

**DESARROLLO DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL  
DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA FRICCIÓN  
ESTÁTICA EN LOS ACTUADORES EN SISTEMAS DE CONTROL**

**LEONARDO ANDRES ESCOBAR DAVIDSON  
STEPHANY SOFIA SUCERQUIA RINCONES**

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

**DESARROLLO DE HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL  
DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS RELACIONADOS CON LA FRICCIÓN  
ESTÁTICA EN LOS ACTUADORES EN SISTEMAS DE CONTROL**

**LEONARDO ANDRES ESCOBAR DAVIDSON  
STEPHANY SOFIA SUCERQUIA RINCONES**

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

**ASESORES DISCIPLINARES:  
ING. CARLOS DÍAZ SÁENZ, MSc.  
ING. JAVIER JIMENEZ CABAS, PhD.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL CARIBE  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado 1

---

Firma del jurado 2

## DEDICATORIA

*Dedicamos este proyecto a:*

*Dios, por regalarnos sabiduría, vida y fortaleza para cumplir nuestras metas y sueños*

*Nuestros padres y demás familiares, por forjarnos como personas mostrándonos el camino hacia la superación y el éxito.*

*Amigos, compañeros y profesores por permitirnos aprender cada día más de la vida a su lado y regalarnos su apoyo incondicional.*

*Y por último a nuestros asesores disciplinares por guiarnos durante el desarrollo del proyecto pese a las diferentes circunstancias.*

## TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABLAS.....	10
LISTA DE ECUACIONES.....	11
GLOSARIO .....	12
RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	13
INTRODUCCIÓN .....	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
1.1. ANTECEDENTES .....	16
1.1.1. Diagnóstico de fallas en procesos industriales mediante inteligencia artificial. 16	
1.1.2. Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial. 16	
1.1.3. Métodos relacionados con diagnósticos de fallas con síntomas imprecisos mediante comparación de casos. ....	17
1.1.4. Metodologías y tecnologías de detección y diagnóstico de fallas aplicadas a procesos industriales. ....	17
1.1.5. Diagnóstico de fallas en actuadores mediante cotas finales probabilísticas	18
1.1.6. Daños de válvulas y sus causas .....	18
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE.....	20
1.3.1. Impacto.....	22
2. OBJETIVOS .....	24
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	24
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24

3. MARCO DE REFERENCIA.....	25
3.1. ESTADO DEL ARTE .....	25
3.1.1. Programación de ganancia difusa del controlador PID para compensación de tensión en la válvula de control neumático.....	25
3.1.2. Un sistema autónomo de detección de fricción estática en válvulas basado en la caracterización de datos.....	25
3.1.3. Modelado y detección de stiction en válvulas de control neumático.....	26
3.1.4. Modelo práctico y algoritmo de detección para la formación de válvulas. ....	26
3.1.5. Detección de bucles de control de entrada de stiction basados en agrupamiento difuso .....	27
3.1.6. Detección de bucles de control de entrada de stiction basados en agrupamiento difuso .....	27
3.1.7. Eliminando las no linealidades de stiction de la válvula para la evaluación del rendimiento del control.....	27
3.1.8. Control de la supervisión del rendimiento del bucle: la experiencia durante más de dos décadas.....	28
3.1.9. Análisis de frecuencia y compensación de la formación de válvulas en lazos de control en cascada.....	28
3.2. MARCO TEÓRICO.....	29
3.2.1. Métodos para diagnosticar fricción estática. ....	29
3.2.2. Proceso de diagnóstico .....	34
4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO .....	37
4.1. METODOLOGÍA .....	37
4.2. TIPO DE ESTUDIO.....	37
4.3. POBLACION Y MUESTRA.....	37
4.4. MÉTODO DE LA INVESTIGACION.....	38
4.5. RECOLECCIÓN DE DATOS .....	38

4.6.	CRONOGRAMA.....	39
5.	PRESUPUESTO .....	41
5.1.	PRESUPUESTO GENERAL .....	41
5.2.	PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO .....	42
5.3.	CONSULTORIA ESPECIALIZADA.....	43
5.4.	MATERIALES, INSUMOS Y EQUIPOS .....	43
6.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
6.1.	DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	46
6.1.1.	Version 2 del prototipo .....	49
6.1.2.	Versión 5 del prototipo .....	50
6.1.3.	Versión 6 del prototipo .....	52
6.2.	DISEÑO DISPOSITIVO FINAL .....	53
6.2.1.	Pestaña 'Vista general' .....	53
6.3.	MATERIALES .....	54
6.3.1.	Software Matlab.....	54
6.3.2.	Herramienta de interfaz gráfica app designer .....	54
6.3.3.	Computadora.....	54
6.3.4.	recolección de datos.....	55
6.4.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	57
6.4.1.	Pestaña 'Vista general' .....	57
6.4.2.	Pestaña 'Curve fitting' .....	58
6.4.3.	Pestaña 'OP vs PV' .....	59
6.4.4.	Pestaña 'Crosscorrelation Function' .....	60
6.4.5.	Pestaña 'Vista General', sistema ideal.....	61
6.4.6.	Pestaña 'PV vs OP', sistema ideal.....	62
6.4.7.	Pestaña 'Crosscorrelation Function', Sistema ideal .....	63

