IAE, se dispone de información importante datos numéricos tales como: IAElim, el IAE, la amplitud y frecuencia de la onda. En donde describe que si el valor de IAE es mayor al valor de IAElim el sistema presenta oscilaciones, enviando un mensaje de advertencia al usuario la presencia de esta, de lo contrario enviara un mensaje donde menciona que el sistema no presenta problemas con oscilaciones en sus lazos de control.

Para el método ACF debemos seleccionar los dos primeros picos más bajos de las ondas del sistema y la selección de los puntos de los picos más altos, Con el fin de identificar el punto A y el punto B de los datos de la gráfica, para así identificar si los lazos de control presentan oscilaciones.

Finalmente, para el método de detección de pico en el espectro de potencia (FFT), se presentará un cuadro de dialogo automático, donde el usuario debe identificar visualmente la presencia de oscilaciones en el sistema. Además, podremos observar los picos máximos y mínimo del sistema. Para esto se creó un manual completo para el manejo del dispositivo, con recomendaciones específicas para un buen uso de este, la cual podemos encontrar en los ANEXOS.

CONCLUSIONES

La herramienta computacional es versátil, completa y fácil de utilizar. Tiene como funcionalidad la detección y diagnóstico de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado, la cual podemos concluir a partir de los resultados de cada método lo siguiente:

- El método integral de error absoluto (IAE) desarrollado en el GUI® es uno de los métodos más preciso, ya que calcula el IAE entre los cruces de cero del error de control, analizando así la carga de la perturbación. En donde el error de control es una onda sinusoidal pura con la amplitud A y la frecuencia ω , y que esta señal debe detectarse como una secuencia de perturbaciones de carga, la cual es visualizada en el panel de información del método. Esto significa que la integral de cada medio período de la oscilación debe ser mayor que IAE_{lim} , para que el sistema presente oscilaciones, de lo contrario se puede decir que el sistema no presenta oscilaciones que alteren procesos.
- En el método basados en la función de auto covarianza (ACF) se puede concluir que presenta una gran ventaja, ya que el impacto del ruido se reduce, por lo que el ruido blanco que presenta el ACF en teoría es cero, por los patrones de cruce de cero del ACF, puede diagnosticar la presencia de oscilaciones más claramente, para esto debemos ser preciso en la selección de los picos máximos y mínimo de las ondas del sistemas, puesto que al obtener una buena selección de ellos, conduce un buen resultado en la detección de dichas perturbaciones.
- El método de detección de pico en el espectro de potencia (FFT), es el más sencillo de los tres, puesto que tiene como fundamento la buena observación de las ondas del sistema, ya que, al comprar los polos de la gráfica, podemos describir la presencia de oscilaciones, si el comportamiento es simétrico “NO” presenta perturbaciones, de lo contrario el sistema presenta oscilaciones.

Para este método la persona que manipula la herramienta debe tener conocimientos previos de la literatura del método.

Los resultados obtenidos con los métodos fueron validados con la herramienta de desarrollo Simulink, que es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación MATLAB®, validando así teórica y práctica. En donde se simuló un sistema estable en el entorno, para luego comprar y verificar que los valores obtenidos en el GUI sean precisos y exactos. Además, se garantizó que NO fueran invasivas para no alterar procesos, la herramienta describe el rendimiento del controlador.

