

# DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA DETECTAR Y DIAGNOSTICAR OSCILACIONES EN SISTEMAS DE CONTROL

## Tabla de contenido

<u>Glosario</u>	3
<u>Resumen</u>	5
<u>Abstract</u>	6
<u>Introducción</u>	7
<u>Planteamiento del Problema</u>	9
<u>Antecedentes</u>	10
<u>Formulación del Problema</u>	13
<u>Justificación y Alcance</u>	13
<u>Objetivo General</u>	16
<u>Objetivos Específicos</u>	16
<u>Estado del Arte</u>	17
<u>Marco Teórico</u>	19
<u>Solución del Problema</u>	25
<u>Conclusión</u>	27
<u>Referencia</u>	28
<u>Figuras</u>	29

UNIVERSIDAD BERNARDO O'HIGGINS  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE MAGISTER INGENIERIA INFORMATICA  
SANTIAGO - CHILE  
2024

## Glosario

**Oscilaciones:** Se refiere a cualquier variación, perturbación o fluctuación en el tiempo de un medio o sistema.

**DCS (Sistema de Control Distribuido):** Constituye un conjunto integral de instrumentación, dispositivos de entrada/salida, dispositivos de control y dispositivos de interfaz de operador. Su funcionalidad va más allá de simplemente ejecutar tareas de control e indicación predefinidas. Además, permite la transmisión de información de control, medición y operación entre ubicaciones específicas definidas por el usuario. Esto se logra a través de enlaces de comunicación simples o múltiples, lo que contribuye a mejorar la eficiencia y la gestión de los procesos industriales.

**Válvula de control:** Es un dispositivo distinto de una válvula común (operada manualmente) o de una válvula de retención autoaccionada, diseñada para regular directamente el flujo de uno o más fluidos en corrientes de proceso.

**Variable de proceso:** Se utiliza para describir cualquier propiedad medible de un proceso, abarcando todas las variables que no son señales de instrumentos entre dispositivos en un lazo de control.

**Sintonizar:** Es el proceso de ajustar un receptor de ondas para que coincida con la frecuencia de transmisión de un emisor.

**Varianza:** Se define como una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos en relación con su media.

**Automatización:** Se trata de un sistema en el que se transfieren tareas de producción, normalmente realizadas por operadores humanos, a un conjunto de elementos tecnológicos.

**Perturbaciones:** Son alteraciones o trastornos que afectan el orden o las características permanentes de una cosa, o que interrumpen el desarrollo normal de un proceso.

**Controlador:** Dispositivo que regula una variable controlada de manera específica, variando su salida. Puede ser un instrumento analógico-autónomo, digital o equivalente a uno de estos en un sistema de control distribuido.

**Lazo:** Se refiere a la instrumentación dispuesta como una combinación de dos o más instrumentos o funciones, diseñada para permitir que las señales pasen de uno a otro con el propósito de medir, indicar o controlar una variable de proceso.

**Monitoreo:** Consiste en observar los cambios en un estadístico que refleje el desempeño del control a lo largo del tiempo.

**Evaluación:** Implica valorar el estadístico considerado en un momento determinado en el tiempo.

**Proceso:** Cualquier operación o secuencia de operaciones que implique un cambio en energía, estado, composición, dimensión u otras propiedades definibles con respecto a un valor inicial.

**Set-point:** Variable de entrada que establece el valor deseado de la variable controlada, ya sea de forma manual, automática o mediante un programa, en las mismas unidades que la variable controlada.

**BPCS (Sistema de Control de Procesos Básicos):** Se refiere a la instrumentación y sistemas utilizados para monitorear y controlar las operaciones de producción normales. Esto incluye, pero no se limita a, combinaciones de monitores y controladores neumáticos y electrónicos de un solo lazo, controladores lógicos programables (PLC) y sistemas de control distribuido. Un BPCS es esencial para operar una planta o proceso.

## Resumen

Desarrollar sistemas de control implica recibir señales de entrada para llevar a cabo procesos y lograr resultados específicos. No obstante, las variables controladas pueden ser afectadas por perturbaciones externas, lo que podría causar anomalías en el sistema. Se pueden detectar y diagnosticar estas anomalías mediante herramientas computacionales, las cuales pueden ser causadas por factores como la no linealidad o ganancias excesivas.