6.4.8.	Pestaña 'Vista General' no stiction .....	64
6.4.9.	Pestaña 'Curve Fitting' no stiction.....	65
6.4.10.	Pestaña 'OP vs PV' no stiction.....	66
6.4.11.	Pestaña 'Crosscorrelation Function' no stiction .....	67
7.	CONCLUSION .....	68
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	70
9.	ANEXOS .....	76
9.1.	MATRIZ DE RIESGOS.....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de la oscilación del lazo de control debido a un mayor tiempo de retraso en la válvula de control.(Fuente: <a href="https://www.secoin.com.uy">https://www.secoin.com.uy</a> ) .....	21
Figura 2. Ajuste senoidal (Autoría propia).....	31
Figura 3. Ajuste triangular (Autoría propia).....	31
Figura 4. Proceso de diagnóstico (Autoría propia).....	34
Figura 5. Diagrama de flujo de la herramienta computacional (Autoría propia).....	45
Figura 6. Ventana principal V2 (Autoría propia).....	49
Figura 7 Ventana principal V5 (Autoría propia).....	50
Figura 8 Ventana emergente buscar datos (Autoría propia).....	51
Figura 9. Pestaña 'CrossCorrelation function' V6 (Autoría propia).....	52
Figura 10. Ventana principal, V7 stiction (Autoría propia).....	53
Figura 10. Ventana principal, V7 stiction (Autoría propia).....	57
Figura 11. Pestaña 'Curve fitting, V7 (Autoría propia).....	58
Figura 12. Pestaña 'OP vs PV', V7 (Autoría propia).....	59
Figura 13. Pestaña 'Crosscorrelation function, V7 (Autoría propia).....	60
Figura 14. Ventana principal, Ideal (Autoría propia).....	61
Figura 15. Pestaña 'OP vs PV', Ideal (Autoría propia).....	62
Figura 16. Pestaña 'CrossCorrelation Function', Ideal (Autoría propia).....	63
Figura 17. Pestaña 'Vista General', no stiction (Autoría propia).....	64
Figura 18. Pestaña 'Curve Fitting', no stiction (Autoría propia).....	65
Figura 19. Pestaña 'OP vs PV', no stiction (Autoría propia).....	66
Figura 20. Pestaña 'Crosscorrelation Function', no stiction (Autoría propia).....	67

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cronograma de actividades .....	39
Tabla 2. Presupuesto general. ....	41
Tabla 3. Costo personal científico.....	42
Tabla 4. Costo personal de apoyo.....	42
Tabla 5. Costo consultoría especializada.....	43
Tabla 6. Costo materiales e insumos.....	43
Tabla 7. Costo trabajo de campo.....	44
Tabla 8. Costo equipos usados.....	44
Tabla 9. Cuadro comparativo de métodos para diagnosticar fricción estática.....	46
Tabla 10. Recolección de datos.....	55
Tabla 11. Paquetes de datos obtenidos .....	56
Tabla 12. Matriz de riesgos.....	76
Tabla 13. Matriz de riesgos 2 .....	77
Tabla 14. Riesgos y soluciones.....	78

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ajuste senoidal .....	31
Ecuación 2. Ajuste triangular.....	32

## GLOSARIO

**Actuador:** es un dispositivo inherentemente mecánico cuya función es proporcionar fuerza para mover o “actuar” otro dispositivo mecánico. la fuerza que provoca el actuador proviene de tres fuentes posibles: presión neumática, presión hidráulica, y fuerza motriz eléctrica (motor eléctrico o solenoide). dependiendo del origen de la fuerza el actuador se denomina “neumático”, “hidráulico” o “eléctrico” [1].

**Válvula:** es un dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos, mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos [2].

**Histéresis** (hysteresis): es propiedad del elemento evidenciado por la dependencia del valor de la salida, para una excursión dada de la entrada, sobre el historial de excursiones anteriores y la dirección del recorrido actual. la histéresis generalmente se determina restando el valor de la banda muerta de la separación máxima medida entre indicaciones ascendentes y descendientes de la variable medida durante un recorrido de rango completo después de que los transitorios hayan decaído [3].

## **RESUMEN**

El presente documento obedece al cumplimiento del desarrollo de una herramienta computacional diseñada para detectar la presencia de fricción estática en actuadores por medio del análisis de las variables OP y PV (salida del controlador y variable de proceso respectivamente), los métodos que fueron seleccionados para ser aplicados en la herramienta computacional son: CrossCorrelation-Based Stiction Detection, Nonlinearity Detection and PV–OP Pattern Analysis, Diagnosis Based on Curve Fitting.

Palabras claves: Controlador, Patrón, Simetría

## **ABSTRACT**

This document presents the development of a computational tool designed to detect the presence of static friction in actuators through the analysis of the Op and PV variables (controller output and process variable respectively), the methods that were selected to be applied in the computational tools are; Detection of Stiction based on cross correlation, Detection of nonlinearity and Analysis of PV-OP patterns, Tests to confirm Stiction.

Keywords: Controller, Pattern, Symmetry.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales juegan un papel primordial dentro del sector productivo. Las exigencias de producción han obligado a buscar estrategias como el diagnóstico automático para mantener la producción continua con minimización de fallas en las máquinas. En términos generales, un proceso industrial provee gran cantidad de variables medidas, controladas y manipuladas que asocian no linealidades e incertidumbres [4].

