

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DE OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO A
TRAVÉS DE TÉCNICAS DETERMINÍSTICAS PARA LOS CONTROLADORES**

**JOSE ALEJANDRO GARCIA ROLANDO
JUAN CAMILO VARGAS SÁNCHEZ**

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

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DE OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO A
TRAVÉS DE TÉCNICAS DETERMINÍSTICAS PARA LOS CONTROLADORES**

**JOSE ALEJANDRO GARCIA ROLANDO
JUAN CAMILO VARGAS SÁNCHEZ**

**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 lo dedicamos y le damos las gracias primero que todo a Dios, a nuestras familias por ser un gran apoyo para cumplir nuestros sueños como el de ser profesionales. A todas las personas especiales que nos acompañaron en este proceso, a los ingenieros que contribuyeron a nuestra formación académica y profesional, quienes nos enseñaron que se debe ser no solo bueno sino excelente en cada meta que se tenga ¡Gracias!

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE ECUACIONES.....	9
GLOSARIO.....	10
RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1. ANTECEDENTES	15
1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE	17
2. OBJETIVOS.....	20
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. MARCO DE REFERENCIA	21
3.1. ESTADO DEL ARTE.....	21
3.2. MARCO TEÓRICO	31
3.2.1 MARCO CONCEPTUAL.....	36
3.2.2 MARCO LEGAL	48
4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.....	50
4.1. METODLOGÍA	50
4.2. PARADIGMA	50
4.3. TIPO DE INVESTIGACION	51
4.4. METODO DE LA INVESTIGACIÓN	51
4.5. POBLACION Y MUESTRA	52
4.6. PROCEDIMIENTO	53
4.7. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	54
4.8. PLAN DE TABULACION Y ANALISIS.....	54
4.9. CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO	55
5. PRESUPUESTO	56
5.1. PRESUPUESTO GENERAL	56
5.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO	57

5.3	CONSULTORIA ESPECIALIZADA	57
5.4	MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS.....	58
6	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	59
6.1	DISEÑO DEL PROTOTIPO.....	59
6.2	DISEÑO DISPOSITIVO FINAL.....	62
6.3	MATERIALES	64
6.3.1	MUESTRA POBLACIONAL.....	64
6.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	66
6.4.1	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO FINAL.....	68
6.5	MANUAL DE USUARIO	74
	CONCLUSIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto del pobre desempeño del control (Ing. Gerardo Leal, MSc) [61].	19
Figura 2. Sistema de control de lazo abierto (Ogata, Katsuhiko) [59]	32
Figura 3. Tipos de ondas (M.C.I. Victor Mora) [61]	32
Figura 4. Sistema de control de lazo cerrado. (Ogata, Katsuhiko) [59]	32
Figura 5. Sistema de control de lazo cerrado con control PID. (Ogata, Katsuhiko) [59].....	33
Figura 6. Modelo FOPDT (Ingeniero David Gilbert) [60]	35
Figura 7. Respuesta Set-point (Mohieddine Jelali) [1].	36
Figura 8. Aproximación al escalón usando el método (Mohieddine Jelali) [1].....	41
Figura 9. Puntos de datos típicos de respuesta al escalón (Mohieddine Jelali) [1]	43
Figura 10. Procedimiento Metodológico (Fuente propia)	50
Figura 11. Etapas del proyecto. (Fuente propia)	53
Figura 12. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (Propia autoría).	59
Figura 13. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (Propia autoría)	60
Figura 14. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (propia autoría).....	61
Figura 15. Respuesta final de un sistema estable. (propia autoría).	62
Figura 16. Sistema datos defectuosos. (propia autoría).	63
figura 17. Grafica de datos del sistema de prueba (propia autoría)	69
Figura 18. Diagnostico en planta con el método 1 (propia autoría).....	70
Figura 19. Diagnostico en planta con el método 2 (propia autoría).....	71
Figura 20. Diagnostico en planta con el método 3 (propia autoría).....	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Criterios de respuesta del Set-Point típicos [1]	37
Tabla 2. Clases de rendimiento para control PI.....	40
Tabla 3. Plan de trabajo (Fuente propia)	55
Tabla 4. Presupuesto general.	56
Tabla 5. Costo personal científico	57
Tabla 6. Costo personal de apoyo.....	57
Tabla 7. Costo consultoría especializada.	57
Tabla 8. Costo materiales e insumos	58
Tabla 9. Costo trabajo de campo	58
Tabla 10. Costo equipos usados.....	58
Tabla 11. Formas de suministros de datos.....	65
Tabla 12. Síntesis de datos para análisis.	65

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Modelo FOPDT (Ingeniero David Gilbert) [60]	35
Ecuación 2. Modelo FOPDT.....	38
Ecuación 3. Tiempo de asentamiento normalizado T^*_{set}	38
Ecuación 4. Error de valor Absoluto normalizado IAE_d	39
Ecuación 5. Criterio de relación de IAE_d y T^*_{set}	39
Ecuación 6. Margen de Ganancia Correspondiente.	39
Ecuación 7. Margen de Fase	39
Ecuación 8. Modelo de segundo orden más retardo de tiempo (SOPTD).	42
Ecuación 10. Punto Máximo.....	43
Ecuación 11. Coeficiente de amortiguamiento	43
Ecuación 12. Expresión analítica derivada	44
Ecuación 13. Respuesta correspondiente a t^*_i	44
Ecuación 14. Estimación y^*_2	44
Ecuación 15. Estimación t^*_2	44

GLOSARIO

Determinismo: sistema en el cual el azar no está involucrado en el desarrollo de los futuros estados del sistema, producirá siempre la misma salida a partir de las mismas condiciones de partida o el estado inicial.

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

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

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

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.

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.

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 son receptores de señales denominadas entradas, con el fin de realizar un proceso, donde el resultado es conocido como salida, el sistema contiene operaciones externas tales como las variables controladas que se producen por perturbaciones durante el proceso. Con lo cual la herramienta computacional o software tiene la habilidad de detectar y diagnosticar las anomalías se presenten durante el proceso, donde por lo general la no linealidad es causante de malos resultados en un sistema de control. El diagnostico determinista, va en función de eliminar el azar del sistema donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados, no contemplándose la existencia de datos variables, o incertidumbre en el proceso modelada mediante dicho modelo. El objetivo del proyecto es implementar una herramienta computacional para la optimización del rendimiento de los sistemas de control de lazo cerrado, Para lograr identificar y diagnosticar las perturbaciones en haya en un sistema o planta.

Palabras claves: Invariablemente, Diagnostico, Ganancias, optimizar, Modelado.

ABSTRACT

Control systems are receivers of signals called inputs, in order to carry out a process, where the result is known as output, the system contains external operations such as controlled variables that are produced by disturbances during the process. With which the computational tool or software has the ability to detect and diagnose anomalies that occur during the process, where in general non-linearity causes poor results in a control system. The deterministic diagnosis is based on eliminating the chance of the system where the same initial inputs or conditions will invariably produce the same outputs or results, not considering the existence of variable data, or uncertainty in the process modeled by said model. The objective of the project is to implement a computational tool for optimizing the performance of closed-loop control systems, to identify and diagnose disturbances in beech in a system or plant.

Key words: Invariably, Diagnosis, Gains, optimize, Modeling.

INTRODUCCIÓN

Actualmente a nivel industrial se presentan fallas que generan irregularidades en la producción, en el deterioro económico y energético; estas irregularidades son reconocidas con el nombre celebre de ruido o perturbaciones de un sistema. Estas pueden ser causadas por un ente interno o externo del sistema que permiten ser detectadas. Existen una gran cantidad de soluciones encaminadas a detectar y corregir fallas de manera temprana. Estas funcionan solo a partir del monitoreo de datos (Variables, Picos, Tiempo), no están exentas de generar falsas alarmas que desorientan a los usuarios sobre el origen y la localización de las fallas.

La detección tardía de dichas perturbaciones implica el deterioro del sistema provocando un bajo rendimiento a nivel de operación y producción. Las herramientas que existen resultan insuficientes para correlacionar el impacto asociado a la inoportunidad de fallas en la automatización de las tareas relacionadas.

Un sistema de control es una interconexión de componentes que forman una configuración del sistema que proporcionará una respuesta deseada. Los sistemas convencionales de control emplean un modelo matemático que describe la dinámica de dicho sistema, pero debido a la complejidad de las plantas actuales han surgido procesos a los cuales es muy difícil o costoso hallar el modelo matemático que mejore la productividad dinámica.

El presente trabajo propone una herramienta para disminuir el bajo rendimiento de los sistemas de control a partir de la detección temprana de perturbaciones, ya que minimiza el impacto a la producción. Se busca generar una herramienta computacional para optimizar el rendimiento de los sistemas de control tanto teórico como practico usando técnicas determinísticas.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ha sido una tradición en la ingeniería de control evaluar el rendimiento de control basado en cambios de paso en los Set-Point o en las perturbaciones de carga. Al analizar una respuesta de Set-Point, los criterios utilizados para describir qué tan bien responde el proceso al cambio pueden incluir el tiempo de subida, el tiempo de sedimentación, la relación de descomposición, el exceso y el error de estado estacionario. En la estructura general de todo sistema de automatización se destacan tres niveles de 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.)

El problema de control surge cuando las compañías productoras utilizan sistemas de control automatizados (planta, proceso, máquina, etc.) y se requiere un comportamiento óptimo, que este refleje un modelo sistemático que necesariamente debe coincidir con los fines que ha sido creado.

Para el control de calidad y la seguridad de la operación, en el desarrollo de productos de los sistemas de automatización, es necesario un sistema de control, para la supervisión del consumo de materiales y de energía. Estos factores dependen del desempeño financiero de la empresa.

Dado que los sistemas de control de procesos son muy complejos, es imposible mantenerlos regularmente por el personal de la planta. Esta es también la razón principal por la que una gran parte de los circuitos de control industrial tiene problemas de rendimiento significativos, como lo descubrieron las auditorías realizadas regularmente desde la década de 1990 [1].

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:

Evaluación Del Controlador Basada En Datos De Respuesta De Set-Point.

Swanda y Seborg han desarrollado índices de rendimiento basados en datos del set-point para caracterizar el rendimiento de los bucles de control de retroalimentación de tipo PID. Los valores de índice se determinan para indicar el punto de transición de un control satisfactorio a un control insatisfactorio para varios objetivos de control [2].

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 [3]

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

Este artículo se basa mediante 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 [4].

1.1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿De qué manera es posible optimizar el rendimiento de los sistemas de control en máquinas industriales?

1.2. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

- **IMPORTANCIA GENERAL**

A lo largo de la historia a nivel industrial los sistemas de control presentan perturbaciones o variaciones que se ven reflejadas en la salida entre estas se encuentran fallos como una mala sintonización, un desgaste generado por la falta de mantenimiento u otros factores que terminan afectando el rendimiento del sistema de control, Estos perturbaciones mencionadas anteriormente se pueden reconocer monitoreando las oscilaciones del sistema las cuales indican el problema puntual por lo tanto se toma la decisión de realizar un mantenimiento avanzado que optimice y precise el controlador, la solución presentada anteriormente se realiza a través una toma de datos en tiempo real que permitan evaluar los lazos de control sin importar que el sistema este activo con el fin de optimizar tiempo y recursos económicos y de personal, el fin de realizar este mantenimiento avanzado es evitar que las alteraciones sean de un rango extenso en factores como la calidad, desempeño y velocidad en la producción evitando pérdidas económicas a nivel industrial.

- **IMPORTANCIA AMBIENTAL**

Una forma óptima de aumentar las ganancias es aplicar una reducción considerable del consumo de energía en cada proceso y la reducción de la variabilidad en el producto final. La variabilidad de los productos o defecto es cuando el producto no cumple estrictamente con especificaciones requeridas causando reproceso o el no uso de dicho producto. Se ha considerado que un alto porcentaje de los lazos de

control de los procesos causan más oscilación en la variable controlada cuando se ejecutan en modo automático con respecto a cuándo operan en modo manual. Optimizando el rendimiento de los controladores un sistema de control podría causar una disminución en el consumo de energía, contribuyendo al medio ambiente teniendo en cuenta que la energía utilizada es no renovable.

- **IMPORTANCIA INDUSTRIAL**

Al finalizar el año 2020 se proyecta que el grado de automatización en el sector empresarial colombiano será de entre el 25% al 30%, lo cual implica un enorme reto en materia de apropiación de la tecnología y mejoramiento de las competencias de los empleados [5]. Lo cual genera un aumento en las instalaciones de manufactura como se viene presentando en países de Europa [6], y se estima se presente un aumento en los lazos de control regulatorios de producción. En la actualidad se encuentran más del 90% de los controladores que existen actualmente en los sistemas de control son del tipo PID [7], el control PID juega un es de nivel protagónico cuando se refiere a industria [8][9]. Como fundamento de lo dicho anteriormente se encuentra el gran hallazgo realizado por Desborough y Miller [10] donde un aproximado de 11.000 controladores en refinerías, industrias químicas y papeleras, arrojó como resultado que el 97% de dichos controladores poseían estructura PID, reafirmando porque en la actualidad es el más usado [11] a pesar de que a lo largo de los años se han presentado avances teóricos y tecnológicos. Los controladores integrados en dispositivos [12] e instrumentos [13] constituyen un área de creciente del control PID en la industria. Siendo así predominante en la industria.

A pesar de tener ventajas muy relevantes al momento de implementar los lazos de control PID, El máximo desempeño buscado no se logra obtener de manera constante una vez alcanzado el punto máximo de rendimiento, visto que se puede presentar una mala sintonía del controlador, por lo que el resultado puede ser agresivo, lento u oscilatoria del lazo de control, dando como resultado una mínima

capacidad para lograr evitar las perturbaciones, Las cuales disminuyen la Varianza del proceso. Por lo cual muchos de estos controladores que presentan un desempeño No aceptable o regular, presentan una oportunidad de mejorar el sistema [14].



Figura 1. Efecto del pobre desempeño del control (Ing. Gerardo Leal, MSc) [61].

El modelo piramidal jerárquico de la ISO (Organización Internacional de Estándares) propone cuatro niveles para distribuir las tecnologías aplicadas en un Sistema de Automatización Industrial.

Este modelo se utiliza de forma general para diseñar, analizar y comprender el funcionamiento de un sistema automatizado aplicado en el área de procesos industriales. El modelo piramidal muestra la forma en la que interactúan y se relacionan los cuatro niveles del sistema.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Implementar una herramienta computacional de diagnóstico para la evaluación del desempeño de los lazos de control usando métricas determinísticas.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar un software adecuado para el desarrollo de la herramienta de evaluación determinística de los procesos industriales.
- Realizar análisis comparativo de métodos deterministas para la evaluación del rendimiento de los sistemas de control en los procesos continuos.
- Integrar métodos deterministas para la evaluación del rendimiento de los sistemas de control en las maquinas industriales.
- Validar la funcionalidad de la herramienta computacional diseñada en entornos de simulación industriales.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. ESTADO DEL ARTE

Seguidamente encontrará una serie de proyectos que permiten visualizar soluciones semejantes al desarrollo de la presente investigación. Éstos aportes de manera teórica, pero sobre todo práctica contribuye en la construcción de la herramienta computacional para la optimización del desarrollo de procesos.