Se realiza el diagnóstico de oscilaciones en los sistemas de control sin invadir, evitando interferir con la operación normal de la planta. Se pueden detectar las oscilaciones a través de distintos métodos, ya que estas representan errores generados por interacciones internas o externas. Se incluyen la detección de picos en el espectro de potencia, métodos basados en criterios de dominio temporal como la integral del error absoluto (IAE), y métodos basados en la función de auto covarianza, entre otros.

Implementar una herramienta computacional especializada en detectar oscilaciones en sistemas de control de lazo cerrado es el principal objetivo del proyecto. Contribuirá a mejorar la estabilidad y eficacia de los procesos de control en diversas aplicaciones industriales al permitir identificar y diagnosticar perturbaciones de manera eficiente esta herramienta.

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

UN

## Abstract

Developing control systems involves receiving input signals to carry out processes and achieve specific results. However, the controlled variables can be affected by external disturbances, which could cause anomalies in the system. These anomalies can be detected and diagnosed using computational tools, which can be caused by factors such as nonlinearity or excessive gains.

The diagnosis of oscillations in the control systems is carried out without invading, avoiding interfering with the normal operation of the plant. Oscillations can be detected through different methods, since these represent errors generated by internal or external interactions. They include the detection of peaks in the power spectrum, methods based on time domain criteria such as the integral of absolute error (IAE), and methods based on the auto covariance function, among others.

Implementing a computational tool specialized in detecting oscillations in closed-loop control systems is the main objective of the project. It will contribute to improving the stability and effectiveness of control processes in various industrial applications by allowing this tool to efficiently identify and diagnose disturbances.

**Keywords:** Detection, Diagnosis, Gains, Oscillations, Oscillatory disturbances.

Introducción



En la industria contemporánea, los sistemas de control desempeñan un papel crucial en la optimización de procesos para cumplir con las especificaciones del cliente y mantener valores de referencia deseables. Sin embargo, la complejidad inherente a los procesos productivos y la presencia de miles de lazos de control dificultan el mantenimiento óptimo de estos sistemas por parte del personal de planta.

La sintonización incorrecta de los controladores, junto con perturbaciones y ruido en las señales, resulta en un aumento no deseado de la varianza en las variables controladas. Esta situación puede provocar respuestas lentas, agresivas u oscilatorias en los lazos de control, así como una baja capacidad para rechazar perturbaciones y problemas de seguridad.

Específicamente, las perturbaciones oscilatorias son especialmente perjudiciales, ya que no solo afectan los componentes mecánicos del proceso, sino que también pueden propagar efectos oscilatorios entre diferentes lazos y procesos, generando una mayor variabilidad en la calidad del producto y ocasionando pérdidas económicas y de mercado.

A pesar de la amplia adopción de sistemas de control automatizados, los controladores estándar, como los PID y los basados en modelos predictivos (MPC), presentan limitaciones frente a ciertas situaciones, como cambios en las condiciones operativas, naturaleza de las perturbaciones, problemas con actuadores y sensores, entre otros.

Estos cambios se consideran como fallas, definidas como desviaciones no permitidas de las propiedades características del sistema respecto a su condición normal de operación.

El logro de un control de procesos óptimo depende del adecuado funcionamiento de todos los componentes mencionados anteriormente. Por lo tanto, es fundamental monitorear y evaluar el rendimiento de los lazos de control, un campo de investigación que ha experimentado avances significativos en las últimas dos décadas.

[+]

Antecedentes

Página 9 | 1

Considerando el problema de fallas de los sistemas de control de circuito cerrado en la calidad industrial, se han realizado estudios relevantes desde diferentes perspectivas. Estos estudios se centran en casos específicos y tienen como objetivo encontrar soluciones adecuadas. Como resultado de este análisis se ha realizado un aporte importante que puede contribuir significativamente a resolver los problemas antes mencionados. Estas contribuciones son las siguientes:

- **Medición digital de magnitudes eléctricas mediante transformada discreta de Fourier. Algoritmos de adaptación de la frecuencia de muestreo:**

Este estudio aborda la interesante cuestión del comportamiento de la transformada discreta de Fourier como método para estimar amplitudes eléctricas cuando la frecuencia del sistema no se conoce completamente. Esto resulta especialmente importante en entornos donde la frecuencia de muestreo es fija y puede haber un desplazamiento de frecuencia entre las mediciones y el sistema real.