Por lo anterior, se hace necesario monitorear las variables, con el fin de adquirir información sobre el comportamiento del proceso. La información histórica y presente resultante del monitoreo es utilizada para implementar sistemas inteligentes de supervisión. Dentro del esquema de supervisión se encuentra la detección de las fallas, el diagnóstico y el restablecimiento de las condiciones de operación de acuerdo con criterios de desempeño del proceso [5].

El diagnóstico a su vez se divide en dos grupos. El primero corresponde a procesos en los cuales se requiere de un modelo explícito mientras que el segundo grupo se apoya en el histórico de datos con información importante de estados funcionales del proceso [6].

Existen actualmente una gran variedad de actuadores que se implementan en de los procesos industriales, dentro de estos encontramos las válvulas a las cuales se les debe realizar un seguimiento estricto debido a que son los instrumentos de control más esenciales en la industria.

Con esta herramienta computacional se pretende analizar y diagnosticar las posibles fallas que se pueden presentar en los elementos de control (actuadores) y los parámetros que se deben tener en cuenta según el tipo de proceso.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las encuestas realizadas por Bialkowski (1993), Ender (1993), Desborough y Miller (2002) y Paulonis y Cox (2003) indican que alrededor del 20-30% de todos los lazos de control oscilan debido a problemas causados por no linealidades de los actuadores, como la fricción, histéresis, banda o zona muertas. Muchos lazos de control en plantas de proceso funcionan mal debido a la fricción estática del actuador, como uno de los problemas más comunes del equipo. [7]

La válvula de control (actuador) es un componente particularmente crítico en la mayoría de las plantas de proceso. Está sujeta a un desgaste progresivo que, si no se controla y repara oportunamente, puede dar lugar a problemas de accionamiento, guiado de husillos, posicionamiento, integridad de la regulación y deterioro de la capacidad de manejo de fluidos.

Así mismo, las válvulas de control tienen la respuesta más lenta entre los elementos de lazo de control, y el controlador PID necesita compensar eso. A medida que aumenta la fricción en la válvula, la válvula se mueve más lentamente, lo que en algunos casos hace que la válvula se atasque momentáneamente y salte repentinamente a otra posición, lo que provoca oscilaciones de proceso no deseadas. [33].

Mediante el sistema de control pueden ser supervisadas y controladas, todo tipo de perturbaciones y posibles desviaciones que ocurran a lo largo del proceso, que podrían conllevar accidentes en la planta, emisiones no deseadas de contaminantes y pérdidas energéticas.

Por consiguiente, se debe tener un diagnóstico preciso que permita determinar, mediante el análisis de datos e informaciones, el problema o falla en el actuador para así arreglar, mejorar o corregir el sistema de control.

## **1.1. ANTECEDENTES**

### **1.1.1. Diagnóstico de fallas en procesos industriales mediante inteligencia artificial.**

Los procesos industriales involucran variables que deben ser gestionadas por sistemas de monitoreo. Diversos estados funcionales en los procesos industriales pueden ser detectados por sistemas de diagnóstico basados en información histórica de las variables y en inteligencia artificial. En este artículo se presenta una revisión sobre el diagnóstico de fallas en procesos industriales mediante inteligencia artificial, se presentan las generalidades, principales estrategias inteligentes utilizadas en el diagnóstico, y un análisis comparativo de los trabajos encontrados en la literatura técnica [8].

### **1.1.2. Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial.**

Este artículo presenta el estado actual de las técnicas de inteligencia artificial y su aplicación al campo de la detección y diagnóstico de fallas en sistemas dinámicos. Inicialmente, se hace una breve descripción de lo que se considera un mecanismo de detección y diagnóstico de fallas, y se explican los enfoques actuales de estudio y aplicación de tales mecanismos. Posteriormente, se presentan los resultados más importantes de las diferentes técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la detección y diagnóstico de fallas.

Finalmente, se presenta un análisis comparativo con base en las características deseables de los mecanismos de detección y diagnóstico de fallas. El artículo concluye mencionando los beneficios de la clasificación de las técnicas presentadas y enumerando las posibles vías hacia donde debe ir la investigación en este campo [9].

### **1.1.3. Métodos relacionados con diagnósticos de fallas con síntomas imprecisos mediante comparación de casos.**

Los métodos relacionados con diagnósticos de fallas han ido evolucionando en las últimas tres (3) décadas, y actualmente es un campo activo de investigación. En este artículo se presenta una investigación documental sobre conceptos básicos para diagnósticos de fallas mediante comparación de casos, y sobre métodos relacionados con diagnósticos de fallas con síntomas imprecisos mediante comparación de casos.

se presenta una síntesis sobre la importancia, definición y propósito del diagnóstico de fallas, una clasificación de métodos para diagnosticar fallas, y formas de realizar diagnósticos de fallas con síntomas imprecisos basándose en la teoría de conjuntos borrosos y la comparación de casos previos con un caso nuevo a diagnosticar [10].

### **1.1.4. Metodologías y tecnologías de detección y diagnóstico de fallas aplicadas a procesos industriales.**

En el diseño de los sistemas de detección y diagnóstico de fallas aplicados a la industria, se requiere del conocimiento previo de los niveles de riesgo y criticidad de cada uno de sus plantas y equipos, así como también de las características dinámicas de los procesos, número de señales de entrada y salida por cada variable crítica, con el fin de determinar que método o técnica es más apropiada aplicar. En este artículo se presentan fundamentos teóricos, algoritmos, aplicaciones e infraestructura de implantación de algunas metodologías y tecnologías más utilizadas para detección y diagnóstico de fallas en procesos industriales [11].