De acuerdo con, la **“Evaluación del rendimiento de los bucles de control que involucran sistemas inestables para el seguimiento del punto de ajuste y el rechazo de perturbaciones”** [15], manifiesta en su trabajo, cuyo objetivo general de este antecedente es proponer un método de evaluación del rendimiento que mide el rendimiento del seguimiento del punto de ajuste, así como las características de rechazo de perturbaciones de los controladores PID diseñados para procesos inestables. Los límites inferiores de los errores absolutos integrales (IAE) se derivan de la función de transferencia de bucle cerrado deseada sujeta a cambios de punto de ajuste que pueden ser de tipo escalonado o de rampa.

El índice de rendimiento se desarrolla considerando el método de Síntesis Directa (DS) para el diseño del controlador PID. Basado en el límite teórico IAE_0 , se aclara un índice adimensional como la relación entre IAE_0 y el IAE real obtenido de la respuesta de bucle cerrado bajo cambios de punto de ajuste de paso y cambios de variables de carga.

Teniendo en cuenta este índice basado en IAE como la medida de rendimiento de los bucles de control PI / PID, la efectividad del controlador se evalúa y prueba en diferentes tipos de procesos inestables de primer orden o segundo orden más tiempo de retraso. Se realizan estudios de simulación para cambios en el punto de ajuste y rechazo de perturbaciones en varios ejemplos numéricos para probar la validez del punto de referencia de rendimiento sugerido.

Los aportes de este proyecto es el método para medir el rendimiento a los sistemas de control que se encuentran en los procesos industriales.

Por otra parte, “**Detección de bucles de control lento-experiencias y mejoras**” [16], Hägglund, señala en su trabajo que ha propuesto un índice atractivo para la detección de bucles de control lentos (Control Eng. Practice 7 (1999) 1505). Sin embargo, cuando se trata de datos reales y ruidosos, el valor del índice depende en gran medida del tratamiento previo de los datos. Todos los procesos reales están afectados por tiempos muertos. Esto hace que sea una cuestión importante averiguar hasta qué punto el índice de inactividad podría verse influenciado por retrasos.

La respuesta es fácil y conveniente: el índice de inactividad no se ve afectado en absoluto por los tiempos muertos de perturbación, siempre que la perturbación experimente la misma dinámica que la variable de control. Este documento describe formas de calcular el índice de inactividad en condiciones realistas. Se muestran ejemplos y se discuten problemas adicionales que pueden ocurrir. Además, se discute el caso de las perturbaciones no escalonadas.

Por otro lado, lo que expone el siguiente trabajo de “**Detección automática de bucles de control lento**” [17], se define una medida 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. El procedimiento es sensible al ruido, ya que se estudian los incrementos de las señales.

Se filtran las señales. Para hacer esto, es necesario tener alguna información sobre la dinámica del proceso para encontrar una constante de tiempo de filtro adecuada. Este artículo describe un procedimiento para la detección automática de bucles de control lentos obtenidos de controladores conservados.

Es necesario recalcar, el **“método eficiente para la identificación en línea del estado estacionario”** [18], que desarrolla un método novedoso para la identificación en línea del estado estacionario en procesos ruidosos. El método utiliza valores críticos de una estadística similar a F, y su eficiencia computacional y robustez para procesar la distribución de ruido y los patrones que no son de ruido proporcionan ventajas sobre los métodos existentes.

La distribución de la estadística se obtiene a través de simulaciones de Montecarlo, y los cambios derivados analíticamente en la distribución debido a cambios en la rampa del proceso y autocorrelaciones en los datos del proceso se muestran para cruzar la comprobación con simulaciones. La aplicación se demuestra en datos de pH, temperatura y presión medidos experimentalmente.

Así mismo se encuentra la, **“Evaluación de rendimiento y reajuste de controladores PID para rechazo de perturbaciones de carga”** [19], este método formula un algoritmo para la evaluación del rendimiento del rechazo de perturbaciones de carga de un controlador PI (D) y para el reajuste de los parámetros en caso de que la respuesta obtenida no sea satisfactoria. La técnica se puede aplicar simplemente evaluando la perturbación de la carga en respuesta de circuito cerrado. La sintonización automática para un filtro de punto de ajuste también se propone para abordar la tarea siguiente de punto de ajuste. Los resultados de la simulación muestran la efectividad de la metodología [5].

En relación con lo anterior existe **“Diseño y evaluación del rendimiento de los controladores de avance de consigna para romper las compensaciones en bucles de control univariados”** [20], donde se propone un método de diseño para el controlador de avance del punto de ajuste, con el objetivo de romper las dos compensaciones fundamentales entre el seguimiento del punto de ajuste, el rechazo de perturbaciones de carga y la robustez frente a las incertidumbres del modelo.

Se establece el límite inferior para la variación total (TV). Se diseñó un índice de rendimiento basado en TV de IAE para evaluar el rendimiento del controlador de avance de consigna. La efectividad del método de diseño del controlador de avance propuesto y el método de evaluación del desempeño se ilustran mediante simulación y ejemplos experimentales.

En cuanto a la, **“Evaluación del rendimiento del controlador basada en datos de respuesta del punto de ajuste”** [21], a su vez se desarrolla una nueva metodología para evaluar el rendimiento de los controladores PI a partir de datos de respuesta de bucle cerrado para un cambio de paso de punto de ajuste. Se basa en dos nuevos índices de rendimiento adimensionales, el tiempo de resolución y la integral adimensionales del valor absoluto del error.

La metodología se utiliza para cuantificar qué tan lejos está un bucle de control del mejor rendimiento alcanzable del control PI. También identifica bucles de control de bajo rendimiento, como los que son excesivamente lentos. Las propiedades de rendimiento y robustez del Control interno del modelo El método de ajuste (IMC) se analiza y se utiliza como puntos de referencia industrialmente relevantes. La metodología propuesta también es aplicable a los controladores PID.

Por otro lado, **“Análisis, diseño y tecnología del sistema de control PID”** [22], es un proyecto con la función de dar el diseño y ajuste de un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) que parece ser conceptualmente intuitivo, pero puede ser difícil en la práctica, si se logran objetivos múltiples (y a menudo conflictivos), como corto transitorio y alta estabilidad. Por lo general, los diseños iniciales obtenidos por todos los medios deben ajustarse repetidamente a través de simulaciones por computadora hasta que el sistema de circuito cerrado funcione o se comprometa según lo deseado.

Esto estimula el desarrollo de herramientas "inteligentes" que pueden ayudar a los ingenieros a lograr el mejor control general de PID para todo el sobre operativo.

Este desarrollo ha llevado a la incorporación de algunos algoritmos de ajuste avanzados en los módulos de hardware PID. En correspondencia con estos desarrollos, este documento presenta una visión general moderna de las funcionalidades y los métodos de ajuste en patentes, paquetes de software y módulos de hardware comercial. Se ve que se han desarrollado muchas variantes PID para mejorar el rendimiento transitorio, pero estandarizando y modularizando el control PID son deseados, aunque desafiantes.

La inclusión de la identificación del sistema y las técnicas "inteligentes" en los sistemas PID basados en software ayudan a automatizar todo el proceso de diseño y ajuste en un grado útil. Esto también debería ayudar al desarrollo futuro de controladores PID "plug-and-play" que son ampliamente aplicables y pueden configurarse fácilmente y operar de manera óptima para una mayor productividad, mejor calidad y requisitos de mantenimiento reducidos.

Se debe agregar, el **“Diseño de controlador PI / PID basado en síntesis directa y rechazo de perturbaciones”** [23], propone un método de diseño para controladores PID basado en el enfoque de síntesis directa y la especificación de la función de transferencia de circuito cerrado deseada para las perturbaciones. Las expresiones analíticas para los controladores PID se derivan de varios tipos comunes de modelos de proceso, incluidos los modelos de primer orden y segundo orden más tiempo de retraso y un modelo integrador más tiempo de retraso.

Aunque los controladores están diseñados para el rechazo de perturbaciones, las respuestas del punto de ajuste suelen ser satisfactorias y pueden ajustarse independientemente mediante un factor de ponderación del punto de ajuste. Nueve ejemplos de simulación demuestran que el método de diseño propuesto da como resultado un muy buen control para una amplia variedad de procesos, incluidos aquellos con características integradoras y / o de fase no mínima.

Las simulaciones muestran que el método de diseño propuesto proporciona un mejor rechazo de perturbaciones que la síntesis directa estándar y los métodos de

control del modelo interno cuando los controladores se ajustan para tener el mismo grado de robustez.

Volviendo la mirada a los controladores se presenta un artículo sobre “**El futuro del control PID**” [24], donde se especifica que el controlador PID es un dispositivo muy usado en los lazos de control de las industrias. Las especificaciones, estabilidad, diseño, aplicaciones y rendimiento del control PID han evolucionado de forma significativa a medida que pasa el tiempo y se usan en nuevos procesos industriales. Por ejemplo “El controlador PID se usa para una amplia gama de problemas: control de procesos, accionamientos de motor, memorias magnéticas y ópticas, automotriz, control de vuelo, instrumentación, etc.” Se concluye en este artículo sobre las alternativas al PID que se seguirán usando en el futuro.

Por otra parte, “**Modelado, Simulación y control de sistemas con muestreo no convencional**” [25], tiene como funcionamiento de la Tecnología que se plantea una vista general de los principales procesos realizados durante el análisis y diseño de un sistema de control con muestreo no convencional el cual funciona en un tipo especial. (los sistemas multifrecuencia) desde sus inicios en 1955.

La enseñanza de acuerdo con lo anterior permite tener un análisis completo de todo el desarrollo realizado durante el sistema de control, este método permite profundizar e interactuar con todo el sistema haciendo un recorrido desde su interior hasta el exterior.

Posteriormente se estable una recopilación de investigaciones similares que asisten al desarrollo del proyecto dando aportes significativos para el perfeccionamiento y aplicación de la herramienta computacional.

Con respecto a los tipos de diagnóstico a los controladores se encuentra, el “**Controlados predictivos, diagnósticos de bajo rendimiento**” [26], el controlador predictivo (MPC) es a menudo una fuente importante de degradación del rendimiento debido a la mala calidad de este modelo.

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.

Este tipo de tecnología es útil en la evaluación del modelo MPC, permite identificar si el mal desempeño proviene del desajuste modelo-planta (MPM) o perturbaciones no medidas (UD). Con la finalidad de identificar la fuente principal de degradación del sistema, donde la idea principal es comparar la distribución estadística de los resultados nominales estimados con el error de modelado real.

Posteriormente se debe tener en cuenta, el **“Monitoreo y Evaluación del rendimiento de control mediante la prueba de hipótesis en matrices de covarianza de salida multivariante”** [27], debido a que los lazos de control se encuentran de forma frecuente en los procesos continuos de producción, el desempeño de dichos lazos influye directamente en la eficiencia, la seguridad y la calidad del producto final. Por tal motivo, la evaluación del rendimiento del control (CPA) y el monitoreo del sistema de control (CSM) son de importancia crítica para el procesamiento industrial y así mantener un control permanente sobre el producto que se está procesando.

De este proyecto permite explicar cómo mantener un monitoreo constante del lazo de control estableciendo, 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 esto se plantea establecer unos filtros que permitan eliminar la reiteración contenida en los datos de salida de bucle cerrado.

Teniendo en cuenta, la **“Reducción de variabilidad en procesos con controladores tipo PID frente a perturbaciones oscilatorias”** [28], se realiza una

contextualización a la situación tratada en donde se aborda el monitoreo del desempeño en el lazo de control. Próximamente, se presenta un análisis Investigativo, 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.

Aportes significativos de este proyecto es fundamental reducir la variabilidad en el resultado final de los procesos de producción, planteando un monitoreo constante en función al rendimiento.

Simultáneamente, el **“Control total por matiz de calidad (MTC)”** [29], principalmente se plantea una matriz relacionando entradas y salidas del sistema donde a través de una sintonización correcta al controlador se busca administrar, ordenar, dirigir o regular el comportamiento de este, con el fin de tener la mayor calidad posible en el proceso de producción.

La contribución de este proyecto es la aplicación de matrices de calidad es un método que brinda mucho apoyo, ya que el método de métricas determinísticas requiere de un orden y una estructura compatible a una matriz MTC, con el fin de mantener sintonizado el controlador durante el proceso de producción.

Mientras tanto, la **“Integración de sistemas de control de producción a sistemas de procesos de manufactura por medio de la automatización”** [30], es un proceso donde los Sistemas de Automatización y Control resultan algo crítico para las empresas de manufactura que buscan reducir los costos de producción, incrementar la productividad y mantener operaciones redituables y eficientes. Para poder lograr la conectividad continua que Industria 4.0 demanda, las compañías deberán de aprovechar tecnologías de comunicaciones y control para conectar y sincronizar todas las partes en movimiento dentro de una fábrica —el Industrial Internet of Things (IIoT), todo el software y todo el hardware— de forma que esto mejore y perfeccione al proceso de manufactura como un todo.

El aporte al proyecto es integrar el concepto de automatización que permite mejorar transparencia del proceso y control de este, se busca optimizar la productividad de gente y máquinas, asegurando que el equipo opere con un desempeño óptimo.

El siguiente punto, trata de un **“Sistemas de recolección de datos de máquina en tiempo real, reportes de análisis y pantallas de usuario personalizadas en piso de producción”** [31], que permite identificar plenamente los puntos ciegos en el lazo de control de producción de llevar un control y seguimiento continuo a aquellos elementos y situaciones que lo requieren las cuales generan desgastes e imprecisión, ya que, hace seguimiento y recuperación de los datos de cada ciclo, mantenimiento predictivo, verificación de entrada, uso, salida y análisis de materiales, seguimiento de herramienta, así como eficiencia y utilización de máquina.

La enseñanza que deja el proyecto es recopilar datos del proceso, manejar todos los datos de monitoreo de producción y resultados en tiempo real que necesita.

Igualmente, la **“Evaluación del rendimiento del controlador en el seguimiento del punto de ajuste y el control reglamentario”** [32], 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.

El aporte al trabajo de estos resultados sugiere que la variable manipulada se puede explotar en la evaluación del rendimiento del controlador.

Por otro parte, de acuerdo con la **“Supervisión de línea en planta y sistemas de monitoreo de desempeño”** [33], se aplica una supervisión continua con el fin de

asegurar que el equipo opere con desempeño óptimo y así posibilitar la reacción más rápida a cambios en la producción, Optimizar procesos con variación de producto minimizada, Reducir tiempos de entrega, Facilitar un flujo de trabajo de manufactura continuo.

A la cual contribuye a este proyecto es mejorar la visibilidad en tiempo real en el sistema de producción continua.

A su vez, la “**Supervisión Del Rendimiento Del Bucle De Control**” [34], tiene como objetivo general del monitoreo de rendimientos de bucle de control (CPM) en los procesos de producción continua nos permite obtener información 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.