Durante el estudio, se determinaron los niveles máximos de error para diferentes intensidades eléctricas y se complementaron con simulaciones para asegurar la comparación y verificación de los resultados obtenidos. En situaciones donde se requiere una alta precisión, se proponen varios algoritmos para ajustar la frecuencia de muestreo, que es un aspecto clave de la eficiencia del proceso de estimación.

Al estudiar la respuesta de tres algoritmos adaptativos a las mutaciones de frecuencia, se realiza un análisis comparativo detallado de los algoritmos PLL, de medio ciclo e híbridos. Entre estos algoritmos, proporcionaron un análisis en profundidad en relación a los tres métodos los cuales son el algoritmo de bucle, el semi algoritmo y el algoritmo híbrido, evaluando su respuesta a diferentes tipos de cambios de frecuencia, como pasos, rampas y oscilaciones. Estos análisis permiten determinar dos características básicas del sistema de control: tiempo de respuesta y frecuencia de disparo.

Además, se investiga el impacto que las señales "ruidosas", como la presencia de armónicos, subarmónicos y ruido blanco, pueden tener en estos algoritmos, lo cual es esencial para comprender la robustez y confiabilidad de estos métodos en condiciones del mundo real. Finalmente, el estudio concluye brindando recomendaciones generales para el diseño de medidores eléctricos digitales y abordando desafíos específicos relacionados con la implementación

[+]

Página 10 | 1

del algoritmo propuesto en un entorno de microprocesador, brindando una visión Integral y práctica del tema.[6]

- **Analizador de espectros utilizando la transformada rápida de Fourier en un microprocesador DSP**

Esta investigación se centra en la aplicación del algoritmo Fast Fourier Transform (FFT), una tecnología fundamental en el procesamiento de señales digitales, diseñada específicamente para el microprocesador ADSP-2181. Este procesador es conocido por sus capacidades avanzadas de procesamiento digital, lo que lo convierte en la opción ideal para aplicaciones que requieren un análisis espectral detallado y eficiente.

La implementación de estos algoritmos FFT en el ADSP-2181 tiene el potencial de abrir nuevas posibilidades en muchos campos, desde las comunicaciones hasta el procesamiento de audio y vídeo. Aprovechando al máximo las capacidades de este microprocesador se espera obtener un analizador de espectro altamente eficiente y preciso, capaz de proporcionar resultados rápidos y fiables en tiempo real.

Además de las aplicaciones prácticas de los algoritmos FFT, esta investigación también incluye un análisis detallado de datos técnicos de circuitos integrados relevantes, lo que permite una comprensión más profunda de las especificaciones y características técnicas clave que afectan el rendimiento del sistema. Esto mejorará el diseño y configuración del analizador de espectro. Los apéndices incluirán una lista completa de los programas utilizados para desarrollar e implementar los algoritmos, así como información técnica adicional sobre los circuitos integrados utilizados. Este material será de gran utilidad para la investigación y el desarrollo de futuras aplicaciones relacionadas con el procesamiento de señales digitales y el análisis de espectro.

En general, esta investigación tiene como objetivo no sólo avanzar en el conocimiento teórico y práctico sobre la implementación del algoritmo FFT, sino también proporcionar herramientas y recursos útiles para la comunidad científica y tecnológica.[7]

- **La transformada rápida de Fourier**

Desde su desarrollo inicial con la ecuación del calor, el Análisis de Fourier ha sido fundamental en diversas áreas como el procesamiento de señales, la mecánica cuántica y las ecuaciones diferenciales parciales, resolviendo problemas fundamentales en la física matemática. Este análisis estudia cómo las funciones generales pueden descomponerse en series de funciones trigonométricas, conocidas como series de Fourier, proporcionando condiciones para su existencia y resultados de convergencia.

En este documento, se presenta un método paso a paso para obtener aproximaciones de los coeficientes de Fourier de una función a partir de un muestreo finito. Además, se explora la aplicación práctica de este método utilizando uno de los algoritmos más importantes del último siglo, la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Se analizaron las características que hacen que este algoritmo sea altamente eficiente en el procesamiento de señales.[8]

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

Se presenta un método para la monitorización automatizada del rendimiento de los lazos de control. El sistema, llamado Monitor de Rendimiento de Lazo de Control (CLIM por sus siglas en inglés), puede detectar oscilaciones dentro del lazo de control. Las oscilaciones, que suelen tener origen en la fricción excesiva en la válvula de control, pueden ser causadas por otros factores también. El CLIM está diseñado principalmente para integrarse con controladores PID, pero también es compatible con otros tipos de controladores. Su carácter automático lo hace destacable, ya que no necesita la especificación de parámetros adicionales aparte de los parámetros estándar del controlador.[9]