### **1.1.5. Diagnóstico de fallas en actuadores mediante cotas finales probabilísticas**

En este trabajo se propone un esquema de diagnóstico de fallas que discrimina las mismas en función de la pertenencia de ciertas trayectorias del sistema a conjuntos probabilísticos, lo que permite tener en cuenta la presencia de perturbaciones no acotadas. Este resultado es el primero que hace uso de dichos conjuntos, constituyendo la primera conexión entre la detección de fallas mediante conjuntos y la detección mediante técnicas probabilísticas [12].

### **1.1.6. Daños de válvulas y sus causas**

Las causas posibles pueden ser un juego de válvula ajustado de forma errónea, pero también que el inserto para asiento de válvula o la guía de válvula no se hayan mecanizado de forma centrada. Un juego para la guía de la válvula excesivo o insuficiente puede tener consecuencias fatales [13].

## 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El procedimiento de diagnóstico comienza cuando se detecta oscilación en el lazo de control, el origen más común de esta variación se presenta en los actuadores, principalmente en las válvulas de control debido a que estas están expuestas tanto a factores externos como internos durante el proceso, sin embargo, la detección de no linealidad y saturación también son válidos como una posible fuente de fricción estática.

Las válvulas de control son responsables de conservar el flujo y la presión adecuados para mantener las variables controladas cerca de su punto de ajuste. Las deficiencias, por lo tanto, pueden introducir una variabilidad no deseada del proceso debido a los cambios en el tiempo de respuesta, la linealidad, el sobre y sub-impulso, entre otros factores.

Es un hecho que la fricción estática en los lazos de control genere oscilaciones en forma de inestabilidades periódicas de amplitudes finitas, conocidas como ciclos limite, este fenómeno lleva al incremento de variabilidad en la calidad del producto, a la inestabilidad del sistema de control e incluso acelera el desgaste del equipo.

### 1.3. JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE

Como parte integral de la instrumentación, las válvulas de control son fundamentales para garantizar el funcionamiento correcto, continuo y eficiente de la planta. Dado que la selección de la válvula de control se basa en los datos del proceso y, en cierta medida, en la funcionalidad prevista, la solución elegida determina la velocidad y el rendimiento de la planta [33].

Las válvulas de control cuyo mantenimiento no es el adecuado pueden degradar la disponibilidad del proceso y generar situaciones potencialmente peligrosas para los trabajadores. Este tipo de fallos en los actuadores, igualmente, pueden producir interrupciones no planificadas o incluso averías más serias [7].

Por lo tanto, se debe supervisar su comportamiento de entrada-salida que consta de cuatro componentes, banda muerta, banda atascada, salto y fase de movimiento, y se caracteriza por tener las siguientes tres fases siendo estas las principales causas del problema en los actuadores [14]

- **Atasco:** es constante con el tiempo, ya que la válvula está atascada por la presencia de la fuerza de fricción estática (banda muerta más banda atascada). la “banda muerta” del actuador se debe a la presencia de fricción de coulomb, una fricción constante que actúa en la dirección opuesta a la velocidad.
- **Salto:** cambia abruptamente, ya que la fuerza activa desbloquea al actuador.
- **Movimiento:** varía gradualmente; se opone solo por la fuerza de fricción dinámica.

Desde la perspectiva del mantenimiento, no hay banderas rojas para la fricción o el retraso (figura 1.) que se observa periódicamente a lo largo del tiempo. Si el proceso muestra algunos signos de pequeña oscilación, es probable que no se realice ninguna acción. La oscilación puede aumentar con el tiempo, dando lugar a una mayor variabilidad del proceso. Dado que la válvula no ha fallado todavía, los diagnósticos tradicionales no pueden brindar ninguna advertencia o alerta. La oscilación del proceso será capturada por el operador que intentará ajustar el lazo de control para devolverlo a su estado estable. Pero las cosas comienzan a empeorar con el tiempo, hasta que los diagnósticos tradicionales detectan una falla de la válvula y se activa una alerta que exige una acción correctiva inmediata. [33].

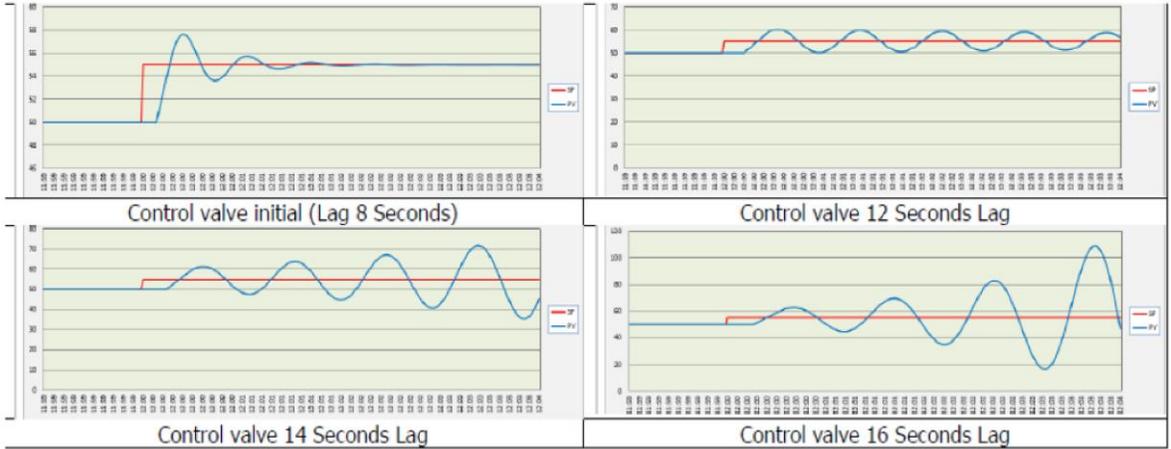


Figura 1. Representación de la oscilación del lazo de control debido a un mayor tiempo de retraso en la válvula de control.(Fuente: <https://www.secoin.com.uy>)