La contribución de este proyecto es tener un criterio base que permita conocer la satisfacción del usuario con respecto a la interfaz manipulada.

Se debe tener en cuenta, las “**Herramientas ejes 3d/ matlab para el control del sistema no lineal aplicado al péndulo invertido sobre carro deslizante**” [35], presentan otro rasgo de herramientas computacionales en el cual se presenta una herramienta didáctica para la enseñanza del control automático basado en el péndulo invertido sobre carro deslizante, el cual se desarrolla sobre un prototipo virtual, simulando el modelo no lineal en matlab y presentado en un entorno java de 3D. Para dar solución al problema del control, se tienen en cuenta dos aspectos principales como los son el “swing up” (llevar el péndulo a posición vertical) y el balanceo (mantener el péndulo en la posición vertical). La interfaz al usuario (GUI) busca facilitar el aprendizaje de los conceptos básicos de un sistema de control para estudiantes de pregrado y posgrado, buscando minimizar costos y tiempo en la enseñanza.

3.2. MARCO TEÓRICO

Para la sustentación de teorías que abarcan la investigación a continuación se mostrarán las bases que fundamentan el presente proyecto.

Una de las bases epistemológicas para el proyecto es el **SISTEMAS DE CONTROL**, estos sistemas de control hacen parte de un tipo de sistema que se caracteriza por la presencia de una serie de elementos que permiten influir en el funcionamiento de dicho sistema, es decir:

“...Un sistema dinámico puede definirse conceptualmente como un ente que recibe unas acciones externas o variables de entrada, y cuya respuesta a estas acciones externas son las denominadas variables de salida. Las acciones externas al sistema se dividen en dos grupos, variables de control, que se pueden manipular, y perturbaciones sobre las que no es posible ningún tipo de control...” [35].

Los aportes al proyecto es dar a conocer la finalidad de un sistema de control, la cual es conseguir, mediante la manipulación de las variables de control, un dominio sobre las variables de salida, de modo que estas alcancen unos valores prefijados (consigna).

Una pieza fundamental para los sistemas de control son los **LAZOS DE CONTROL** ya que son los componentes más importantes en los sistemas de automatización. La calidad del producto, la seguridad de la operación, el consumo de materiales y energía, y por lo tanto el desempeño financiero, están directa o indirectamente vinculados al desempeño de los sistemas de control [36].

Los sistemas se pueden clasificar en **SISTEMA DE CONTROL EN LAZOS ABIERTOS Y LAZOS CERRADOS**, es decir, un sistema de control de lazo abierto utiliza un controlador y un actuador para obtener la respuesta deseada. Este sistema utiliza un dispositivo de accionamiento para controlar el proceso directamente sin utilizar la retroalimentación.

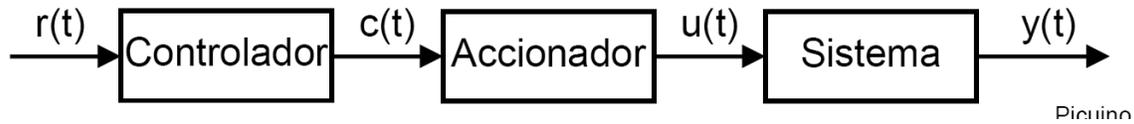


Figura 2. Sistema de control de lazo abierto (Ogata, Katsuhiko) [59]

• **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 Figura 3.

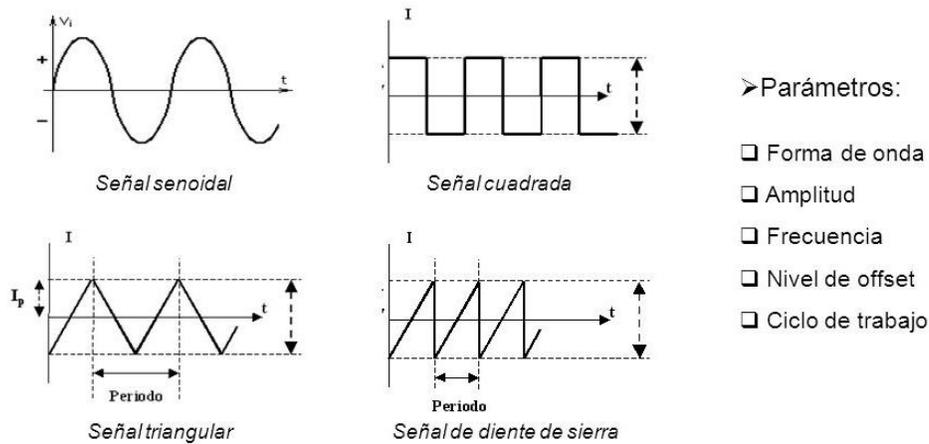


Figura 3. Tipos de ondas (M.C.I. Victor Mora) [61]

Un sistema de control de bucle cerrado utiliza una medida adicional de la salida real para comparar dicha salida con la respuesta de salida deseada. La medida de la salida se denomina señal de realimentación [37].

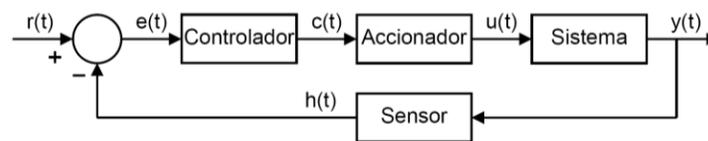


Figura 4. Sistema de control de lazo cerrado. (Ogata, Katsuhiko) [59]

Una pieza esencial es el **SET-POINT (PUNTO DE AJUSTE)** se define como el valor de la variable programado en el controlador que fija el punto donde se desea mantener la variable controlada.

Un mecanismo de control es el **CONTROLADOR PID (PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO)** se define como un controlador o regulador PID un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado.

El controlador PID está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción Proporcional, Integral y Derivativa, de las cuales recibe su nombre.

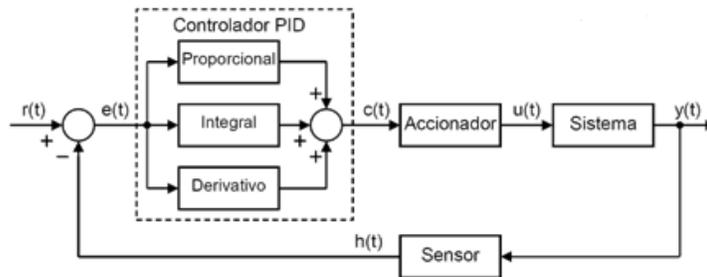


Figura 5. Sistema de control de lazo cerrado con control PID. (Ogata, Katsuhiko) [59]

A lo largo del desarrollo de técnicas para el rendimiento de los sistemas de control se creó la **EVALUACIÓN DETERMINISTA DEL CONTROLADOR** se ocasiona por los sistemas en las industrias de procesos normalmente tienen al menos una fuente estocástica que actúa sobre el proceso del sistema y se operan alrededor de un punto de operación constante durante largos períodos de tiempo o dentro de los lotes. Además, para la mayoría de estos sistemas, la reducción de las varianzas de salida conduce a una mejor calidad del producto, un menor consumo de energía/material y, por lo tanto, una mayor eficiencia y productividad.

Para estos sistemas, considerar la variable manipulada (MV) y puntos de referencia relacionados es bastante natural y útil. Sin embargo, los sistemas en algunos otros campos industriales, como la industria de la energía y el servo y la robótica,

muestran referencias y perturbaciones que tienden a ser más deterministas en lugar de estocásticos.

En estos casos, los procesos se operan con cambios frecuentes en las referencias y, por lo tanto, en los niveles de salida. Por ejemplo, las centrales eléctricas tienen que seguir un programa de carga diaria, que se fija en función de la demanda de carga típica y los requisitos del mercado de energía (Uduehi et al. 2007c). Por lo tanto, para estos sistemas, se necesitan técnicas de evaluación deterministas [37].

De acuerdo con lo anterior el presente proyecto se basa en las técnicas de evaluación deterministas.

Algo semejante sucede en el artículo del “**Rendimiento de los bucles de control de realimentación de tipo PID utilizando el tiempo de sedimentación normalizado**”, Según este artículo se desarrollaron técnicas de evaluación para el rendimiento de los lazos de control, con base a esta información se desarrolla un método determinístico para este proyecto.

“Se determinaron los valores T_s óptimos (es decir, los valores más bajos alcanzables de T_s). Se calcularon los valores T para los controladores ajustados utilizando métodos populares, y se establecieron límites superiores de T_s que indican el punto de transición de un control satisfactorio a un control insatisfactorio para varios objetivos de control [38].”

En vista que los sistemas usan técnicas para la optimización se muestra el **FOPDT (First Order Plus Dead Time)**, el modelo FOPDT se usa comúnmente para aproximar el comportamiento de sistemas de orden superior porque conduce a una buena descripción del proceso para propósitos de sintonía de PID. Este modelo tiene 3 parámetros los cuales son:

First Order Plus Dead Time

K_p = Process gain

$$\tau_p \frac{dy(t)}{dt} = -y(t) + K_p u(t - \theta_p)$$

τ_p = Process time constant

θ_p = Process dead time

Ecuación 1. Modelo FOPDT (Ingeniero David Gilbert) [60]

- Ganancia del Proceso, K_P : Indica cuánto cambia la salida por unidad de cambio en la entrada. K_P es una característica de proceso en estado estacionario.
- Constante de Tiempo del Proceso, t : Indica la rapidez con que la salida cambia una vez que ha comenzado a cambiar. t es una característica de proceso dinámica.
- Tiempo Muerto del Proceso, t_0 . Indica cuánto tiempo toma la salida para comenzar a cambiar una vez que la entrada ha cambiado. t_0 es también una característica de proceso dinámica [39].

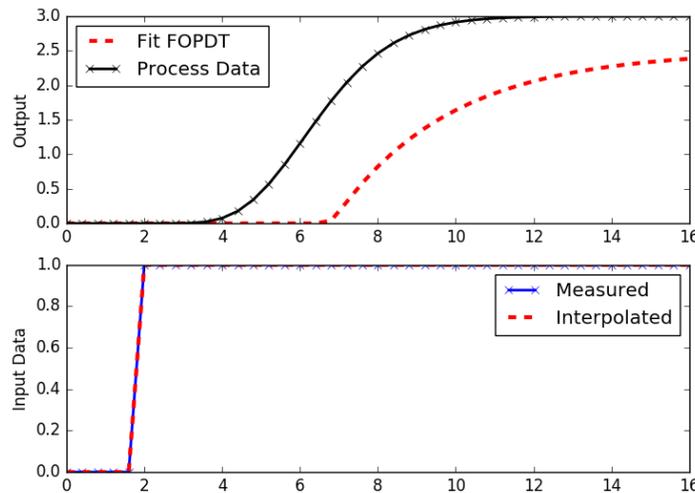


Figura 6. Modelo FOPDT (Ingeniero David Gilbert) [60]

3.2.1 MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se establecen los métodos aplicados en el software para la detección por medio de métricas deterministas.

Métricas de rendimiento

Al analizar una respuesta del Set Points, los criterios utilizados para describir qué tan bien responde el proceso al cambio pueden incluir el tiempo de subida (Rise Time), el tiempo de sedimentación (Settling Time), la relación de descomposición (Decay Ratio), el exceso (Overshoot) y el error de estado estable (Steady-State Error) la tabla 1 y la figura 1 describen los términos mencionados anteriormente:

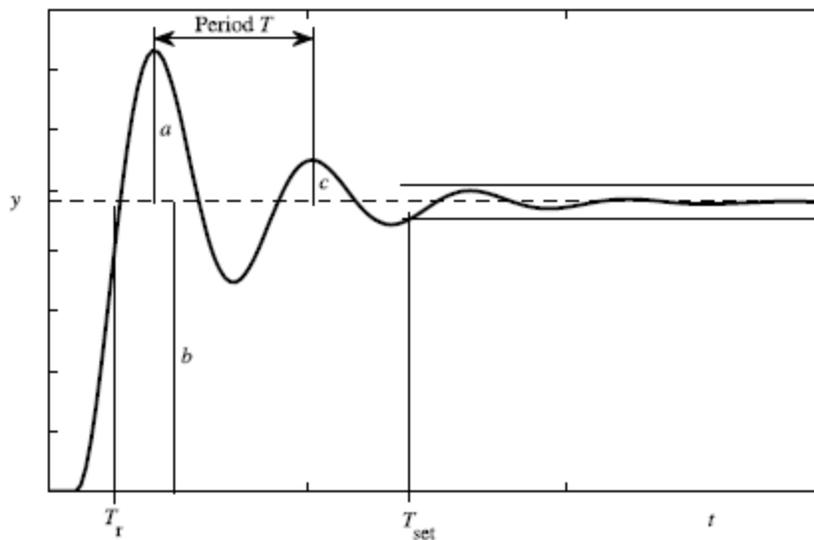


Figura 7. Respuesta Set-point (Mohieddine Jelali) [1].

Tabla 1. Criterios de respuesta del Set-Point típicos [1]

Criterios	Definición e interpretación
Rise time T_r	Inversa de la pendiente más grande de la respuesta al escalón o el tiempo que tarda la respuesta al escalón en cambiar del 10 al 90% de su valor de estado estable. Un tiempo de subida grande puede ser el resultado de un controlador lento.
Settling Time T_{set}	El tiempo que toma antes de que la respuesta al escalón permanezca dentro del p% (comúnmente $p = 1, 2$ o 5%) de su valor de estado estable. El tiempo pasado fuera del nivel deseado generalmente se relaciona con un producto indeseable. Por tanto, se busca un tiempo de reposo corto.
Decay ratio $d = c/a$	Relación entre dos máximas consecutivas del error. Una gran tasa de decaimiento se asocia con un controlador agresivo, y las oscilaciones visibles están presentes en la respuesta de punto de consigna. Cuanto menor sea la tasa de decaimiento, más rápidas serán amortiguadas las oscilaciones. Tradicionalmente, se ha utilizado una amortiguación de amplitud de un cuarto (es decir, $d = 1/4$). Sin embargo, este valor es demasiado alto.
Overshoot $\alpha = 100 a/b$	Relación entre la diferencia entre el primer pico y el valor de estado estable de la respuesta del punto de ajuste. Un controlador agresivo puede aumentar la cantidad de sobreimpulso asociado con un cambio de punto de ajuste. Por lo general, se especifica un rebasamiento del 8 al 10%. En muchas situaciones, es deseable, sin embargo, tener una respuesta sobre amortiguada sin sobreimpulso.
Steady-state error	Error de control de estado estable. Siempre es cero para un controlador con acción integral.

Estos criterios se pueden utilizar tanto como especificaciones para ajustar/poner en marcha bucles de control, así como para documentar los cambios en el rendimiento debido al ajuste del controlador o de los parámetros del proceso. Los criterios de Set-Point explicados anteriormente se basan en un único punto de la curva de respuesta.