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

El procedimiento descrito en el artículo permite la detección automática de lazos de control lentos obtenidos de controladores conservados. Se establece una medida, conocida como índice de inactividad, para evaluar la lentitud del bucle de control. El índice de inactividad señala el equilibrio entre los momentos de correlación positiva y negativa entre el control y los incrementos en la señal medida. Es posible determinar con un mínimo conocimiento del proceso y es adecuado tanto para usar en línea como fuera de ella.[10]



### Formulación del Problema

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

### Justificación y Alcance

Basado en que existen cambios en el sistema de control, por ejemplo: mal ajuste, desgaste, interferencias internas. Esto puede revelar un rendimiento deficiente del sistema de control de una manera que conduzca a la causa del problema. En el caso de las fluctuaciones, suelen indicar un problema más grave que un aumento de los cambios irregulares. Por tanto, requieren de un mayor mantenimiento que un simple ajuste del regulador. Para ello se utilizan métodos no invasivos, ya que la información se obtiene inmediatamente del bucle de control para que el proceso no se detenga, lo que ahorra tiempo y dinero. La razón fundamental para utilizar este sistema para detectar perturbaciones en los sistemas de control es la necesidad de monitorear y mantener el rendimiento óptimo de los sistemas de control en una variedad de aplicaciones industriales y de ingeniería [11]. Por otra parte, se menciona una de las razones por la cual se merece utilizar este método de detección preventivo.

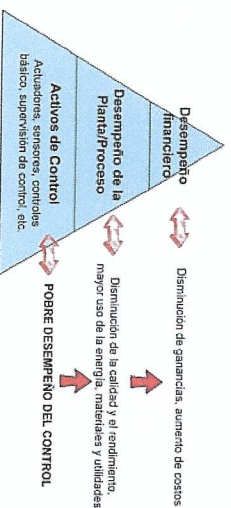


Figura 1: Efecto del pobre desempeño del control (M. Jelaif) [1]

1. **Mantener la estabilidad del sistema:** Los sistemas de control, ya sea que se utilicen en procesos industriales, sistemas de navegación o cualquier otra aplicación, deben permanecer estables para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente. Para evitar fluctuaciones inesperadas e incluso inestabilidad del sistema, es importante detectar las perturbaciones a tiempo.
2. **Optimización del rendimiento:** Las perturbaciones pueden afectar negativamente el rendimiento del sistema al provocar errores de seguimiento de referencias o desviaciones innecesarias en las variables controladas. Al detectar y eliminar interrupciones de forma proactiva, se puede optimizar el rendimiento del sistema y operar de manera más eficiente.
3. **Reduzca los costos y el tiempo de inactividad:** La detección rápida de fallas ayuda a prevenir errores costosos y tiempos de inactividad no planificados para sistemas críticos. Al identificar y resolver problemas potenciales antes de que se agraven, puede reducir los costos asociados con reparaciones y mantenimiento no programados.
4. **Mejora de la calidad del producto:** Las perturbaciones en los sistemas de control en los entornos de fabricación y procesamiento pueden afectar la calidad del producto final. Al detectar y corregir rápidamente los fallos de funcionamiento, se puede mantener la calidad del producto dentro de los estándares establecidos y se puede reducir el desperdicio de materiales y recursos.
5. **Cumplimiento de normas y regulaciones:** En determinadas industrias, como la farmacéutica o la alimentaria, el cumplimiento de normas y regulaciones estrictas es fundamental. Cumplir con estas regulaciones y garantizar la seguridad y calidad del producto final requiere la detección de perturbaciones y un control preciso del proceso.