### **1.3.1. Impacto**

A través del diagnóstico por medio de las diferentes tendencias o formas cualitativas de una señal y el análisis de patrones MV-OP, y PV- OP, se podrá determinar el problema en el actuador con el fin de evitar pérdidas, verificar, eliminar o compensar la fricción de la válvula [29].

#### **1.3.1.1. Impacto laboral.**

El control de procesos toma en cuenta la medición y el análisis de las variables que determinan el funcionamiento de un proceso, así como la toma de decisiones y la ejecución de acciones de control para gobernar dicho proceso. Aun cuando el control del proceso se realice con fines netamente operativos, siempre es posible capturar y almacenar información, que puede ser eficientemente procesada con fines de mantenimiento, como es el caso del mantenimiento predictivo. Asimismo, se acostumbra a instrumentar máquinas y equipos de proceso para adquirir datos exclusivos para estos fines. Como una opción más, se pueden automatizar las tareas de mantenimiento [30].

#### **1.3.1.2. Impacto industrial.**

Toda planta industrial se diseña para llevar a cabo un proceso productivo que, partiendo de la materia prima y los insumos entrega bienes cuyo valor lo determina finalmente el mercado.

Como el mundo globalizado impone un entorno de alta competencia, todas las empresas tratan de elevar su productividad y mejorar la calidad de los productos que ofrecen, haciendo el mejor uso posible de los recursos disponibles.

#### **1.3.1.3. Impacto tecnológico.**

La mejor manera de mejorar la competitividad, utilizando la tecnología electrónica actual es mediante el control automático de los procesos. Esta tecnología está basada en la adquisición de datos que son extraídos directamente del proceso para ser analizados con el fin de tomar decisiones de control con un mínimo de intervención humana. El hecho de tener información directa del proceso es importante en términos de oportunidad, ya que tan pronto se produce un cambio, este es registrado y utilizado para mantener el proceso bajo control [29].

#### **1.3.1.4. Impacto económico**

El coste del tiempo de inactividad por daños puede representarse mediante la pérdida de producción, datos, credibilidad e, incluso, vidas. Pero la forma más común de representar el coste del tiempo de inactividad es en dinero. Según Aberdeen Group, el coste del tiempo de inactividad aumentó hasta un promedio de \$260.000 por hora entre 2014 y 2016.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

- Implementar una herramienta computacional para el diagnóstico de problemas relacionados con la estimulación de los actuadores.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un análisis comparativo de los métodos de detección de fricción estática en actuadores de sistemas de control para la selección e implementación en la herramienta computacional.
- Implementar al menos 3 métodos de detección de fricción estática en los actuadores para la obtención de una respuesta óptima de los sistemas de control.
- Validar los algoritmos implementados por medio de la herramienta computacional para su uso eficiente.

### **3. MARCO DE REFERENCIA**

#### **3.1. ESTADO DEL ARTE**

A continuación, se presentan investigaciones/ proyectos, relacionados con el tema principal del proyecto, el cual es detección y diagnóstico de fricción estática

##### **3.1.1. Programación de ganancia difusa del controlador PID para compensación de tensión en la válvula de control neumático.**

Las no linealidades inherentes como banda muerta, stiction e histéresis en las válvulas de control degeneran el rendimiento de la planta. La posición de la válvula destaca como una razón más ampliamente reconocida para la ejecución deficiente en los lazos de control. La medición de la tensión de la válvula es esencial para mantener la programación. Para escenarios industriales, la pérdida de ejecución debido a la falta de linealidad en las válvulas de control es un tema imperativo que debe abordarse [15].

##### **3.1.2. Un sistema autónomo de detección de fricción estática en válvulas basado en la caracterización de datos.**

Este artículo propone un sistema de detección de fricción estática en la válvula que selecciona algoritmos de detección basados en caracterizaciones de los datos. Se proponen nuevos índices de características de datos, que cuantifican la presencia de oscilaciones, media no estacionariedad, ruido y no linealidades en cada secuencia de datos. La selección se realiza de acuerdo con las condiciones de los valores de índice en los que cada método se puede aplicar con éxito [16].

### **3.1.3. Modelado y detección de stiction en válvulas de control neumático.**

La fricción estática provoca fluctuaciones persistentes de las variables del proceso. Por lo tanto, desarrollar un método para detectar stiction y distinguirlo del ajuste inadecuado del controlador es crucial para ayudar a los operadores a tomar las medidas adecuadas para mejorar el rendimiento del control. En el presente trabajo, la articulación de la válvula se modela considerando su mecanismo físico y luego se proponen nuevos algoritmos de detección de la articulación [17].

### **3.1.4. Modelo práctico y algoritmo de detección para la formación de válvulas.**

El presente trabajo propone un modelo de válvula de stiction y nuevos algoritmos de detección de stiction. Usando solo dos parámetros, el modelo propuesto puede describir el fenómeno de stiction con suficiente precisión.