EVALUACIÓN DEL CONTROLADOR BASADA EN DATOS DE RESPUESTA DE PUNTO DE FIJACIÓN

Swanda y Seborg han desarrollado índices de rendimiento basados en datos del Set-Point para caracterizar el rendimiento de los bucles de control de retroalimentación de tipo PID. Los valores de índice se determinan para indicar el punto de transición de un control satisfactorio a un control insatisfactorio para varios objetivos de control.

Criterios Normalizados

Como se menciona anteriormente en los criterios tradicionales de rendimiento son el Tiempo de Liquidación (T_{set}) y la Integral De Los Errores Absolutos (IAE). Sin embargo, los valores absolutos de T_{set} e IAE proporcionan poca indicación del rendimiento del bucle de control sin relación con la dinámica del proceso. La razón del enfoque de Swanda y Seborg es comparar el rendimiento alcanzado con el de un controlador PI sintonizado con la regla IMC basada en un modelo de proceso FOPTD:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-T_a s}}{T_s + 1}$$

Ecuación 2. Modelo FOPDT

K_p es la ganancia del proceso estático, T_a el retardo de tiempo aparente, y T es la constante de tiempo (aparente) o retraso. Es un medio sencillo para caracterizar el retardo de tiempo neto, los ceros del medio plano derecho y el orden del sistema. En este contexto, se consideran dos indicaciones importantes de rendimiento, a saber, las versiones normalizadas del tiempo de liquidación T_{set} y el IAE:

$$T_{set}^* = \frac{T_{set}}{T_a}$$

*Ecuación 3. Tiempo de asentamiento normalizado T_{set}^**

$$IAE_d = \frac{IEA}{|\Delta r|T_a}$$

Ecuación 4. Error de valor Absoluto normalizado IAE_d

Donde Δr está el tamaño del cambio de Set-Point. Ambos criterios están relacionados entre sí por:

$$IAE_d \approx \frac{T_{set}^*}{2.30} + 0.565 \text{ para cuando } T_{set}^* \geq 3.30$$

*Ecuación 5. Criterio de relación de IAE_d y T_{set}^**

Bajo esta condición, el margen de ganancia correspondiente A_m y el margen de fase φ_m también pueden expresarse como funciones T_{set}^* de

$$A_m = \frac{\pi}{2} IAE_d = \frac{\pi}{2} \left(\frac{T_{set}^*}{2.30} + 0.565 \right)$$

Ecuación 6. Margen de Ganancia Correspondiente.

$$\varphi_m = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{IAE_d} = \frac{\pi}{2} - \left(\frac{1}{\frac{T_{set}^*}{2.30} + 0.565} \right)$$

Ecuación 7. Margen de Fase

Estas relaciones se han derivado ajustando los parámetros a las soluciones analíticas para diferentes modelos controlados por un controlador IMC-PI y para un tiempo de sedimentación definido en $\gamma = 0,9 \Delta r$. Se tiene en cuenta el conjunto T_{set}^* , las ecuaciones 6 y 7 se pueden utilizar para arrojar luz sobre el rendimiento y la robustez del sistema de control. Estas ecuaciones indican claramente que, si el conjunto T_{set}^* es grande, entonces los márgenes de ganancia y fase son grandes, lo que conduce a una mejor robustez a costa de un rendimiento deficiente.

Metodología de evaluación

El óptimo T_{set}^* y los valores de IAE_d han sido determinados para diferentes modelos representativos y sirven como puntos de referencia para el rendimiento del sistema de control. La configuración del controlador que minimiza los criterios T_{set}^* e IAE_d se determinó mediante la caja de herramientas de optimización de MATLAB.

Tabla 2. Clases de rendimiento para control PI.

Class	Dimensionless settling time T_{set}^*	Overshoot α [%]
High performance	$T_{set}^* \leq 4.6$	–
Fair/Acceptable performance	$4.6 < T_{set}^* \leq 13.3$	–
Excessively sluggish	$T_{set}^* > 13.3$	≤ 10
Aggressive/Oscillatory	$T_{set}^* > 13.3$	> 10

Para cuantificar hasta qué punto un controlador de PI proviene del mejor rendimiento alcanzable e identificar bucles de control de bajo rendimiento, se definen diferentes clases de rendimiento, como se indica en la Tabla 2. Sin embargo, esta definición puede tranquilizar en un único límite si se favorece un índice de rendimiento sobre otro. La estrategia de evaluación puede interpretarse de la siguiente manera:

- Un valor de rebasamiento de 10 % se utiliza para distinguir entre los controladores excesivamente lentos y mal sintonizados. Una característica de un controlador desintonizado es que tiene poco o ningún rebasamiento. Ningún rebasamiento es una indicación definitiva de un control lento. por lo tanto, Si $\alpha > 10$ % y se superan los límites superiores del conjunto T_{set}^* y de IAE_d , entonces se considera que el controlador está mal ajustado. De hecho, se puede aplicar un límite de $\alpha \leq 10$ % independientemente de los valores de los índices de rendimiento normalizados.
- Si se desea el mejor rendimiento alcanzable del control PI, el controlador debe volver a ajustarse si los valores de índice calculados están fuera de los de la clase de alto rendimiento. Además, determinar si un controlador tiene

el mejor rendimiento alcanzable es útil, porque si este límite ideal no cumple con las especificaciones de fabricación, a continuación, volver a ajustar el controlador PI no resolverá el problema. En esta situación, habría que tener en cuenta un controlador más avanzado, como un controlador predictivo de modelo.

Además, las relaciones aproximadas en las ecuaciones 6 y 7 se pueden utilizar para determinar los puntos de referencia de robustez para el nivel actual de rendimiento. El procedimiento de evaluación puede resumirse en el siguiente procedimiento.

Evaluación del rendimiento basada en el tiempo de liquidación sin dimensiones.

1. Realice un experimento de paso de consigna con el bucle cerrado.
2. Identifique los valores del retardo de tiempo aparente T_a , el tiempo de liquidación T_{set} y el exceso de datos de salida recopilados.
3. Calcular el tiempo de liquidación normalizado T_{set}^* valor establecido.
4. Utilice la Tabla 2 para evaluar el rendimiento del control.
5. Calcule los valores correspondientes del margen de ganancia A_m y el margen de fase φ_m (Ecuaciones 6 y 7) y evalúe la compensación de rendimiento-robustez.

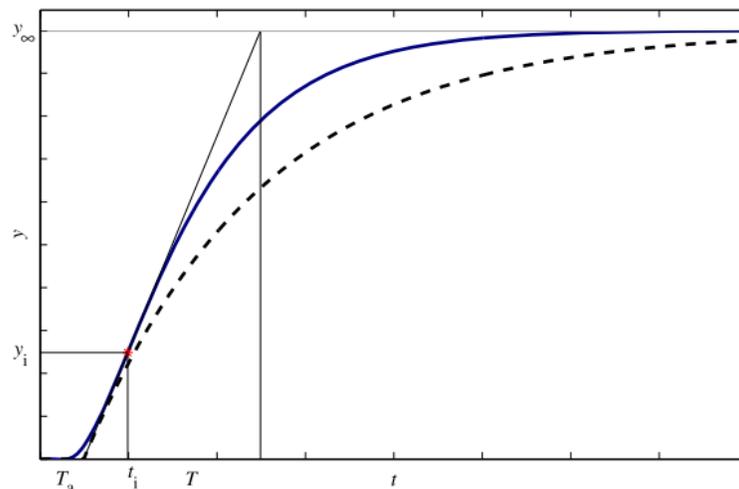


Figura 8. Aproximación al escalón usando el método (Mohieddine Jelali) [1]

Determinación del retardo de tiempo a partir de la respuesta escalonada

Un punto clave en la evaluación del rendimiento basado en el tiempo de liquidación sin dimensiones es la determinación del retardo de tiempo aparente T_a . Para ello, la respuesta de paso se aproxima mediante un Modelo FOPTD o un modelo de segundo orden más retardo de tiempo (SOPTD) dependiendo del comportamiento de amortiguación. Primero se evalúa una aproximación SOPTD. Si el valor del coeficiente de amortiguación es mayor que la unidad, se utiliza un modelo FOPTD.

$$G(s) = \frac{K_p e^{-T_a s}}{\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2D}{\omega_0^2} s + 1}$$

Ecuación 8. Modelo de segundo orden más retardo de tiempo (SOPTD).

Aproximación FOPTD

Cuando la respuesta del sistema está sobre amplificada, es suficiente para aproximar la respuesta de paso por un FOPTD. Hay muchos métodos para generar tales aproximaciones. Uno de los primeros métodos, el método tangente, fue descrito por Ziegler y Nichols [1] para sistemas con respuestas de paso esenciales esencialmente monótono.

Aproximación SOPTD

Esta es la opción correcta cuando la respuesta escalonada está suba-amortiguada. Esta técnica pertenece a aquellos que implican permitir que $y(t)$ y su aproximación modelo se intersequen en dos a cinco puntos, incluyendo el punto de inflexión (t_i, y_i) y el primer pico (t_{p1}, y_{p1}) , como se muestra en la Figura. En el contexto de la evaluación del responsable del tratamiento basada en los datos de respuesta de consigna, se da la conclusión que el método de aproximación de tres puntos de Rangaiah y Krishnaswamy [1] es el enfoque más fiable.

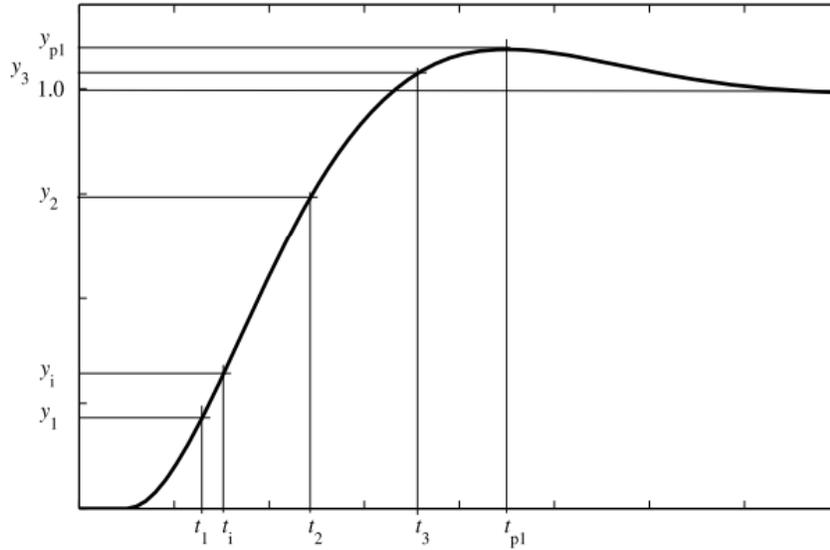


Figura 9. Puntos de datos típicos de respuesta al escalón (Mohieddine Jelali) [1]

El punto máximo se utiliza para calcular el M_{p1} máximo y el coeficiente de amortiguación D como respectivamente.

$$M_{p1} = \frac{y_{p1} - y_{\infty}}{y_{\infty}}$$

Ecuación 9. Punto Máximo

$$\hat{D} = \sqrt{\frac{\ln^2 M_{p1}}{\pi^2 + \ln^2 M_{p1}}}$$

Ecuación 10. Coeficiente de amortiguamiento

Ahora que se dispone de una estimación de D , la tarea se reduce a un problema de estimación de dos parámetros T_a y T con el fin de lograr un buen ajuste del modelo. Para ello, la respuesta escalonada se normaliza a un beneficio de unidad ($y^*(t)$) y con respecto a T e $t^* = (t - T_a) / T$. El método de tres-puntos requiere valores de (t_{p1}^*, y_{p1}^*) , (t_i^*, y_i^*) y (t_2^*, y_2^*) se realiza el siguiente procedimiento.

Procedimiento

Estimación de parámetros de segundo orden más retardo de tiempo utilizando el método de tres-puntos de Rangaiah y Krishnaswamy [1].

1. Localizar el primer pico (t_{p1}, y_{p1}) de la respuesta medida del sistema y estimar la relación de amortiguación a partir de las ecuaciones 10 y 11.

2. Calcular y_i^* de una expresión analítica derivada

$$y_i^* = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\hat{D}}} e^{(-\frac{1}{\sqrt{1-\hat{D}}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\hat{D}}}{\hat{D}}) \sin(2 \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\hat{D}}}{\hat{D}})}$$

Ecuación 11. Expresión analítica derivada

La correspondiente t_i^* de la respuesta medida del sistema

$$t_i^* = \frac{1}{\sqrt{1-\hat{D}}} \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\hat{D}}}{\hat{D}}$$

*Ecuación 12. Respuesta correspondiente a t_i^**

3. Estimación y_2^* de la relación empírica

$$y_2^* = 1.8277 - 1.7652\hat{D} + 0.6188\hat{D}^2$$

*Ecuación 13. Estimación y_2^**

t_2^* correspondiente de la respuesta medida del sistema

$$t_2^* = 3.4752 - 1.3702\hat{D} + 0.1930\hat{D}^2$$

*Ecuación 145. Estimación t_2^**

4. Evaluación de \hat{T} De

$$\hat{T} = \frac{t_2 - t_i}{t_2^* - t_i^*}$$

Ecuación 16. Evaluación de \hat{T}

A continuación, se obtiene una estimación del retraso de tiempo de \hat{T}_a

$$\hat{T}_a = t_i - t_i^* \hat{T}$$

Ecuación 17. Evaluación de \hat{T}_a

Se tiene en cuenta, este método de aproximación es especialmente adecuado para procesos de amortiguación inferior a, $0.4 < D < 0.8$.

Fuera de estos rangos se usan los siguientes parámetros:

- (i) para $D < 0.4$, es decir, cuando las oscilaciones son significativas, se puede realizar el método de Yuwana y Seborg.
- (ii) para $D > 0.8$, es decir, cuando la respuesta es lenta, se recomienda el método de Rangaiah y Krishnaswamy.

Índice inactivo para detectar el control lento

El ajuste muy conservador, generalmente con la configuración fija del controlador, a menudo se establece en la industria de procesos debido a la falta de tiempo para optimizar los controladores durante la puesta en marcha de los sistemas de control. Cuando las condiciones de funcionamiento cambian, esto resulta en un control lento y, por lo tanto, se mantienen desviaciones innecesariamente grandes y largas del Set-Point. Por lo tanto, a menudo es beneficioso detectar bucles de control lentos utilizando métodos personalizados para este propósito.

A continuación, se indican un sistema de conceptos básicos que contribuyen los elementos que sostienen el sentido de aquellos elementos que intervienen en el proceso de la investigación, como:

DIAGRAMA DE BLOQUES. Se llama diagrama de bloques al gráfico que muestra cómo funciona a nivel interno un sistema.

Un diagrama de bloques de procesos, también llamado diagrama de bloques funcional es aquel diagrama que muestra simultáneamente los diferentes procesos de un sistema [40].