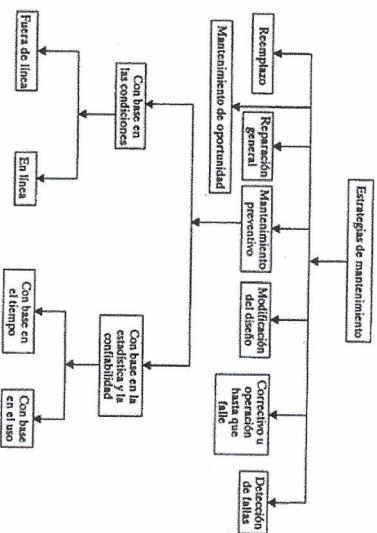


Figura 2: Estrategia de mantenimientos [12]

Por otra parte, el alcance que presenta el sistema es que se puede determinar si presenta perturbaciones de manera invasiva, sin detener el proceso de control y cubre una amplia gama de aplicaciones industriales y técnicas que requieren un control de procesos preciso y estable. Desde fábricas hasta sistemas de control de tráfico aéreo, el sistema se puede adaptar y utilizar para monitorear y mantener el rendimiento óptimo de los sistemas de control en una variedad de entornos y aplicaciones. Además, utilizando técnicas como IAE y análisis de autocovarianza, el sistema puede proporcionar una evaluación cuantitativa del rendimiento del sistema y ayudar a los operadores y técnicos a tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento y la optimización del sistema de control [12].

### Objetivos General

Desarrollar e implementar una herramienta computacional para la detección de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado. Se seleccionará y aplicará el método más adecuado después de un análisis exhaustivo, garantizando su idoneidad para la detección de oscilaciones en sistemas de control de lazo cerrado. Posteriormente, se evaluará la eficacia del método elegido mediante pruebas rigurosas en entornos de simulación.

### Objetivos Específicos

- Implementar con Python una herramienta de detección de oscilaciones en los sistemas de control.
- Realizar un análisis comparativo de métodos para la detección de oscilaciones en lazo cerrado.
- Integrar métodos de detección de oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado para mejorar su rendimiento.
- Validar la funcionalidad de la herramienta diseñada en entornos de simulación relevantes para garantizar su eficacia y precisión.

#### Estado del Arte

- **Detección de fallas en sistemas de control automático: Aplicación a una planta de tratamiento de efluentes**

Este artículo trata sobre la detección de fallas y el aislamiento de sistemas de control automático, con particular aplicación en plantas de tratamiento de aguas residuales. Se desarrolló un modelo no lineal para una planta de eliminación biológica de carbono utilizando un controlador integral proporcional para controlar la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

Los modelos están diseñados para trastornos y defectos comunes. Dado que el proceso es inherentemente no lineal, se centra en diseñar observadores no lineales como generadores residuales, un método común para la detección de fallas.

Se enfatiza que estos observadores deben ser muy sensibles a los errores, pero resistentes a las perturbaciones externas para minimizar las falsas alarmas. Se analiza la robustez de varios observadores no lineales y se propone un nuevo método para reducir las perturbaciones a un nivel deseado, ya que en la práctica es difícil hacer que la salida sea completamente independiente de entradas o perturbaciones desconocidas.

Se establecen las condiciones teóricas para la convergencia semi global de observadores en el espacio de estados y perturbaciones, y los resultados se presentan mediante simulaciones. Se concluye que los observadores de alto rendimiento modificados para la prevención de interferencias pueden usarse con éxito para detectar fallas en plantas de tratamiento de aguas residuales. [15]

- **Cotas finales probabilísticas en diseño de control y detección de fallas**

Este artículo se centra en el desarrollo y extensión de herramientas para el análisis y diseño de sistemas de control que enfrentan perturbaciones. Una cuestión clave en el estudio de estos sistemas es garantizar la estabilidad del punto de equilibrio. Sin embargo, esta estabilidad no se puede garantizar para

algunos tipos de perturbaciones. Por lo tanto, el objetivo es asegurar que la trayectoria del sistema converja a una región acotada llamada frontera final en lugar de punto de equilibrio. Estos rangos también pueden ser conjuntos constantes si se calculan de cierta manera.

Si la perturbación es ilimitada, como en el caso del ruido blanco gaussiano, dicho conjunto (límites finitos e invariantes) normalmente no existe. Esto llevó al desarrollo reciente de los conceptos de límite final de probabilidad (PUB) y conjunto de invariantes de probabilidad (PIs). Este trabajo propone utilizar estos nuevos conceptos para desarrollar métodos de diseño de control, así como estrategias para la detección de fallas y la reconfiguración del controlador contra ellas.

La existencia de un límite de probabilidad acotado está garantizada en todos los casos. Además, estos conceptos se amplían para incluir sistemas no lineales y herramientas de caracterización, mientras que se desarrollan métodos de diseño de control no lineal para proporcionar límites probabilísticos. [16]

- **Detección de anomalías en el control de estabilidad de una aeronave**

Este artículo describe un sistema de detección que emite una alarma cuando ocurre una condición anormal en el sistema de control de estabilidad de la aeronave. Para ajustar el paso, el paso y el paso se utiliza un controlador tipo servo con integradores diseñados según dimensiones laterales y modelos longitudinales. Para representar estados adecuados e inadecuados se utiliza una base de datos generada por un modelo excitado por pasos de amplitud aleatoria y perturbado por varias señales aleatorias.