La utilidad de los métodos de detección propuestos se demuestra al compararlos con un método convencional. Se muestra que los métodos propuestos detectan con éxito la formación de válvulas, las distinguen de un mal ajuste o perturbaciones, y cuantifican el grado de formación de agujas, utilizando conjuntos de datos de simulación y conjuntos de datos de operaciones reales de varios procesos químicos. [18].

### **3.1.5. Detección de bucles de control de entrada de stiction basados en agrupamiento difuso**

En este artículo, se propone una técnica novedosa basada en un enfoque de agrupación difusa bien desarrollado. Basado en un cambio dramático de la pendiente de las líneas obtenidas de centros de agrupamiento sucesivos en presencia de stiction, se propone un nuevo índice de rendimiento para distinguir la causa de la oscilación. Se proporcionan la simulación, resultados experimentales e industriales [19].

### **3.1.6. Detección de bucles de control de entrada de stiction basados en agrupamiento difuso**

En este artículo, se propone una técnica novedosa basada en un enfoque de agrupación difusa bien desarrollado. Basado en un cambio dramático de la pendiente de las líneas obtenidas de centros de agrupamiento sucesivos en presencia de stiction, se propone un nuevo índice de rendimiento para distinguir la causa de la oscilación. Se proporcionan la simulación, resultados experimentales e industriales [20].

### **3.1.7. Eliminando las no linealidades de stiction de la válvula para la evaluación del rendimiento del control**

Este documento describe una estrategia automatizada para identificar de manera confiable estos períodos lineales de estado estacionario y, posteriormente, calcular los límites inferiores de la varianza mínima. Los resultados de un ejemplo de simulación ilustran que la metodología propuesta es lo suficientemente eficiente y precisa para las clases de sistemas y no linealidades consideradas para proporcionar estadísticas para la evaluación del rendimiento del control para sistemas lineales con no linealidades causadas por válvulas [21].

### **3.1.8. Control de la supervisión del rendimiento del bucle: la experiencia durante más de dos décadas**

Este documento describe la experiencia en la supervisión del rendimiento del bucle de control recopilada por los expertos en control. Con procesos de producción más automatizados y menos expertos, la supervisión del rendimiento del bucle de control (lpm) debe poder evaluar cien bucles a la vez en lugar del análisis de bucle por bucle. Esto no se puede hacer con capacitación o herramientas manuales. En este documento, la perspectiva sobre el monitor de rendimiento de bucle [22].

### **3.1.9. Análisis de frecuencia y compensación de la formación de válvulas en lazos de control en cascada**

Este trabajo se centra en el análisis de frecuencia de las oscilaciones inducidas por la fricción en los bucles de control en cascada y propone un mecanismo de compensación de la oscilación a través del ajuste del controlador externo e interno. También se discute el efecto de la compensación de oscilación al cambiar las estrategias de control. El análisis teórico se evalúa mediante ejemplos de simulación y un experimento de control en cascada de nivel de flujo a escala piloto [23].

## **3.2. MARCO TEÓRICO**

A continuación, se enunciarán métodos para el diagnóstico de fricción estática presente en actuadores con el fin de poder analizar y determinar su funcionamiento para luego así realizar pruebas y seleccionar el adecuado.

### **3.2.1. Métodos para diagnosticar fricción estática.**

#### **3.2.1.1. Diagnóstico de fricción estática basado en el análisis de forma de los gráficos MV-OP**

Las tendencias o formas cualitativas de una señal de serie temporal se pueden representar como una secuencia de valores simbólicos. Un método de detección de stiction basado en el análisis de MV-OP patrones se presenta en esta sección. La descripción es adoptada en gran parte de Yamashita (2006) y Manum (2006).

La representación más simple usaría tres símbolos: creciente (i), constante (s) y decreciente (d).

Estos tres símbolos a veces se llaman más (+), cero (0) y menos (-). Ellos corresponden a los signos de sus respectivas derivadas. La identificación de los símbolos para cada punto de muestreo se basa en las derivadas de tiempo de la señal. En la ausencia de ruido, estos símbolos se pueden identificar utilizando diferencias finitas con un tamaño de ventana apropiado. Deben definirse umbrales para distinguir constante y creciente estados decrecientes. En una señal ruidosa, alguna forma de filtro o una red neuronal puede usarse para identificar las primitivas (Rengaswamy y Venkatasubramanian 1995). Sin embargo, esto hace que el método sea mucho más complicado.

### 3.2.1.2. Detección de fricción estática basada en correlación cruzada

El método más simple para la detección de fricción estática es el propuesto por horch (1999). Está basado en la siguiente idea

Si la función de correlación cruzada  $\phi_{uy}(\tau)$  entre la salida del controlador  $u$  y el proceso la salida  $y$  es una función impar (es decir, asimétrica w.r.t. el eje vertical), es probable la causa de la oscilación es la fricción.

Si la función de correlación cruzada  $\phi_{uy}(\tau)$  es par (es decir, simétrica w.r.t. el vertical eje), entonces es probable que la fricción no haya causado la oscilación. en este caso, la oscilación puede deberse a perturbaciones externas, interacción o afinación agresiva del controlador.

### 3.2.1.3. Diagnostico basado en el ajuste de curvas.

Se realiza un ajuste de datos PV, OP para detectar la firma típica de fricción estática y distinguirlo de otras causas.