Finalmente, la herramienta puede utilizarse en diferentes procesos que contengan sistemas de control de lazo cerrado, por su versatilidad y sencillez de utilizar. Además, la adquisición de datos se puede generar en estados transitorios y al finalizar el proceso. La respuesta de la herramienta a procesos reales o teóricos tiene la misma fluidez a la hora de detectar y diagnosticar oscilaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. Thornhill, B. Huang B and H. Zhang, "Detection of multiple oscillations in control loops", Core.ac.uk, 2003. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/76991139.pdf>. [Accessed: 31- Aug- 2019].
- [2] E. Naghoos, "Oscillation Detection and Causality Analysis of Control Systems", Era.library.ualberta.ca, 2016. [Online]. Available: https://era.library.ualberta.ca/items/57ba6990-7ddc-4b58-8555-b9ea5ec4b79d/view/b06afee3-316c-48e6-b8b6-f08c3d7a9ae4/Naghoosi_Elham_201607_PhD.pdf. [Accessed: 31- Aug- 2019].
- [3] "ONLINE OSCILLATION DETECTION AND ADAPTIVE CONTROL IN CHEMICAL PLANTS", Picontrol Solutions.com. [Online]. Available: <http://picontrolsolutions.com/wp-content/uploads/2015/11/Online-Oscillation-Detection.pdf>. [Accessed: 31- Aug- 2019].
- [4] M. Jones, "Closed Loop Control Performance Monitoring", Repository.up.ac.za, 2006. [Online]. Available: <https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/23934/00dissertation.pdf?sequence=1>. [Accessed: 31- Aug- 2019].
- [5] V. Kariwala, M. Shoukat Choudhury, S. Shah, J. Fraser Forbes and E. Meadows, "Detection and Diagnosis of Plant-wide Oscillations: An application study", Citeseerx.ist.psu.edu. [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.59.3004&rep=rep1&type=pdf>. [Accessed: 31- Aug- 2019].
- [6]. Thornhill, NF y Hägglund, T. (1997). Detección y diagnóstico de oscilación en bucles de control. Control Engineering Practice, 5(10), 1343-1354.
- [7]. Miao, T. y Seborg, DE (1999, agosto). Detección automática de lazos de control de retroalimentación excesivamente oscilatorios. En Actas de la Conferencia Internacional IEEE 1999 sobre Aplicaciones de Control (Cat. No. 99CH36328) (Vol. 1, pp. 359-364). IEEE
- [8]. Hägglund, T. (1995). Un monitor de rendimiento de bucle de control. Control Engineering Practice , 3 (11), 1543-1551.

- [9]. hägglund, T. (1999). Detección automática de bucles de control lento. *Control Engineering Practice*, 7 (12), 1505-1511.
- [10]. Thornhill, NF y Horch, A. (2007). Avances y nuevas direcciones en la detección y diagnóstico de perturbaciones en toda la planta. *Control Engineering Practice*, 15 (10), 1196-1206.
- [11] L. Desborough and R. Miller, "Increasing Customer Value of Industrial Control Performance Monitoring — Honeywell' s Experience Outline of the Paper Current Control Performance (Measurements)," no. Figure 1, pp. 172–192, 2000.
- [12] X. Gao, F. Yang, C. Shang, and D. Huang, "Chinese Journal of Chemical Engineering A review of control loop monitoring and diagnosis : Prospects of controller maintenance in big data era ☆," *CJCHE*, vol. 24, no. 8, pp. 952–962, 2016.
- [13] R. S. Patwardhan and M. Ruel, "Best Practices for Monitoring your PID Loops – The Key to Optimizing Control Assets," 2008.
- [14] B. D. B. Ender, "Process Control Performance: Not as Good as you Think," *Control Eng.*, vol. 40, no. September, pp. 180–190, 1993.
- [15] W. L. Bialkowski, "Dreams vs reality: a view from both side of the gap," in *Control Systems' 92*, 1992.
- [16] A. J. Hugo, "Process controller performance Monitoring and Assessment," *Hydrocarb. Process.*, vol. 80, no. 4, pp. 85–90, 2001.
- [17] A. A. S. Choudhury, S. L. Shah, and N. F. Thornhill, *Diagnosis of Process Nonlinearities and Valve Stiction: Data Driven Approaches*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [18] T. Hägglund, "A control-loop performance monitor," *Control Eng. Pract.*, vol. 3, no. 11, pp. 1543–1551, 1995
- [19] Metso, "Significant annual savings expected with PlantTriage software system," JAN 18, 2017, 2017. [Online]. Available: <https://www.metso.com/showroom/pulp-andpaper/significant-annual-savings-expected-with-planttrriage-software-system/>. [Accessed: 20-Jul-2007].
- [20] M. Jelali, "An overview of control performance assessment technology and industrial applications," *Control Eng. Pract.*, vol. 14, no. 5, pp. 441–466, 2006.