Se utiliza un clasificador radial capacitado y validado para detectar comportamientos anormales en la estabilidad de la aeronave. Para todas las variables estudiadas, el clasificador logró una precisión superior al 93,33%, lo que demuestra que los métodos de control y clasificación utilizados son confiables para detectar condiciones anormales en simulaciones de vuelo de aeronaves y pueden usarse en vuelos reales. [17]



### Marco Teórico

- **Propuesta de algoritmo para la detección y clasificación de perturbaciones eléctricas en Sistemas SCADA**

Esta investigación se centra en la detección y clasificación de perturbaciones eléctricas en sistemas SCADA utilizando transformada wavelet discreta y métodos de clasificación supervisada k-NN. El algoritmo desarrollado procesa la señal en el espacio tiempo-frecuencia y analiza su energía para detectar y clasificar perturbaciones. Utilice métricas como la precisión de la clasificación y la matriz de confusión para probar la precisión del algoritmo y simular su rendimiento en un entorno real utilizando prototipos funcionales. Los resultados muestran que el algoritmo propuesto logra una mayor precisión de clasificación en comparación con otros algoritmos similares descritos en la literatura. [18]

- **Control con rechazo activo de perturbaciones para el equilibrio de robots humanoides**

Este trabajo describe una estrategia de control que utiliza la supresión activa de perturbaciones para mantener el equilibrio de un robot humanoide en postura de pie sin caminar. Esta técnica de control se basa en ajustar la posición del punto de aplicación de momento cero (ZMP) del robot humanoide para permanecer dentro del polígono de soporte. Se utiliza un controlador cuadrático lineal de tiempo discreto, complementado con detección y corrección de perturbaciones en línea mediante un observador de estado extendido. Esta estrategia, implementada en el robot humanoide Nao utilizando el lenguaje Python, muestra resultados satisfactorios en el mantenimiento del equilibrio del robot a pesar de que fuerzas externas cambian su posición ZMP. Estos resultados demuestran la viabilidad de este método de control para prevenir interferencias durante otras acciones complejas de robots humanoides, como caminar, o para aplicaciones en el control de otros sistemas robóticos. [19]

**Planta:** Se define como cualquier objeto físico susceptible de ser controlado, abarcando desde equipos hasta conjuntos de piezas de una máquina que operan en conjunto para alcanzar un objetivo específico. Ejemplos comunes incluyen hornos de calentamiento, reactores químicos, entre otros. [13]



Figura 3: Sistema [3]

**Proceso:** Se refiere a una secuencia de operaciones o pasos con una determinada secuencia, que conducen a cambios graduales desde un estado inicial a uno final, con un resultado deseado. Los procesos pueden ser de naturaleza química, económica, biológica, entre otros. [13]

**Sistema:** Se entiende como un conjunto de componentes interconectados que trabajan juntos para cumplir un objetivo específico. Este término no se limita únicamente a sistemas físicos, sino que también puede aplicarse a fenómenos abstractos y dinámicos como la economía o la sociología. [13]

**Control:** Se refiere al acto de regular, dirigir o comandar un sistema. Un sistema de control se compone de componentes físicos conectados de manera que puedan regular o dirigir tanto a sí mismos como a otros sistemas. [13]

**Entrada y Salida:** La entrada de un sistema es una variable elegida para excitar el sistema, mientras que la salida es una variable que se utiliza para analizar los efectos de esa excitación. En un sistema de control, la entrada se manipula para lograr un objetivo específico, mientras que la salida se utiliza para evaluar si se ha cumplido dicho objetivo. [13]

**Realimentación:** Es una propiedad de los sistemas que permite comparar la salida del sistema con la entrada o con alguna variable interna, con el fin de ajustar y controlar adecuadamente el sistema. La realimentación es fundamental en la ingeniería de control. [13]

ya que permite establecer una secuencia cerrada de relaciones causa-efecto entre las variables del sistema.[13]