He y col. (2007) propuso una técnica de detección de fricción estática de válvula, en la cual el controlador la salida o la variable de proceso se ajustan por partes (cada medio ciclo significativo) a los segmentos de curva triangular (figura 1) y sinusoidal (figura 2) usando un método ls. Si el ajuste para la onda triangular es mejor, entonces se concluye la fricción estática.

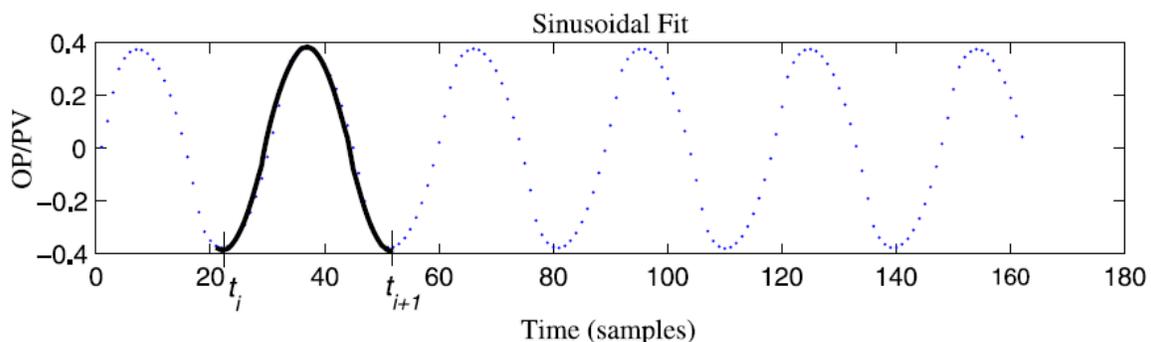


Figura 2. Ajuste senoidal (Autoría propia).

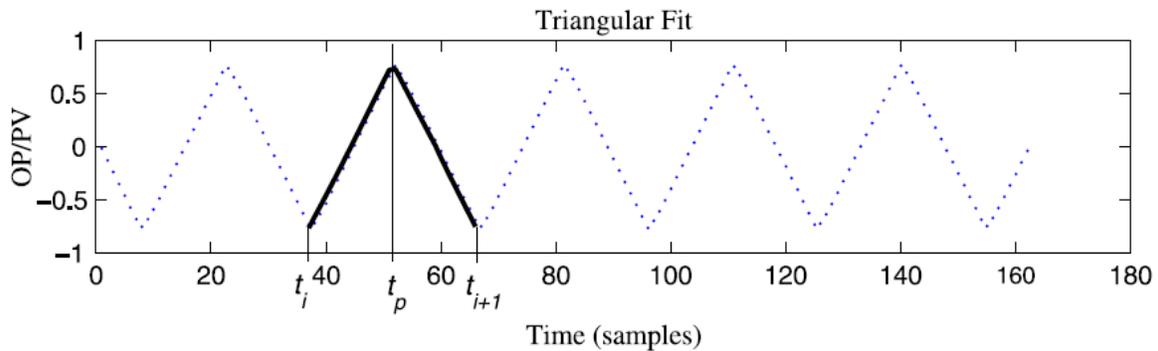


Figura 3. Ajuste triangular (Autoría propia).

De lo contrario, no se produce ningún problema. Al comparar el error entre datos reales y ajustados, una evaluación de la precisión de la aproximación y luego un índice de fricción estática puede ser adquirido.

- **Ajuste senoidal**

La señal OP o PV se instala de manera inteligente para cada medio período de oscilación (figura 1), lo que significa que cada pieza de ajuste puede tener una amplitud diferente y / o frecuencia. Esta consideración es razonable, pues en los procesos reales hay ruido y hay perturbaciones en las señales, por lo tanto, la magnitud y frecuencia de la oscilación puede cambiar de vez en cuando, y también pueden producirse señales asimétricas. Denotando la señal que se ajustará como  $y(t)$ , la función objetivo para la sinusoidal el ajuste es (Ecuación 1):

$$J_{sin} \min \| y(t) - A \sin[\omega(t_i : t_i + 1 - t_i) + \phi] \|_2$$

Ecuación 1. Ajuste senoidal

Donde  $A$  es la amplitud,  $\omega$  la frecuencia y  $\phi$  el desplazamiento de fase de la senoide. De manera inteligente, podemos establecer  $\phi = 0$ . Utilizamos un método iterativo numérico, es decir, método no lineal de mínimos cuadrados (`lsqnonlin` / `lsqcurvefit` de MATLAB) para encontrar el mejor ajuste. Los valores iniciales para el período de oscilación  $t_p$ , y por lo tanto para  $\omega$ , se determinan a partir del método de detección de oscilación. Ha puede establecerse inicialmente en el valor medio pico de la señal. Sin embargo,  $\omega$  y  $a$  se ajustan para cada medio período de la señal, como se mencionó encima. Para obtener una transición suave de la curva aproximada entre ambos medios períodos, el uso de algunos datos superpuestos puede ser útil.