INGENIERÍA DE CONTROL. La teoría de control formula leyes matemáticas para describir el comportamiento dinámico de sistemas físicos conforme a ciertas especificaciones y restricciones del propio proceso y su estudio es la esencia para el desarrollo y automatización de procesos industriales. El control automático nos brinda las bases para realizar una automatización industrial donde se busca obtener el funcionamiento óptimo de cualquier sistema dinámico [44].

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA. Es una representación en el plano s de un sistema físico que puede ser descrito por ecuaciones diferenciales ordinarias con coeficientes constantes. La función de transferencia de un sistema lineal se define como la relación entre la transformada de Laplace de la variable de salida con la transformada de Laplace de la variable de entrada, y se supone que todas las condiciones iniciales son cero [45].

GUIDE (Graphical User Interfase Development Environment). Es un juego de herramientas que se extiende por completo en el soporte de MATLAB, diseñadas para crear GUIs (Graphical User Interfaces) fácil y rápidamente, prestando ayuda en el diseño y presentación de los controles de la interfaz, reduciendo la labor al grado de seleccionar, tirar, arrastrar y personalizar propiedades [56].

MANUFACTURA. Una manufactura es un producto industrial, es decir, es la transformación de las materias primas en un producto totalmente terminado que ya está en condiciones de ser destinado a la venta en algún mercado, o sea cotiza en el mercado correspondiente [43].

MATLAB. Es un lenguaje de programación desarrollado por MathWorks. Comenzó como un lenguaje de programación de matriz donde la programación de álgebra lineal era simple. Se puede ejecutar tanto en sesiones interactivas como como un trabajo por lotes [57].

PERTURBACIÓN. Es cualquier variable (interna o externa) que ocasiona que la variable de control se desvíe del punto de control [46].

PLANTAS. Una planta se considera una parte de un equipo, o un conjunto de partes de una máquina que funcionan juntas, el propósito de este conjunto es ejecutar una operación particular [47].

PROCESOS. Es una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden uno al otro en una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria progresiva que consiste en una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinados [48].

PROCESO DE FABRICACIÓN. Un proceso industrial o proceso de fabricación es el conjunto de operaciones unitarias necesarias para modificar las características de las materias primas [49].

SISTEMAS. Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no necesariamente es físico. El concepto de sistema se aplica a fenómenos abstractos y dinámicos, tales como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse como una implicación de sistemas físicos, biológicos, económicos y similares [50].

VARIABLE CONTROLADA Y VARIABLE MANIPULADA. La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida (el resultado) del sistema [44].

3.2.2 MARCO LEGAL

Tomando como punto de partida, la certificación ISO vigente desde el año 2015 donde cobija a las empresas u organizaciones que desarrollan y mejoran el rendimiento, con el fin de demostrar un alto nivel de calidad en el producto final [51].

Procedimientos para tener en cuenta para lograr tal certificación son:

- Operación eficiente
- Cumplir los requisitos reglamentarios y estatutarios
- Tener un mercado amplio sin límites
- Identificar los riesgos y abordarlos (SST)

Las leyes establecidas en la constitución colombiana, plantea a las empresas el deber tener medidas adecuadas para implementar un sistema de ahorro de energía, las oscilaciones de la producción de una empresa causan variaciones sobre este sistema de ahorro debido a que la energía consumida es mayor y puede ocasionar incumplimiento en el decreto número 2331 del año 2007 [51], El cual establece una medida tendiente al uso racional y eficiente de energía eléctrica se debe obtener las licencias del software que puede ser libres o con un valor estipulado.

SOFTWARE	VERSION	L.ANUAL	L.PERMANENTE
MATLAB	STANDARD	USD 950	USD 2400
MATLAB	EDUCATION	USD 280	USD 550
MATLAB	HOME	USD 95	-
MATLAB	STUDENT	USD 29 USD 55 (SUITE)	-
SCILAB	SCILAB 6.0.2	LIBRE	LIBRE
OCTAVE	GNU OCTAVE 5.1.0	LIBRE	LIBRE

Tabla 1. licencias de software (Fuente propia).

La ley colombiana posee un decreto con el fin de proteger las licencias que poseen un valor en el mercado (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” [52].

Ofrecer productos de calidad con estableciendo fiabilidad y sostenibilidad sobre este mismo con el fin de mantener y mejorar su cuota de mercado es la obligación de las empresas, como lo indica la ISO 9001, es la que permite la gestión de la calidad obteniendo un proceso continuo que serían implementación, mantenimiento y mejora [53].

Los procesos continuos que maneja una empresa o una industria serán los grandes beneficiados, obtendrán un sistema de gestión de la calidad y de mejora en su rendimiento, el cual permitirá brindar un mejor nivel y posicionarse nacional e internacionalmente [54].

“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” [55]. Decreto Reglamentario 3683 de 2003

4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

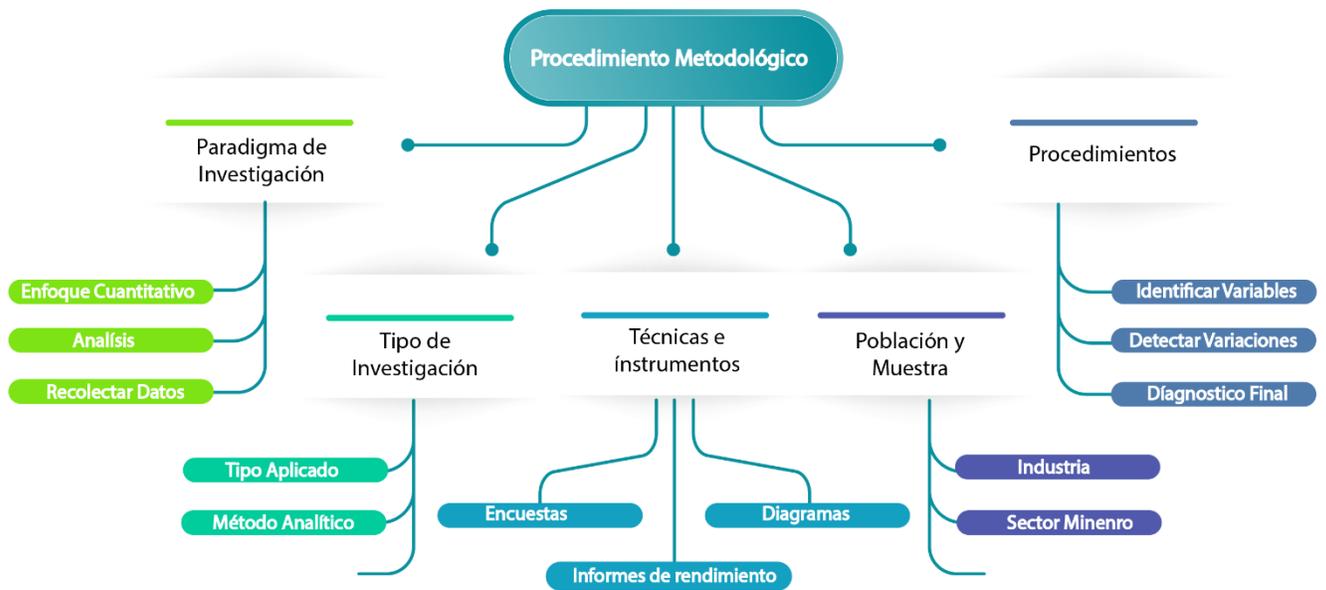


Figura 10. Procedimiento Metodológico (Fuente propia)

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. PARADIGMA

Llegados a este punto se prosigue al análisis de investigación, se plantea que el paradigma de investigación es de tipo cuantitativo, debido a que favorece en la recolección de datos teóricos para así aplicarlo en los sistemas de control afectado.

Indicar cuales son las variables para juzgar el rendimiento de control basado en cambios escalonados en los puntos de ajuste o perturbaciones de carga. Al analizar una respuesta del set points, los criterios utilizados para describir qué tan bien responde el proceso al cambio pueden incluir el tiempo de subida, el tiempo de sedimentación, la relación de descomposición, el exceso y el error de estado estable.

Este estudio se hace estadísticamente con la asistencia de la herramienta computacional que permite diseñar y recolectar los datos de los sistemas de control, para así de manera estadística obtener sus respectivas soluciones.

4.3. TIPO DE INVESTIGACION

El tipo de investigación va dirigido de manera aplicado, debido a que toman datos teóricos como también datos reales obtenidos por empresas. Estos antecedentes serian estudiado por la herramienta computacional que permitirá

Primero se harán ciertos estudios teóricos, 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.

4.4. METODO DE LA INVESTIGACIÓN

El método usado para la investigación es analítico, ya que este es un método que puede ayudar a conocer mejor los procesos estudiados y sus características, para poder comprender correctamente su comportamiento, explicar y crear teorías nuevas. También se llevó el análisis de las diferentes evaluaciones determinísticas en los sistemas de control.

4.5. 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).

FUENTE Y TECNICAS DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN

Las técnicas utilizadas en la recolección de información se encuentran en la base de datos de un repositorio donde se usaron encuestas, observaciones e información relacionada con el tema. 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.

PLAN DE TABULACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Se recopila la información de tres métodos para la evaluación del rendimiento de control basados en criterios deterministas: el tiempo de liquidación y los índices IAE

obtenidos a partir de los datos de respuesta de punto de consigna, el índice inactivo la detección del control lento y el índice de área para evaluar el rendimiento determinista de rechazo de perturbación de carga.

4.6. 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.

4.7. 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.

4.8. 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 sistema de control. Esta tabulación se dará mediante análisis estadístico de manera computacional con la ayuda de herramientas.

4.9 CRONOGRAMA – PLAN DE TRABAJO

Tabla 3. Plan de trabajo (Fuente propia)

 Universidad Autónoma del Caribe Proyecto de Grado - Ingeniería Mecatrónica CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES 				
Componentes	Descripción	Fecha Inicio	Fecha Final	Duración (Días)
Planeación del Proyecto	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL DE OPTIMIZACIÓN DEL RENDIMIENTO A TRAVÉS DE TÉCNICAS DETERMINÍSTICAS PARA LOS CONTROLADORES	3/02/2020	5/06/2020	123
Ingresar las fases de Opción de grado I	Anexo en el libro 1 de fases de opción de grado.			
OBJETIVO 1	Identificar un software adecuado para el desarrollo de la herramienta de evaluación determinística de los procesos industriales.	4/05/2020	31/05/2020	31
Entregable # 1	Informe comparativo de los diferentes softwares (herramienta computacional)	4/05/2020	18/05/2020	18%
Actividad 1	Recopilación de los software usados para el desarrollo de métodos deterministas.	4/05/2020	8/05/2020	5%
Tarea1	Busqueda de los tipos de software creados en la historia del desarrollo de la computación	8/05/2020	10/05/2020	2%
Tarea2	Busqueda bibliografica de software implementados en proyectos de ingeniería	10/05/2020	12/05/2020	2%
Actividad 2	Cuadro de costo/beneficio para la selección del software más adecuado.	12/05/2020	15/05/2020	4%
Tarea1	Recopilación de las licencias de software	14/05/2020	15/05/2020	2%
Tarea2	Librería de los software libres	15/05/2020	16/05/2020	1%
Actividad 3	Selección del software adecuado para la implementación las técnicas seleccionadas.	16/05/2020	17/05/2020	1%
Tarea1	Adquisición del software matlab	17/05/2020	18/05/2020	1%
Entregable # 2:	Pruebas pilotos del software e interfaz grafica	18/05/2020	31/05/2020	13%
Actividad 4	Revisión bibliográfica de antecedentes de proyectos similares	18/05/2020	19/05/2020	1%
Tarea1	Recopilación de proyectos similares en base de datos	19/05/2020	21/05/2020	2%
Tarea2	Validación de herramientas encontradas	21/05/2020	22/05/2020	1%
Actividad 5	Pruebas del entorno de GUI - Interfaces Gráficas de Usuario MATLAB	22/05/2020	26/05/2020	4%
Tarea1	Manejo y programación de una Gui	26/05/2020	28/05/2020	2%
Tarea2	Ejemplos de programación de una Gui	28/05/2020	31/05/2020	3%
OBJETIVO 2	Realizar análisis comparativo de métodos deterministas para la evaluación del rendimiento de los sistemas de control en los procesos continuos.	1/06/2020	1/07/2020	31%
Entregable # 3	Documentación de las técnicas seleccionadas	1/06/2020	15/06/2020	4%
Actividad 6	Familiarización de los métodos deterministas, bases y fundamentos teóricos en la herramienta	1/06/2020	3/06/2020	5%

5 PRESUPUESTO

5.1 PRESUPUESTO GENERAL

En las siguientes tablas se presentan los valores presupuestados para realizar este proyecto:

Tabla 4. Presupuesto general.

	FORMATO DE PRESUPUESTO PARA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN CONVOCATORIAS INTERNAS				GI-02-PR-03- F02
					Versión 1
					12/06/2019
PRESUPUESTO GENERAL DEL PROYECTO					
RUBROS	Fuentes de Financiamiento				Total
	Vicerrectoría de Investigaciones y transferencia	INVESTIGADORES	Otras fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1. Personal Científico	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 60.270.144	\$ 60.270.144
2. Personal de Apoyo	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 520.000	\$ 80.316	\$ 600.316
3. Consultaría especializada y Servicios Técnicos externos	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 2.000.000	\$ 0,00	\$ 2.000.000
4. Materiales e Insumos	\$ 0,00	\$ 8.120.755	\$ 300.000	\$ 0,00	\$ 8.420.755
5. Trabajo de Campo	\$ 0,00	\$ 1.000.000	\$ 2.000.000	\$ 0,00	\$ 3.000.000
6. Equipos	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 3.000.000	\$ 0,00	\$ 3.000.000
7. Bibliografía	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 120.000	\$ 0,00	\$ 120.000
8. Material de difusión y Promoción de resultados	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 6.000.000	\$ 0,00	\$ 6.000.000
TOTAL, PRESUPUESTO DEL PROYECTO	\$ 0,00	\$ 9.120.755	\$ 13.940.000	\$ 60.350.460	\$ 83.361.142

5.2 PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO

Tabla 5. 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. José García Rolando	Invest. Principal	Titular	\$ 46.666	12	48	Ing. mecatrónica	\$ 26.879.616	\$ 26.879.616
4. Juan Vargas Sánchez	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 6. 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. Adalberto Iglesias	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 7. 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 8. 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.Investigacion 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 9. Costo trabajo de campo

5. SALIDAS DE CAMPO									
Descripción	Lugar	No. de Días	No. de Personas	Costo/día por persona	Fuentes de Financiamiento				SUB-TOTAL
					Vicerrectoría de Investigación y Transferencia	Facultad / Programa	Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	
1.Verificacion 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.Validacion 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 10. Costo equipos usados

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 software tiene como objetivo establecer un modelo adecuado para la herramienta computacional a través de tres métodos, como se puede observar en la figura 12 el GUI® de MATLAB® incluye una tabla, con la función de conocer los datos del sistema a analizar, posteriormente se debe graficar tanto el sistema total para determinar estabilidad o inestabilidad y observar el rendimiento de los controladores.