**Control de Lazo Abierto:**

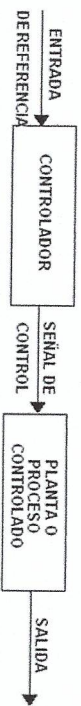


Figura 4: Sistema de lazo abierto [3]

El control de lazo abierto es un método para realizar acciones de control sin tener en cuenta la salida del sistema. En este enfoque, las entradas al sistema están predeterminadas y utilizadas sin necesidad de monitorear o ajustar los resultados obtenidos. Esto significa que el controlador no realiza ningún ajuste en función de cómo responde el sistema a las entradas. Este método es más adecuado para sistemas donde las condiciones son constantes y predecibles y no requieren ajustes sobre la marcha. Un ejemplo común de control de bucle abierto es un temporizador que inicia un proceso durante un tiempo predeterminado independientemente de las condiciones del proceso o sus resultados.[13]

**Control de Lazo Cerrado:**

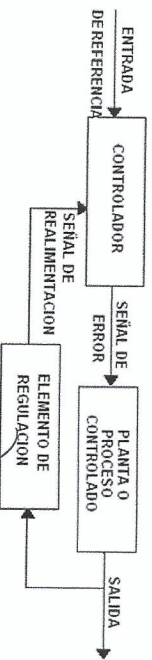


Figura 5: Sistema de lazo cerrado [3]

Por otro lado, el control de circuito cerrado es un método para ajustar continuamente las acciones de control en función de la salida del sistema. En este caso, la retroalimentación

u u u

se utiliza para comparar la salida real del sistema con la salida deseada (o de referencia) y tomar medidas correctivas para reducir la diferencia entre las dos. Este enfoque es particularmente útil para sistemas con condiciones cambiantes o desconocidas, ya que permite realizar ajustes sobre la marcha para mantener el sistema en el estado deseado. Un ejemplo común de control de circuito cerrado es un termostato en un sistema de calefacción: el termostato mide la temperatura ambiente actual (retroalimentación), la compara con la temperatura deseada (referencia) y ajusta la salida de calefacción para mantener la temperatura dentro de un rango determinado. [13]

**Ciclo de vida de un sistema de control**

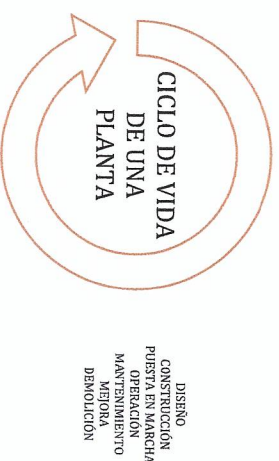


Figura 6: Ciclo de Vida de una Planta (Fuente propia)

**Diseño:** En esta etapa se definen los requisitos y especificaciones de la planta. Se desarrollan los planos, diagramas y especificaciones necesarios para guiar la construcción.  
**Construcción:** Una vez completado el diseño, se lleva a cabo la construcción física de la planta. Esto puede implicar la instalación de equipos, montaje de estructuras, tendido de tuberías, cableado, etc.  
**Puesta en marcha:** Después de la construcción, se realizan pruebas para asegurar que todos los equipos y sistemas funcionen correctamente. Se ajustan y calibran los equipos según sea necesario para optimizar su rendimiento.



**Operación:** Una vez que la planta está en funcionamiento, se inicia la fase de operación. Durante esta etapa, la planta produce los productos o servicios para los que fue diseñada. Se monitorean continuamente los procesos y se toman medidas para garantizar la eficiencia y la seguridad operativa.

**Mantenimiento:** Durante toda la vida útil de la planta, se lleva a cabo un programa de mantenimiento regular para garantizar que los equipos y sistemas funcionen de manera óptima y segura. Esto puede incluir mantenimiento preventivo, correctivo y predictivo.

**Mejora:** A lo largo del tiempo, pueden surgir oportunidades para mejorar la eficiencia, la calidad o la seguridad de la planta. Se realizan mejoras y actualizaciones según sea necesario para mantener la competitividad y cumplir con los estándares cambiantes.

**Demolición:** Al final de su vida útil, cuando la planta ya no es económicamente viable o cuando se requiere espacio para otros fines, se procede a la demolición de la planta. Esto implica la eliminación segura de equipos y estructuras, así como la gestión adecuada de residuos y la restauración del sitio.