- [21] Vélez, C. (2012). Modelado, Simulación y control de sistemas con muestreo no convencional. *Revista Universidad EAFIT*, 38(125), 9-20. Recuperado a partir de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revistauniversidadeafit/article/view/952>.
- [22]. Bauer, M., Horch, A., Xie, L., Jelali, M. y Thornhill, N. (2016). El estado actual de la supervisión del rendimiento del bucle de control: una encuesta de aplicación en la industria. *Journal of Process Control*, 38 , 1-10.
- [23]. Botelho, V., Trierweiler, JO, Farenzena, M. y Duraiski, R. (2015). Metodología para detectar desajustes modelo-planta que afectan el rendimiento del control predictivo del modelo. *Investigación de Química Industrial e Ingeniería*, 54 (48), 12072-12085.
- [24]. Spinner, T., Srinivasan, B. y Rengaswamy, R. (2014). Diagnóstico automatizado basado en datos y ajuste iterativo de controladores proporcionales-integrales (PID). *Práctica de ingeniería de control*, 29, 23-41.
- [25] Domański, PD (2016). Medidas no gaussianas y de persistencia para la evaluación de la calidad del bucle de control. *Caos: una revista interdisciplinaria de ciencia no lineal*, 26 (4), 043105.
- [26] Yan, Z., Chan, CL y Yao, Y. (2015). Evaluación de rendimiento de control multivariante y monitoreo del sistema de control mediante prueba de hipótesis en matrices de covarianza de salida. *Investigación de Química Industrial e Ingeniería*, 54 (19), 5261-5272.
- [27]. Botelho, V., Trierweiler, JO y Farenzena, M. (2016). Diagnóstico de bajo rendimiento en controladores predictivos modelo: perturbación no medida versus desajuste modelo-planta. *Investigación de Química Industrial e Ingeniería*, 55 (44), 11566-11582.
- [28]. Borrero Salazar, A. A. (2019). Diseño de una estrategia de reducción de variabilidad en procesos con controladores tipo PID frente a perturbaciones oscilatorias (Master's thesis, Universidad del Norte).
- [29]. Thornhill, NF, Shah, SL y Huang, B. (2000). Evaluación del rendimiento del controlador en el seguimiento del punto de ajuste y el control regulatorio. *Volúmenes de procedimientos de IFAC*, 33 (10), 183-188.

- [30]M. Jelali, Control Performance Management in Industrial Automation. London: Springer, 2013.
- [31]Ramirez, J. (2014). SISTEMAS DE CONTROL Enfoque de Proyecto. Santiago de Cali.
- [32]Mazzone, V. (2019). Controladores PID. Quilmes Argentina: Universidad Nacional de Quilmes.
- [33]Bibdigital.epn.edu.ec.(n.d.).[online]Availableat:<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2538/1/CD-0375.pdf> [Accessed 25 Sep. 2019].
- [34]Zapateria, O. (2019). OSCILOSCOPIO MEDIDAS DE ONDAS. [online] Centrozaragoza.com. Available At: http://www.centrozaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R21_A6.pdf [Accessed 25 Sep. 2019].
- [35] Rodríguez, C. (n.d.). Sistemas de control: Elementos componentes, variables, función de transferencia y diagrama funcional. [ebook] Departamento de Tecnología. Available at: http://iespoetaclaudio.centros.educa.jcyl.es/sitio/upload/Sistemas_de_control.pdf [Accessed 29 Sep. 2019].
- [36]Valacco, L. (2013). Teorema de Nyquist en el estudio de la estabilidad del Sistema de Control. [online] Lcr.uns.edu.ar. Available at: <http://lcr.uns.edu.ar/fvc/NotasDeAplicacion/FVC-Lionel%20Valacco.pdf> [Accessed 29 Sep. 2019].
- [37] Ryook Yang, D. (2019). CHBE320 LECTURE X STABILITY OF CLOSED-LOOP CONTROL SYSTEMS. [online] Cheric.org. Available at: <https://www.cheric.org/education/lecture/process/CHBE306/L10-Stabilitybw.pdf> [Accessed 29 Sep. 2019].
- [38] Navarro, R., Castro, E. O. B., Aguilar, J. A., Tumax, H. J. P. P., Chávez, J. D. N., Ramírez, E. R., ... & Castillo, C. (2004). Ingeniería de Control. McGraw Hill.
- [39] Kuo, B. C. (1996). Sistemas de control automático. Pearson Educación.
- [40] Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna. Pearson Educación.
- [41] M. Ruel, "Learn how to assess and improve control loop performance," Tech. Pap., vol. 423, pp. 351–356, 2002.