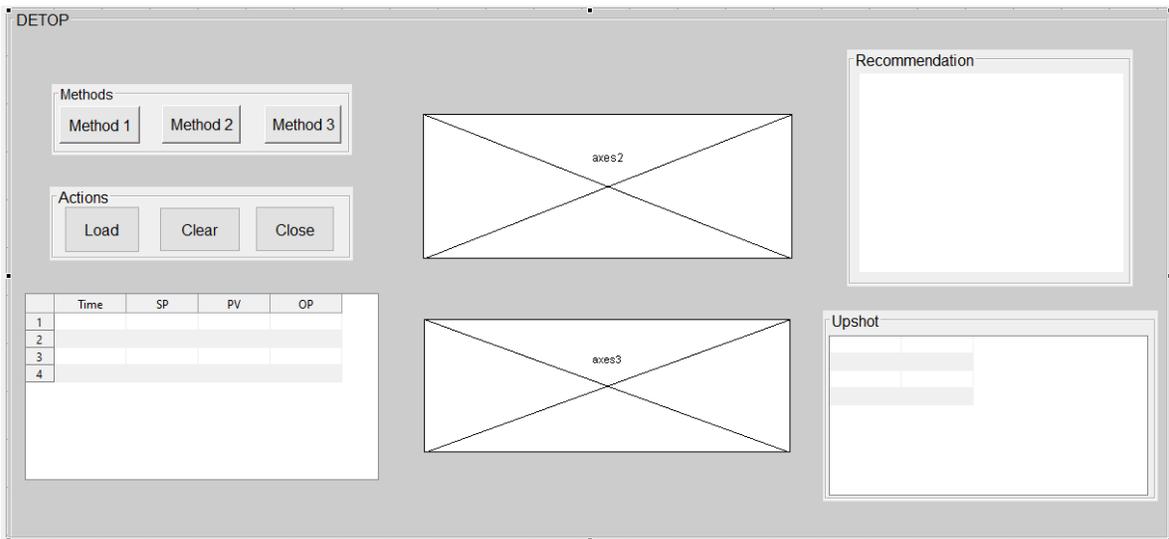


Figura 12. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (Propia autoría).

Se logra visualizar en la figura 12 que la interfaz cuenta con: 6 Push Button situados grupos de 3 en un panel, el primer panel titulado Methods, y 3 en el siguiente panel, titulado Actions. Cuenta con 2 Tables en las cuales en una Table se registran los datos suministrados por la empresa y en la siguiente Table, contenida den un Panel titulado Upshot, se registran los resultados adquiridos por los diferentes métodos. Además, cuenta con 2 Axes donde se grafican las variables que intervienen en los procesos, suministrados por la empresa, para poder visualizar con facilidad como es el comportamiento de los controladores. Y para ayudar al usuario esta interfaz

contiene un Static Text, titulada Recommendation, con la función de orientar y aconsejar al usuario sobre el comportamiento y la respuesta de cada método.

En las figuras 13 se muestra la interfaz totalmente vacía, se espera a cargar los datos que suministre la empresa para su evaluación.

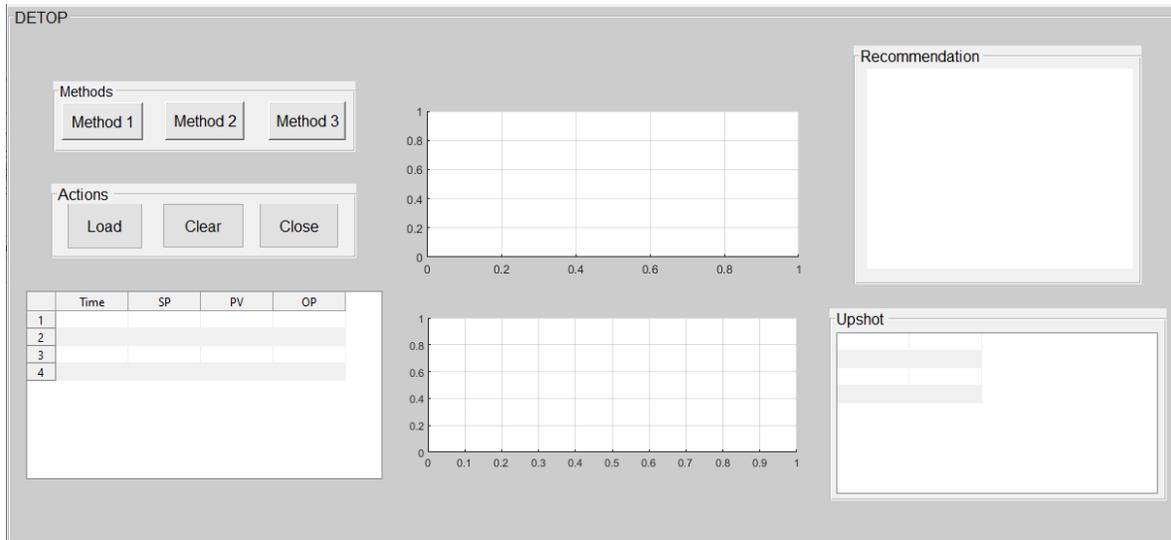


Figura 13. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (Propia autoría)

En la figura 14 se puede observar la interfaz cargada con los datos suministrados por la empresa. Se observan en las gráficas, cómo se comportan las viables respecto al tiempo, se muestran los valores de las variables en la Table 1, el cuadro presente en la izquierda inferior. Además, se muestra el nombre de los métodos en el cuadro de Recommendation, en la parte superior derecha, para orientar al usuario que método desea realizar.

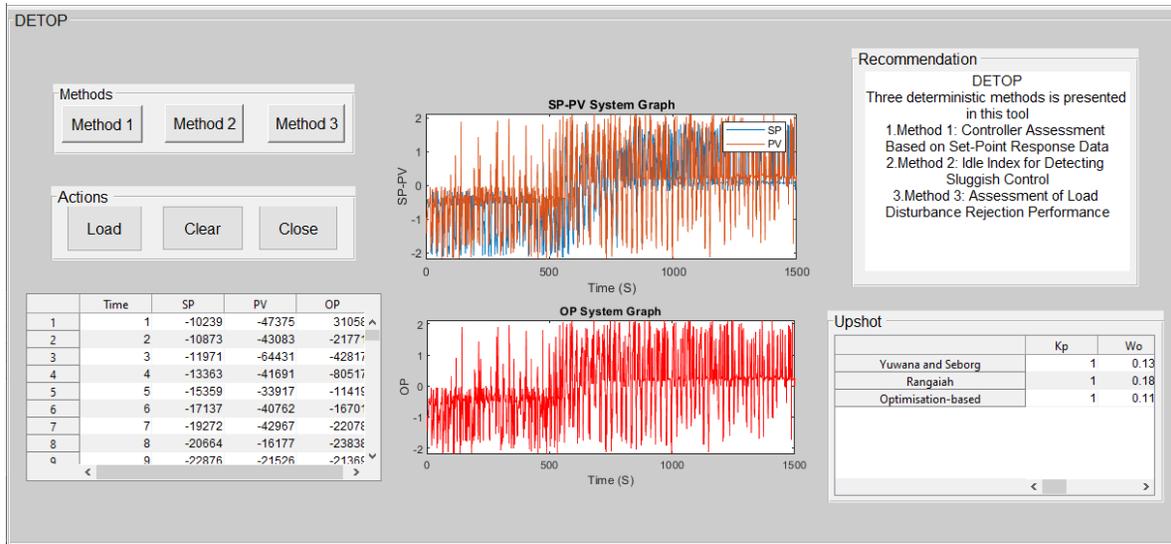


Figura 14. Prototipo del diseño de la interfaz gráfica. (propia autoría).

6.2 DISEÑO DISPOSITIVO FINAL

En la figura 15 y 16 se puede observar el funcionamiento del GUI, enlazando los datos con la interfaz. Así mismo se puede visualizar la detección del rendimiento de los controladores.

Se observa en la figura 15 la primera imagen de la interfaz después de haber cargado los datos suministrados por la empresa para su análisis y evaluación.

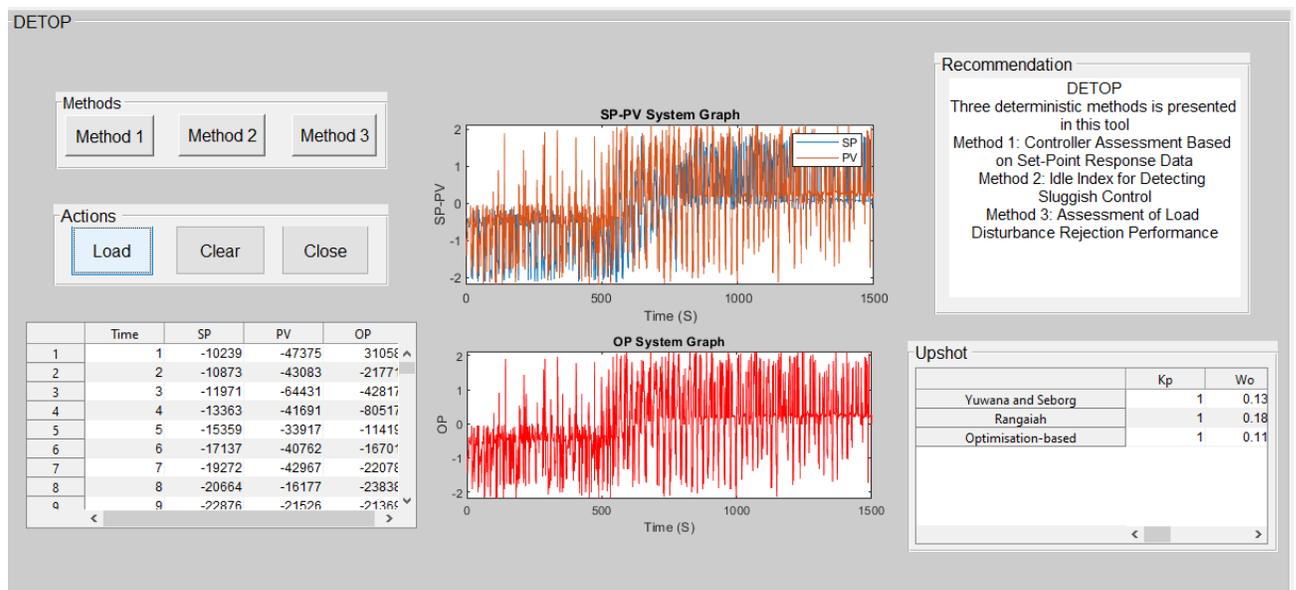


Figura 15. Respuesta final de un sistema estable. (propia autoría).

En la figura 16 se puede observar el diseño del GUI para detección de oscilaciones, de esta manera podrá analizar de su comportamiento. Incluso se puede observar la aplicación del método FOPDT, en donde se indica la amplitud, en términos de rendimiento del controlador y su estabilidad con respecto al tiempo del Set Point.

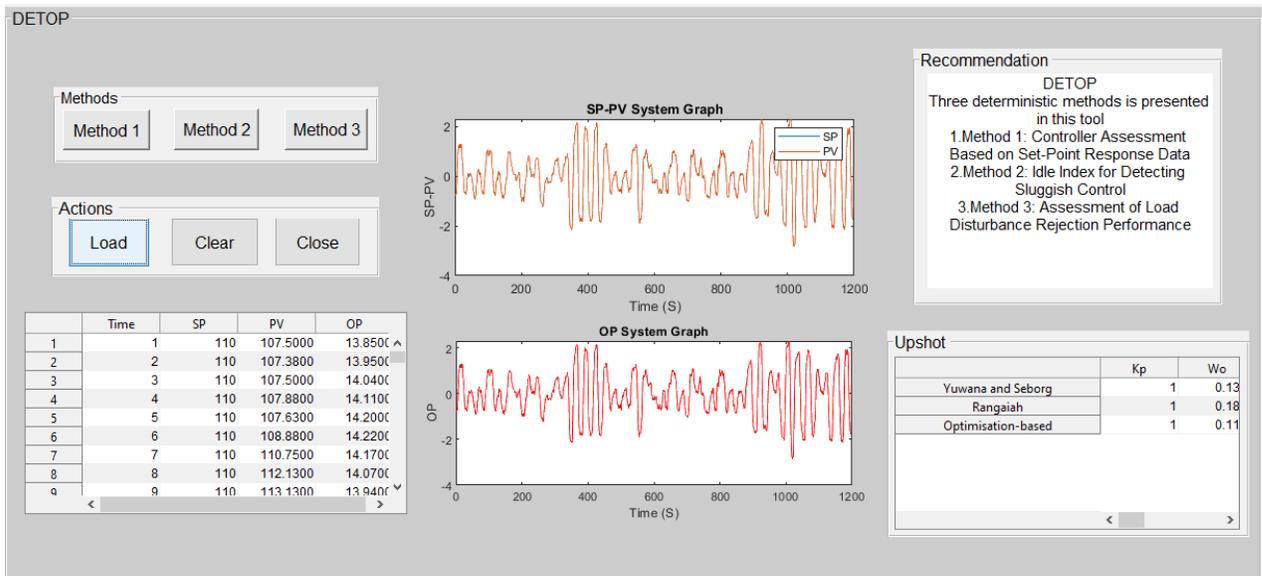


Figura 16. Sistema datos defectuosos. (propia autoría).

6.3 MATERIALES

Para el desarrollo de este proyecto se utilizaron una serie de herramientas y técnicas de control para obtener una herramienta computacional adecuada, a saber:

Para dar el cumplimiento al primer objetivo inicial de este proyecto MATLAB es la herramienta computacional seleccionada para la acción determinística del sistema, debido que presenta las siguientes particularidades:

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

MATLAB ® está optimizada para resolver problemas científicos y de ingeniería. El lenguaje de MATLAB está basado en matrices en la cual ayuda a expresar las matemáticas computacionales. Las gráficas integradas facilitan la visualización de los datos y la obtención de información a partir de ellos. MATLAB contiene una vasta biblioteca de herramientas (Toolboxes) integradas que permite empezar a trabajar inmediatamente con algoritmos esenciales.

- **GUI DE MATLAB:** Las GUI (interfaces gráficas de usuario o interfaces de usuario) dan acceso a un control sencillo de aplicaciones de software, lo cual sin conocer un lenguaje nos permite escribir y diseñar una aplicación. Las apps de MATLAB son programas autónomos de MATLAB con un frontal gráfico de usuario GUI que automatizan una tarea o un cálculo. La GUI incluye controles tales como menús, barras de herramientas, botones y controles deslizantes.

COMPUTADORES (PC)

6.3.1 MUESTRA POBLACIONAL

Los datos de prueba de la herramienta computacional son obtenidos desde el repositorio web de parte de SACAC (the South African Council of Automation and Control).