Bajo las condiciones establecidas en el diagrama de la figura 6, se determinó el ciclo de operación óptimo de un proceso industrial. Tanto por razones de seguridad, rentabilidad y calidad es de gran beneficio la detección y diagnóstico de oscilaciones en un sistema de control. Para esto varios investigadores han sugerido diferentes métodos tales como:

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

Se define como la amplitud del pico más alto que se presenta fuera de la banda de frecuencia baja, la cual debe ser comparada con la energía total que se encuentra en el área de frecuencia. Esta comparación es lo que determina el ancho de banda del control.

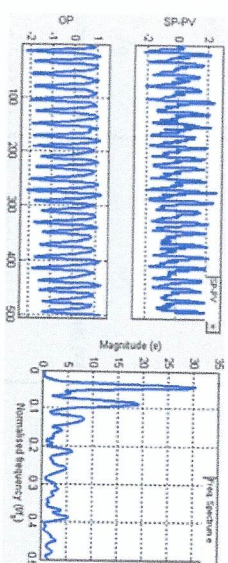


Figura 7. Detección de oscilaciones en un sistema de control no lineal (M. Jellali) [1].

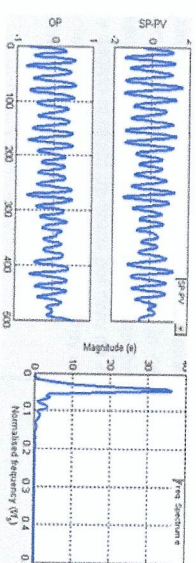


Figura 8. Detección de oscilaciones en un sistema de control que presenta perturbaciones (M. Jellali) [1].

En las figuras 7 y 8, se ilustra la detección de oscilaciones en un sistema de control. En la figura 7, se observa una representación de oscilaciones sinusoidales, lo que sugiere la posible presencia de no linealidades en el sistema de control. Por otro lado, en la figura 8, se muestra un pico espectral diferente, que podría clasificarse como una perturbación.[14]

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

El método de detección se divide en la regularidad de la integral de error absoluto (IAE) "suficientemente grande", introducido por Hagglund en 1995, que tiene como objetivo calcular el IAE entre los cruces por cero del error de control. Además, está la detección de perturbaciones de carga, que ocurre al aumentar las perturbaciones de carga, resultando en un periodo relativamente prolongado sin cruces por cero y un aumento significativo en el valor de IAE. Cuando se supera el límite de IAE, es probable que se presenten perturbaciones de carga. Este método



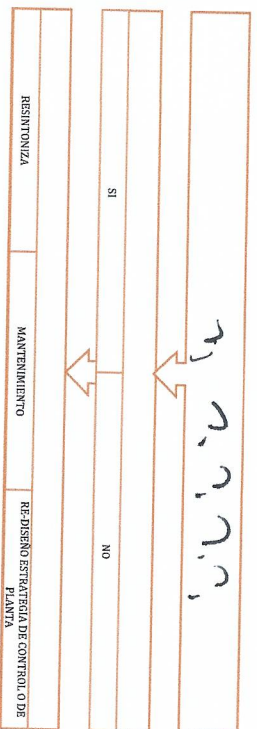


Figura 10. Proceso para la detección de un sistema control (Fuente Propia).

Se realizó un modelado para determinar cómo se ejecutará el proceso de desarrollo o cómo van a estar determinado cada uno de los métodos y atributos aplicados.



Figura 11. Modelo de Desarrollo (Fuente Propia).

### Conclusión

El enfoque de esta investigación ha sido el desarrollo y la aplicación de una herramienta informática para identificar oscilaciones en sistemas de control cerrado, con el fin general de mejorar la precisión al detectar problemas en estos sistemas. Se ha avanzado en el logro de este objetivo general a través de una serie de objetivos específicos.

Se logró implementar exitosamente una herramienta de detección de oscilaciones utilizando Python, aprovechando las capacidades de este lenguaje para el análisis y manipulación de señales.

Se ha llevado a cabo un análisis detallado y comparativo de varios métodos para detectar oscilaciones en sistemas cerrados, examinando sus pros, contras y su utilidad en distintos escenarios.

Después, el método más adecuado para detectar oscilaciones en un sistema de control de lazo cerrado se ha integrado con el fin de mejorar la precisión en la detección de problemas y optimizar el rendimiento del sistema completo.

La funcionalidad de la herramienta diseñada ha sido validada finalmente a través de pruebas en entornos de simulación relevantes, lo que confirma su eficacia y precisión en la detección de oscilaciones en sistemas de control de lazo cerrado.