- [42] L. Desborough, R. Miller, and P. Nordh, "Regulatory control survey," Unpubl. Manuscript, Honeywell, vol. 88, 2000.
- [43] M. Bauer, A. Horch, L. Xie, M. Jelali, and N. Thornhill, "The current state of control loop performance monitoring - A survey of application in industry," *J. Process Control*, vol. 38, pp. 1–10, 2016.
- [44] P.-G. Eriksson and A. J. Isaksson, "Some aspects of control loop performance monitoring," *Control Appl. 1994., Proc. Third IEEE Conf.*, no. 2, pp. 1029–1034 vol.2, 1994.
- [45] B. S. Ko and T. F. Edgar, "Assessment of achievable pi control performance for linear processes with dead time," *Proc. Am. Control Conf.*, vol. 3, no. June, pp. 1548–1552, 1998.
- [46] B. S. Ko and T. F. Edgar, "PID control performance assessment: The single-loop case," *AIChE J.*, vol. 50, no. 6, pp. 1211–1218, 2004.
- [47] M. J. Grimbale, "Restricted Structure Control Loop Performance Assessment for Pid Controllers and State-Space Systems," *Asian J. Control.*, vol. 5, no. 1, p. 39–57., 2003.
- [48] Z. Yu, J. Wang, B. Huang, and Z. Bi, Performance assessment of PID control loops.
- [49] S. J. Qin, "Control performance monitoring - A review and assessment," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 23, no. 2, pp. 173–186, 1998.
- [50] J. P. Shunta, *Achieving World Class Manufacturing Through Process Control*, 1st ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1997.
- [51] N. F. Thornhill, B. Huang, and H. Zhang, "Detection of multiple oscillations in control loops," *J. Process Control*, vol. 13, no. 1, pp. 91–100, 2003.
- [52] A. Horch, "Condition Monitoring of Control Loops." 2000.
- [53] N. F. Thornhill, J. W. Cox, and M. A. Paulonis, "Diagnosis of plant-wide oscillation through data-driven analysis and process understanding," *Control Eng. Pract.*, vol. 11, no. 12, pp. 1481–1490, Dec. 2003.
- [54] N. F. Thornhill, S. L. Shah, and B. Huang, "Controller Performance Assessment in Set Point Tracking and Regulatory Control," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 33, no. 10, pp. 183–188, 2000.

- [55] A. Horch, "Condition Monitoring of Control Loops." 2000.
- [56] M. Torres, "Diseño de un método híbrido de detección de fallas y reconocimiento de patrones para procesos industriales," Tesis de Maestría, Universidad del Norte, 2012.
- [57] N. F. Thornhill and T. Hägglund, "Detection and diagnosis of oscillation in control loops," *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 10, pp. 1343–1354, 1997.
- [58] K. Forsman and A. Stattin, "A new criterion for detecting oscillations in control loops," *Control Conf. (ECC)*, 1999 Eur., pp. 2313–2316, 1999.
- [59] R. Rengaswamy, T. Hägglund, and V. Venkatasubramanian, "A qualitative shape analysis formalism for monitoring control loop performance," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 14, no. 1, pp. 23–33, 2001.
- [60] D. E. (). Miao, T., & Seborg, "Automatic detection of excessively oscillatory feedback control loops," *IEEE Conf. Control Appl.*, p. 359–364., 1999.
- [61] C. Xia and J. Howell, "Loop status monitoring and fault localisation," *J. Process Control*, vol. 13, no. 7, pp. 679–691, 2003.
- [62] L. Ettaleb, M. S. Davies, G. A. Dumont, and E. Kwok, "Monitoring oscillations in a multiloop system," *Proc. 1996 IEEE Int. Conf. on. IEEE*, 1996., no. 604, pp. 859–863, 1996.
- [63] O. Taha, G. A. Dumont, and M. S. Davies, "DETECTION AND DIAGNOSIS OF OSCILLATIONS IN CONTROL LOOPS," *Proc. 35th Conf. Decis. Control*, no. December, pp. 2432–2437, 1996.
- [64] N. F. Thornhill and T. Hägglund, "Detection and diagnosis of oscillation in control loops," *Control Eng. Pract.*, vol. 5, no. 10, pp. 1343–1354, 1997.
- [65] A. Horch, "A simple method for detection of stiction in control valves," *Control Eng. Pract.*, vol. 7, no. 10, pp. 1221–1231, 1999.
- [66] C. Xia and J. Howell, "Controller Output Based, Single Number Statistics for Loop Status Monitoring," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 34, no. 27, pp. 111–116, 2001.
- [67] C. Xia and J. Howell, "Loop Status Statistics," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 34, no. 27, pp. 321–325, 2001.
- [68] N. F. Thornhill, S. L. Shah, and B. Huang, "Detection of distributed oscillations and root-cause diagnosis," *Proc. CHEMFAS 4*, no. 1997, pp. 167–172, 2001.