Tabla 11. 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

TIME: Tiempo de muestreo

SP: Set Point,

PV: Variable de proceso

OP: Salida del controlador

Los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 12. 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

Para el cumplimiento del segundo objetivo se comparan los diferentes métodos deterministas para la evaluación del rendimiento de los sistemas de control en los procesos continuos. Se hizo un estudio para la selección del software más adecuado para el desarrollo computacional de los métodos. El cual acata a MATLAB, por las características mencionadas anteriormente en la sección 6.3 (Materiales), ya que tiene un entorno de cálculo técnico de altas prestaciones que integra análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales y gráficos en un ambiente fácil de usar, donde los problemas y las soluciones son expresados como se escriben matemáticamente, sin la programación tradicional y permite crear apps de MATLAB con programas autónomos de con un frontal gráfico de usuario GUI que automatizan una tarea o un cálculo. A través de su GUI se pudo cumplir el tercer objetivo de este proyecto el cual MATLAB nos permite Integrar métodos deterministas para la evaluación del rendimiento de los sistemas de control en las maquinas industriales.

Los métodos seleccionados para la evaluación del rendimiento de los sistemas son tres métodos, identificados con los nombres de:

1. Controller assessment based on Set-point response data
2. Idle index for detecting sluggish control
3. Assessment of load disturbance rejection performance

La primera técnica evalúa el rendimiento de los controladores de PI a partir de datos de respuesta de Closed-loop para un cambio de paso de Set-point. Para ello, se utilizan dos índices de rendimiento sin dimensiones, el tiempo de sedimentación (Settling Time) y la integral normalizados del valor absoluto del error, cada variable es comparados con la información de la Tabla 2, para el análisis de del rendimiento de los sistemas.

La metodología identifica bucles de control de bajo rendimiento, como los que son excesivamente lentos. Esta técnica proporciona información sobre el equilibrio de rendimiento-robustez inherente, el margen de ganancia y el margen de fase.

La segunda técnica el índice inactivo es un indicador aparentemente simple para el control lento. Evalúa la acción del controlador debido a perturbaciones de carga significativas y escalonadas con un enfoque en el comportamiento transitorio del bucle de control.

La tercera técnica es comprobar, mediante la evaluación de una respuesta de perturbación de carga abrupta, si el ajuste del controlador PI adoptado garantiza un buen rendimiento de rechazo de perturbación de carga. De este modo, el criterio IAE se utiliza para garantizar una baja magnitud del error y una respuesta estable.

6.4.1 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS POR EL DISPOSITIVO FINAL

Para cumplir el cuarto y último objetivo de validez la funcionalidad de la herramienta computacional diseñada en entornos de simulación industriales. Se utiliza el siguiente archivo para validar el correcto funcionamiento de la herramienta computacional

Descripción 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 del proceso: A partir de los datos suministrados de la empresa se reconoció que hubo un sensor de vapor defectuoso en el circuito de flujo de vapor FC1. Este obedecía a un medidor de flujo de placa de orificio, realizado las indagaciones de este se identificó que no existía ningún orificio de drenaje de la placa, se dedujo que la placa no tuviera el efecto de condensado, se acumulara, y el líquido llegara hasta el límite de la medida del recipiente y 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.

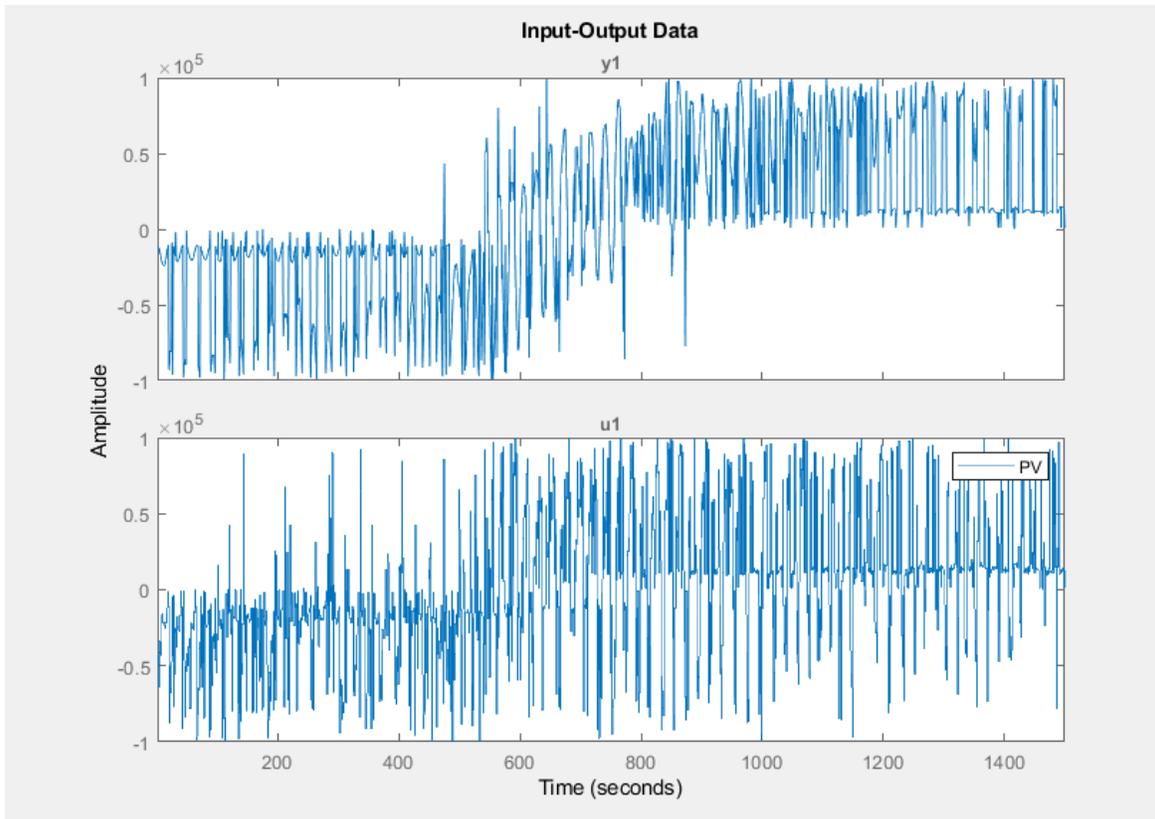


figura 17. Grafica de datos del sistema de prueba (propia autoría)

En la figura 17 se puede observar el comportamiento dinámico de los datos con respecto al tiempo, donde se muestra la variable SP (Set-point) en el 1 recuadro y la variable PV (Process Variable) en el 2 recuadro de la figura. Después de analizar el comportamiento dinámico se abre paso a la identificación del modelo matemático, este modelo ayuda a la identificación de los modelos del controlador a usar para la evaluación de los datos suministrados, para ello se analiza si la respuesta de paso se aproxima mediante un Modelo FOPTD o un modelo de segundo orden más retardo de tiempo (SOPTD), dependiendo del comportamiento de amortiguación del sistema. Primero se prueba una aproximación SOPTD. Y si el valor del coeficiente de amortiguación es mayor que la unidad, un modelo FOPTD puede ser suficiente. En base a la identificación del controlador se encontrará el valor de las variables necesarias para el desarrollo de los métodos haciendo uso de las formulas a tratar para evaluación y análisis en cada caso.

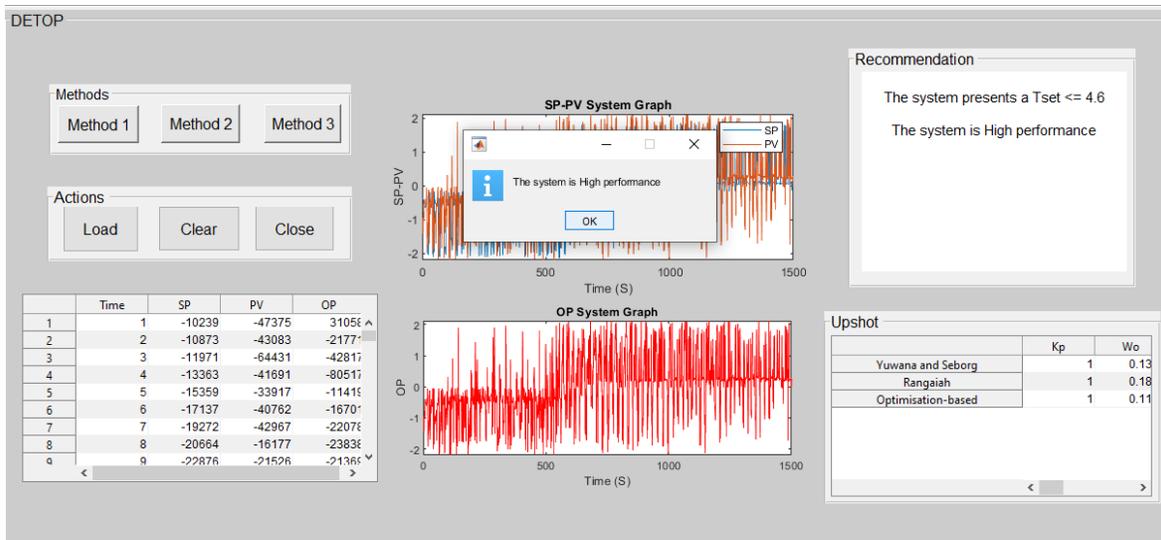


Figura 18. Diagnostico en planta con el método 1 (propia autoría).

Se implemento la herramienta GUI, para el análisis y la evaluación del controlador.

En la figura 18 se muestra la evaluación del primer método (1. Controller assessment based on Set-point response data) tomando en cuenta el rendimiento basado en el tiempo de liquidación sin dimensiones.

El cual tiene el siguiente procedimiento para desarrollar su evaluación:

1. Se realiza un experimento de Set Point con el bucle cerrado.
2. Se identifican los valores del tiempo muerto aparente T_a , el settling time T_{set} y el exceso de datos de salida recopilados.
3. Calcular el tiempo de liquidación normalizado T_{set}^* valor establecido.
4. Se utiliza la Tabla 2 para evaluar el rendimiento del control.
5. Se Calculan los valores correspondientes del margen de ganancia A_m y el margen de fase φ_m y se evalúan la compensación de rendimiento-robustez.

Se concluye como resultado en este sistema los valores:

$$T_a = 14.8$$

$$T_{set}^* = 3.0$$

$$IAE_d = 2.1$$

$$\alpha = 0$$

Como resultado de la evaluación muestra que el controlador tiene un alto rendimiento (High performance).

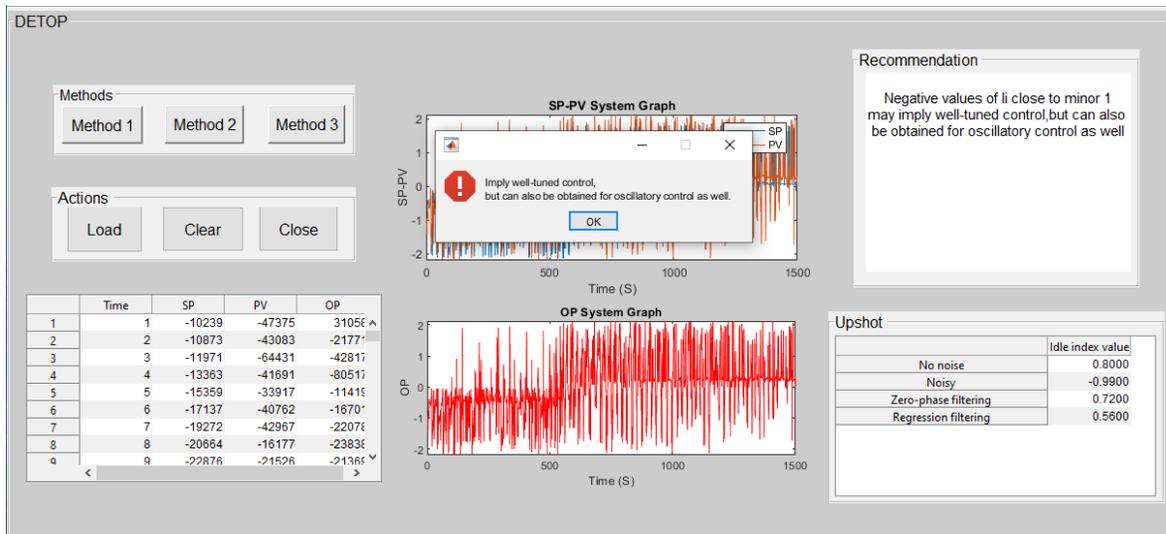


Figura 19. Diagnostico en planta con el método 2 (propia autoría).

El 2 método (Idle index for detecting sluggish control) aplicado a los datos suministrados, se muestra los resultados en la figura 19, donde se evalúa el termino l_i (índice inactivo), la cual describe la relación entre los tiempos de correlación positiva y negativa entre la señal de control y los incrementos de salida del proceso, (Δu y Δy). Para que se haga dicha evaluación se debe tener en cuenta las limitaciones en los intervalos de l_i , son de $[-1, 1]$, donde se considera un valor positivo de l_i cercano a 1, lo que significa que el control es lento. A su vez, los valores cercanos a 0 indican que la sintonización del controlador es razonablemente buena. Los valores negativos de l_i cercanos a -1 puede implicar un control bien ajustado, pero también se pueden obtener para el control oscilatorio.

Para realiza este método se lleva a cabo el siguiente procedimiento

- 1) Filtrado con
 - (a) filtro de paso bajo re-inicializado
 - (b) regresión lineal con re-inicialización
 - (c) denotación de ondas.
- 2) Exclusión de datos de estado estacionario.
- 3) La cuantificación.

El resultado de este método fue de $l_i = 1.2$ el índice inactivo es bueno el controlador está bien ajustado (Imply well-tuned control).

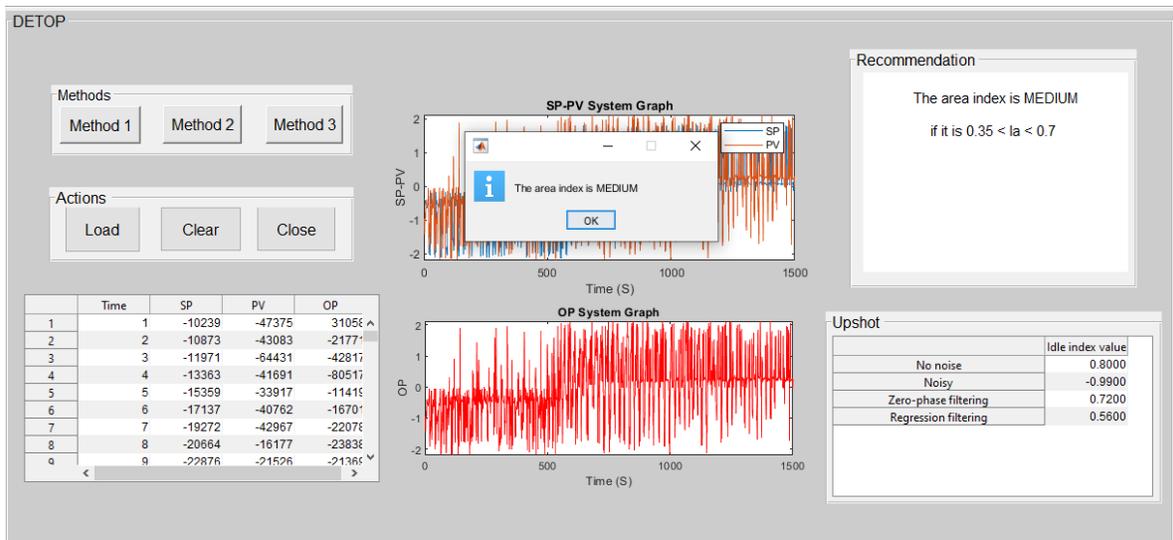


Figura 20. Diagnostico en planta con el método 3 (propia autoría).