- [69] C. PRYOR, "Autocovariance and Power Spectrum Analysis Derive New Information from Process Data.," *Control Eng*, vol. V 29, no. N 11, pp. 103–106, 1982.
- [70] T. J. Harris, C. T. Seppala, P. J. Jofriet, and B. W. Surgenor, "Plant-wide feedback control performance assessment using an expert-system framework," *Control Eng. Pract.*, vol. 4, no. 9, pp. 1297–1303, 1996.
- [71] M. Sanjuan, A. Kandel, and C. A. Smith, "Design and implementation of a fuzzy supervisor for on-line compensation of nonlinearities: An instability avoidance.
- [72] B. Huang, S. L. Shah, and H. Fujii, "The unitary interactor matrix and its estimation using closed-loop data," *J. Process Control*, vol. 7, no. 3, pp. 195–207, 1997.
- [73] W. H. Press, *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, no. bk. 4. Cambridge University Press, 1992.
- [74] G. Strang and T. Nguyen, *Wavelets and Filter Banks*. Wellesley-Cambridge Press, 1996.
- [75] "DECRETO NUMERO 2331 DE 2007", [Www2.igac.gov.co](http://www2.igac.gov.co), 2007. [Online]. Available:http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/DECRETO23312007.pdf. [Accessed: 05- Oct- 2019].
- [76] SUMISETSU PHILIPPINES, INC. BECOMES THE FIRST ORGANIZATION TO BE ISO 9001:2015 CERTIFIED IN THE PHILIPPINES.
- [77] J. Gallego and L. Gutiérrez, "El Sistema Nacional de Calidad en Colombia", 2016.
- [78]E. Asesora, "Ley 143 de 1994 - Gestor Normativo Función Pública", Funcionpublica.gov.co, 1994. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4631>. [Accessed: 05- Oct- 2019].
- [79]E. Asesora, "Ley 697 de 2001 - Gestor Normativo Función Pública", Funcionpublica.gov.co, 2001. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4449>. [Accessed: 05- Oct- 2019].

- [80]E. Asesora, "Decreto 3683 de 2003 - Gestor Normativo Función Pública", Funcionpublica.gov.co, 2003. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=11032>. [Accessed: 05- Oct- 2019].
- [81] "ISO 9001 - Software ISO 9001 de Sistemas de Gestión ISO", Software ISO. [Online]. Available: <https://www.isotools.org/normas/calidad/iso-9001>. [Accessed: 05- Oct- 2019].
- [82]"Leyes desde 1992 - Vigencia expresa y control de constitucionalidad [LEY_0603_2000]", Secretariassenado.gov.co, 2000. [Online]. Available: http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0603_2000.html. [Accessed: 07- Oct- 2019].
- [83]"Home Page | www.scilab.org", Scilab.org. [Online]. Available: <https://www.scilab.org>. [Accessed: 07- Oct- 2019].
- [84]"Robotics System Toolbox", La.mathworks.com. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/robotics.html>. [Accessed: 07- Oct- 2019].
- [85]"GNU Octave", Gnu.org. [Online]. Available: <https://www.gnu.org/software/octave/>. [Accessed: 07- Oct- 2019].

ANEXOS

Matriz de riesgo

A continuación, se describirán el posible riesgo, que se pueden presentar en el desarrollo de la herramienta computacional, para esto se graficó las probabilidades que suceso ocurra, la gravedad, valor del riesgo y el nivel de este. Posteriormente se graficó, como se puede observar:

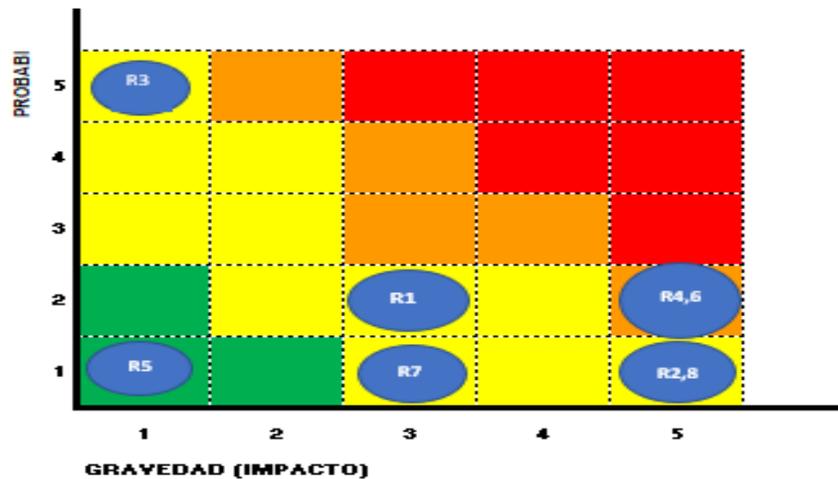
MATRIZ DE RIESGOS

RIESGO		Probabilidad (Ocurrencia)	Gravedad (Impacto)	Valor del Riesgo	Nivel de Riesgo
R 1	Determinar el uso del tiempo real suministrado o tiempo promedio de muestreo.	2	3	6	Apreciable
R 2	Error en la identificación de los métodos utilizados.	1	5	5	Apreciable
R 3	Identificar si es necesario la utilización de software libre o software con licencia.	5	1	5	Apreciable
R 4	Error en la integración de los tres métodos de detección de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado para la determinación de oscilaciones.	2	5	10	Importante
R 5	Verificar que la herramienta no sea invasiva, para no alterar procesos.	1	1	1	Marginal
R 6	Error en la Programación e integración de los métodos de detección y diagnóstico de oscilaciones en los lazos cerrados de control.	2	5	10	Importante
R 7	Falla en la verificación y validación de la programación a través de diferentes dispositivos la programación, integración de conceptos, métodos y funcionalidad de la herramienta computacional.	1	3	3	Apreciable
R 8	Incumplimiento de los cronogramas de actividades bajo tiempos establecidos.	1	5	5	Apreciable

LEYENDA

		GRAVEDAD (IMPACTO)				
		MUY BAJO 1	BAJO 2	MEDIO 3	ALTO 4	MUY ALTO 5
PROBABILIDAD	MUY ALTA 5	5	10	15	20	25
	ALTA 4	4	8	12	16	20
	MEDIA 3	3	6	9	12	15
	BAJA 2	2	4	6	8	12
	MUY BAJA 1	1	2	3	4	5

	Riesgo muy grave. Requiere medidas preventivas urgentes. No se debe iniciar el proyecto sin la aplicación de medidas preventivas urgentes y sin acotar sólidamente el riesgo.
	Riesgo importante. Medidas preventivas obligatorias. Se deben controlar fuertemente las variables de riesgo durante el
	Riesgo apreciable. Estudiar económicamente si es posible introducir medidas preventivas para reducir el nivel de riesgo. Si no fuera posible, mantener las variables controladas.
	Riesgo marginal. Se vigilará, aunque no requiere medidas preventivas de partida.



Bajo estas condiciones se planeó construir una serie de soluciones para cada uno de los riesgos que pueden alterar el proceso de desarrollo de la herramienta computacional como se pueden observar en la siguiente tabla:

RIESGOS		SOLUCION DE RIESGOS
R1	Determinar el uso del tiempo real suministrado o tiempo promedio de muestreo.	Promediamos el tiempo de muestreo frente a los procesos.
R2	Error en la identificación de los métodos utilizados.	Buena selección de métodos óptimos bajo requerimientos.
R3	Identificar si es necesario la utilización de software libre o software con licencia.	Bajo estándares describimos la utilización de software libre y de bajo costo.
R4	Error en la integración de los tres métodos de detección de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado para la determinación de oscilaciones.	Utilizamos una interfaz de Matlab para disponer de los tres métodos para la detección de oscilaciones.
R5	Verificar que la herramienta no sea invasiva, para no alterar procesos.	Garantizamos que la herramienta no sea invasiva, ya que se toman datos prácticos de operación de los controladores de lazo cerrado, sin alterar el proceso de producción de planta.
R6	Error en la Programación e integración de los métodos detección y diagnóstico de oscilaciones en los lazos cerrados de control.	Se busco un repositorio de información, la cual nos suministra una visión clara y literarias para la construcción del código de cada método de detección de oscilaciones.
R7	Falla en la verificación y validación de la programación a través de diferentes dispositivos la programación, integración de conceptos, métodos y funcionalidad de la herramienta computacional.	Se busco a través de una herramienta de Matlab, simular los diferentes procesos, para verificar que la herramienta computacional funcionara bajo los requerimientos descritos.
R8	Incumplimiento de los cronogramas de actividades bajos tiempos establecidos.	Control de tiempos y presupuestos, para garantizar que la herramienta se diseñara y construyera en los tiempos establecidos, de esta manera se dispuso de costo de construcción fijos.