Para el desarrollo del tercer método (Assessment of load disturbance rejection performance), que se muestra en la figura 20, la metodología que se propone es comprobar, mediante la evaluación de una respuesta de perturbación de carga abrupta, si el ajuste del controlador PI adoptado garantiza un buen rendimiento de rechazo de perturbación de carga. De este modo, el criterio IAE se utiliza para garantizar una baja magnitud del error y una respuesta estable los valores a considerar del índice de área (I_a) son:

- bajo si es menor que 0.35
- medio si es $0.35 < I_a < 0.7$
- alto si es mayor que 0.7.

En este método se analizan y comparan los valores de las variables de los anteriores métodos y se muestra el resultado de las variables obtenidas clasificándolas según sus evaluaciones

El valor de I_a en este sistema es de $I_a = 0.37$, lo que quiere decir que su índice de área es medio (MEDIUM).

Finalmente, la herramienta permite validar su funcionamiento en un entorno industrial utilizando los requisitos de evaluación de los 3 métodos, con la información suministrada de la base datos sensor-F-oilgas-thornhill-2007.csv, el cual cumple con el objetivo 4.

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 DETOP.

Del estudio comparativo presentado da a la conclusión del objetivo de control, incluido el tipo esperado de perturbaciones, del bucle debe guiar la selección del método de evaluación adecuado. En otras palabras, al evaluar un controlador con los diferentes métodos, se puede ver directamente con qué propósito el bucle de control realmente se ha ajustado.

Esta combinación proporciona una manera eficiente de evaluar el ajuste de los controladores PI con respecto al rendimiento de rechazo de perturbación de carga. Se ha demostrado que los tres índices juntos dan una valiosa indicación sobre cómo los parámetros del controlador de PI, es decir, la ganancia proporcional y el tiempo integral, deben modificarse para lograr un mejor rendimiento.

Debido a que el sistema implementa tres métodos los cuales evalúan distintas variables con el fin de diagnosticar el comportamiento del controlador.

Se creó un manual completo para el manejo del dispositivo, con recomendaciones específicas para un buen uso de este, la cual se puede encontrar en los **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

CONCLUSIONES

La herramienta computacional DETOP satisface el objetivo general de este proyecto, ya que presenta un diagnóstico para la evaluación del desempeño de los lazos de control utilizando métricas determinísticas.

Esta herramienta tiene como funcionalidad la optimización del rendimiento de los controladores, la cual presenta el análisis y la comparación de tres métodos de evaluación deterministas:

- 1) Controller assessment based on Set-point response data
- 2) Idle index for detecting sluggish control
- 3) Assessment of load disturbance rejection performance

Estos métodos fueron desarrollados en la GUI® como se muestran en las figuras 18, 19 y 20; con la información suministrada podemos concluir lo siguiente:

El primer método 1 (Controller assessment based on Set-point response data) es uno de los más completos y precisos que se desarrollan para la evaluación de los sistemas, ya que se orienta en comparar el rendimiento alcanzado del sistema con el de un controlador PI sintonizado con la regla IMC basada en un modelo de proceso FOPTD. Se identifica si la su respuesta de paso se aproxima mediante un Modelo FOPTD o un modelo de segundo orden más retardo de tiempo (SOPTD) dependiendo del comportamiento de amortiguación.

Para cuantificar hasta qué punto un controlador de PI proviene del mejor rendimiento alcanzable e identificar bucles de control de bajo rendimiento, se utiliza los valores obtenidos de T_{set}^* , IAE_d , márgenes de ganancia A_m y el margen de fase φ_m , para ser analizadas con la Tabla 2 de parámetros de rendimientos del controlados, para reconocer el comportamiento del sistema a evaluar.

Estos valores indican si el conjunto T_{set}^* es grande, entonces los márgenes de ganancia y fase son grandes, lo que conduce a una mejor robustez a costa de un rendimiento deficiente.

El 2 método (Idle index for detecting sluggish control) se concluye que el I_i (índice inactivo) es un indicador simple para el control lento. Evalúa la acción del controlador debido a perturbaciones de carga significativas y escalonadas con un enfoque en el comportamiento transitorio del bucle de control.

Para el 3 método (Assessment of load disturbance rejection performance), la metodología que se propone es comprobar, mediante la evaluación de una respuesta de perturbación de carga abrupta, si el ajuste del controlador PI adoptado garantiza un buen rendimiento de rechazo de perturbación de carga. Este método es más sencillo ya que tiene como relevancia las mismas cuestiones prácticas que deben tenerse en cuenta para el cálculo del índice inactivo, también se deben tener para el cálculo del índice de área.

Se ha demostrado que los tres índices juntos dan una valiosa indicación sobre cómo los parámetros del controlador de PI, es decir, la ganancia proporcional y el tiempo integral, deben modificarse para lograr un mejor rendimiento.

Se concluye que la herramienta computacional es muy eficaz para identificar bucles de control de bajo rendimiento, con el fin de notificar el mejor rendimiento alcanzable por los controladores.

La herramienta puede utilizarse en diferentes procesos que contengan sistemas de control, por su versatilidad y sencillez de utilizar. Además, la adquisición de datos que se pueden 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 optimizar el rendimiento de los controladores. Además, se garantizó que no fueran invasivas para así no alterar procesos, lo que hace que la herramienta describa el rendimiento del controlador.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mohieddine Jelali auth. Control Performance Management in Industrial Automation Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance
- [2] Swanda A, Seborg DE (1999) Controller performance assessment based on setpoint response data. In: Proc Amer control confer, San Diego, USA, pp 3863–3867
- [3] 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].
- [4] 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].
- [5] Dinero. La automatización será una realidad, Available [Online]: <https://www.dinero.com/emprendimiento/articulo/automatizacion-en-las-empresas-colombianas-en-el-2020-segun-deloitte/242846>
- [6] JUAN CARLOS SOLER, "ABC La actividad productiva de la industria" An application [Online]. Available: https://www.abc.es/economia/abci-produccion-industrial-espana-continua-desaceleracion-y-crece-06-por-ciento-2019-202002070928_noticia.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F
- [7] R. S. Patwardhan and M. Ruel, "Best Practices for Monitoring your PID Loops The Key to Optimizing Control Assets," 2008.
- [8] A. Leva, C. Cox, A. Ruano: Hands-on autotuning: a guide to better utilisation. IFAC Professional Brief, 2005. www.ifac-control.org/publications/pbrief.htm
- [9] B. Wittenmark, K.J. Åström, K.E. Årzén: Computer Control: an Overview. IFAC Professional Brief, 2005. www.ifac-control.org/publications/pbrief.htm
- [10] L. Desborough, R. Miller: Increasing customer value of industrial control performance monitoring – Honeywell’s experience. Sixth International Conference on Chemical Process Control, AIChE Symposium Series Number 326, vol. 98, 2002.
- [11] K.J. Åström, T. Hägglund: The future of PID Control. Control Engineering Practice, vol. 9 (2001), págs 1163-1175.

- [12] S.G. Akkermans, S.G. Stan: Digital servo IC for optical disk drives. *Control Engineering Practice*, vol. 9 (11) (2002), págs 1245-1253.
- [13] J.E. Jazni y colaboradores: Servoacelerómetro de 1 Grado de Libertad con Rebalanceo Electrónico Analógico. Comisión Nacional de Actividades Espaciales Instituto Universitario Aeronáutico, Córdoba, 2000.
- [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] K, G. B., A, S. R., & Radhakrishnan, T. K. (2018). Performance assessment of control loops involving unstable systems for set point tracking and disturbance rejection. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 85, 1-17. doi: 10.1016/j.jtice.2018.01.024
- [16] Kuehl, P., & Horch, A. (2005). Detection of sluggish control loops-experiences and improvements. *Control Engineering Practice*, 13(8), 1019-1025. doi: 10.1016/j.conengprac.2004.10.004
- [17] Hägglund, T. (1999). Automatic detection of sluggish control loops. *Control Engineering Practice*, 7(12), 1505-1511. doi:10.1016/S0967-0661(99)00116-1
- [18] Cao, S., & Rhinehart, R. R. (1995). An efficient method for on-line identification of steady state. *Journal of Process Control*, 5(6), 363-374. doi:10.1016/0959-1524(95)00009-F
- [19] Veronesi, M., & Visioli, A. (2012). Performance assessment and retuning of PID controllers for load disturbance rejection. Paper presented at the IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), , 2(PART 1) 530-535.
- [20] Yu, Z., Wang, J., Huang, B., Li, J., & Bi, Z. (2014). Design and performance assessment of setpoint feedforward controllers to break tradeoffs in univariate control loops. Paper presented at the IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), , 19 5740-5745.
- [21] Swanda, A. P., & Seborg, D. E. (1999). Controller performance assessment based on setpoint response data. Paper presented at the Proceedings of the American Control Conference, , 6 3863-3867.
- [22] Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576. doi:10.1109/TCST.2005.847331
- [23] Chen, D., & Seborg, D. E. (2002). PI/PID controller design based on direct synthesis and disturbance rejection. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41(19), 4807-4822. doi:10.1021/ie010756m
- [24] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2001). The future of PID control. *Control Engineering Practice*, 9(11), 1163-1175. doi:10.1016/S0967-0661(01)00062-4

- [25] 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/95>
- [26] D. J. Kozub, (1993), C.E. Garcia, (2016) Monitoring and diagnosis of automated controllers in chemical process industries. AIChE Meeting, St Louis, MI.
- [27] N. Stanfelj, T.E. Marlin, (1993) J.F. MacGregor, Monitoring and diagnosing process control performance: the single loop case, *Ind. Eng. Chem.*
- [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] Feigenbaum, A. V. (1994). *Control Total de la Calidad (Tercera Edición Revisada.)*. México: Compañía Editorial Continental, S. A de C. V.
- Fernández Fernández, A. (1993).
- [30] Groover, M.P., "Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing", Ed. Prentice Hall, International Editions, 1987.
- [31] SISTEMAS DIGITALES DE CONTROL DE PROCESOS, Sergio V. Szklanny y Carlos R. Behrends, Editorial Control, Buenos Aires, Argentina. 2º Ed., 2006.
- [32] 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.
- [33] INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL BÁSICO DE PROCESOS, José Acedo Sánchez, Madrid, España. Ediciones Díaz de Santos, 2006.
- [34]. 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.
- + [35] [Upcommons.upc.edu](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5), 2020. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3330/34059-5.pdf?sequence=5>. [Accessed: 22- Apr- 2020].
- [36] M. Jelali, *Control Performance Management in Industrial Automation*, Advances in Industrial Control, DOI 10.1007/978-1-4471-4546-2, © Springer-Verlag London 2013
- [37] Library of Congress Cataloging-in-Publication Data Dorf, Richard C. *Modern control systems* / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. — 12th ed. p. cm. ISBN-13:978-0-13-602458-3 ISBN-10:0-13-602458-0

- [38] Swanda A, Seborg DE (1999) Controller performance assessment based on setpoint response data. In: Proc Amer control confer, San Diego, USA, pp 3863–3867
- [39] 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].
- [40] "Controlador PID - Control Automático - Picuino", Picuino.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>. [Accessed: 22- Apr- 2020].
- [41]"Controlador PID - Control Automático - Picuino", Picuino.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>. [Accessed: 22- Apr- 2020].
- [42] "Solucionado: ¿Qué es un setpoint y un lazo de control?", YoReparo.com, 2020. [Online]. Available: <https://www.yoreparo.com/es/industria/automatizacion/preguntas/174797/que-es-un-setpoint-y-un-lazo-de-control>. [Accessed: 22- Apr- 2020].
- [43] Klir, G. and Yuan, B. [1995]. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. Upper Saddle River, NJ, US: Prentice Hall, 1995.
- [44] M. Jelali, Control Performance Management in Industrial Automation, Advances in Industrial Control, DOI 10.1007/978-1-4471-4546-2, © Springer-Verlag London 2013
- [45] Library of Congress Cataloging-in-Publication Data Dorf, Richard C. Modern control systems / Richard C. Dorf, Robert H. Bishop. — 12th ed. P Concept
- [46]"Definición de Manufactura", Definición ABC, 2020. [Online]. Available: <https://www.definicionabc.com/general/manufactura.php>. [Accessed: 27- Apr- 2020].
- [47]S. Giraldo, "▷ Control Automático Educación - [abril, 2020]", Control Automático Educación, 2020. [Online]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/>. [Accessed: 27- Apr- 2020].
- + [51] ISO 9001:2015(es) Sistemas de gestión de la calidad, Colombia www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9001:ed-5:v1:es
- [52] "DECRETO NUMERO 2331 DE 2007", Www2.igac.gov.co, 2007. [Online]. Available: http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/DECRETO23312007.pdf. [Accessed: 05- Oct- 2019].

- [53] Senado república de Colombia [2000] art. Ley 603 COLOMBIA, www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0603_2000.html.
- [54] SUMISETSU PHILIPPINES, INC. BECOMES THE FIRST ORGANIZATION TO BE ISO 9001:2015 CERTIFIED IN THE PHILIPPINES.
- [55]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].
- [56] Bibing.us.es, 2020. [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11986/fichero/CAP%C3%8DTULO+3%252FCAP%C3%8DTULO+3.pdf>. [Accessed: 30- May- 2020].
- [57]"MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico", La.mathworks.com, 2020. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. [Accessed: 30- May- 2020].
- [58] Bibing.us.es, 2020. [Online]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11986/fichero/CAP%C3%8DTULO+3%252FCAP%C3%8DTULO+3.pdf>. [Accessed: 30- May- 2020]
- [59] Ogata, Katsuhiko. Ingeniería de Control Moderna. Tercera edición. Editorial Prentice Hall.
- [60] Repositorio.unillanos.edu.co. 2020. [online] Available at: <https://repositorio.unillanos.edu.co/bitstream/001/1604/1/DISE%C3%91O%20Y%20CONSTRUCCION%20DE%20UNA%20HERRAMIENTA%20PARA%20LA%20SIMULACION%20DE%20LOS%20METODOS%20DE%20CONTROL%20PID%20Y%20SLIDING%20MODE%20CONTROL%20%28SMC%29%20APLICADO%20A%20UN%20MOTOR%20BLDC.pdf> [Accessed 12 November 2020].
- [61] M. Jelali, "An overview of control performance assessment technology and industrial applications," *Control Eng. Pract.*, vol. 14, no. 5, pp. 441–466, 2006.