- **Ajuste triangular**

El ajuste triangular (figura 2) es más difícil porque es una pieza curva ajustada con dos grados de libertad: la ubicación y la magnitud de la máxima en nuestra implementación, no utilizamos el algoritmo iterativo propuesto por he y col. (2007), pero ajusta dos piezas lineales a los datos en cada medio período (Ecuación 2):

$$J_{tri} = \min \| y(t) - a\Delta t + b \|$$

*Ecuación 2. Ajuste triangular*

$\delta t$  es la diferencia de tiempo (o diferencia de índice de tiempo) entre cada  $t_i$  entre  $t_p$  y para el primer ajuste lineal, y esa diferencia entre  $t_p$  y  $t_i + 1$  para la segunda conexión lineal  $l_s$ . El ajuste se realiza mediante la función “polyfit” de MATLAB con un grado polinómico de unidad. También aquí, el uso de algunos datos superpuestos puede ser útil para lograr una transición suave de la curva aproximada entre los medios períodos. El error cuadrático medio general para el ajuste triangular  $J_{tri}$  es el promedio de las mpe en todos los períodos de tiempo considerados.

#### **3.2.1.4. Análisis espectral**

Fundamento o principio: Algunos equipos exhiben un espectro de frecuencia típica sobre condiciones de operaciones normal; cualquier desviación de éste es una indicación de anomalías o fallas. Ciertos tipos de fallas pueden tener características repetitivas en el espectro y facilitar el diagnóstico. El espectro de una señal se determina por medio de la Transformada de Fourier Discreta, (TFD).

La TFD transforma una secuencia ordenada de datos muestreados del dominio de tiempo al dominio de la frecuencia de manera que la información acerca de esa secuencia de datos pueda ser conocida explícitamente. [24]

#### **3.2.1.5. Distribuciones Probabilísticas**

Fundamento o principio: La función de densidad de la distribución normal o Gaussiana permite estudiar la distribución de los errores o desviaciones (fallas) respecto al promedio aritmético. El gráfico de la distribución normal tiene la forma de una campana donde la mayor frecuencia de valores se encuentra en el centro coincidiendo con la media aritmética y sus extremos se acercan al eje horizontal sin que lleguen a unirse.

Los datos se distribuyen simétricamente respecto a la media aritmética. La distribución normal está completamente determinada en su forma y localización con los parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ , la desviación estándar y la media respectivamente [25].

### 3.2.1.6. Gráficos de Control Estadístico

Fundamento o principio: Se basa en el muestreo constante de una variable que se encuentra bajo control. Este gráfico puede ser utilizado para detectar fallas en progreso, ya que permite registrar las variaciones que sobrepasan cualquier diferencia natural en el proceso durante un período determinado (variaciones por causa asignable).

Existen diferentes tipos de gráficos de control que ayudan a detectar las variaciones por causa asignable, como son: el gráfico X, que tienen por objeto medir la variación de las medias muestrales y el gráfico R que mide la variación del recorrido o rango de las muestras [25].

### 3.2.1.7. Filtros Detectores de Fallas

Fundamento o principio: El filtro de detección está intrínsecamente ligado con la teoría de los sistemas de observación, donde se trata de reconstruir el vector de estado del sistema original, con el único objeto de generar un vector residual, como resultado de la diferencia vectorial de la dinámica del sistema real y la estimada por el sistema de observación.

### 3.2.2. Proceso de diagnóstico

La Figura 4, ilustra un esquema general de un sistema de detección y diagnóstico de fallas. En este esquema, las entradas y salidas del bloque proceso-controlador alimentan un sistema de supervisión encargado de detectar la presencia de fallas y diagnosticar su naturaleza.

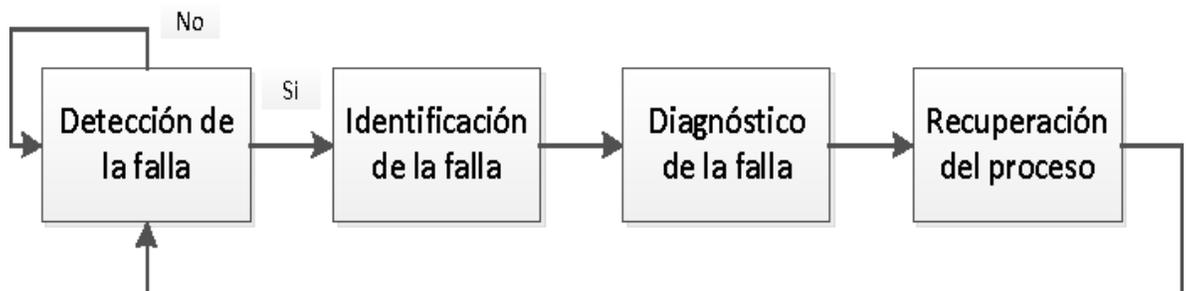


Figura 4. Proceso de diagnóstico (Autoría propia).

A continuación, se enunciarán términos importantes utilizados en el desarrollo del proyecto.

#### **3.2.2.1. Tribología.**

La tribología es una ciencia interdisciplinaria basada en el conocimiento y experiencia de diferentes campos tales como la ingeniería mecánica, ciencia e ingeniería de los materiales, química e ingeniería química.

- a) Fricción – la resistencia al movimiento de un cuerpo moviéndose contra otro.
- b) Desgaste – la pérdida de material debido al movimiento.
- c) Lubricación – el uso de un fluido para minimizar la fricción y el desgaste.

Estos últimos años la tribología ha ido ganando importancia en el campo del conformado de chapa metálica ya que tiene en cuenta los efectos del movimiento, así como la interacción entre el material de la chapa, el lubricante y la herramienta o el material de revestimiento durante el proceso de conformado. Estas interacciones tribológicas influyen en la calidad final de las piezas conformadas, así como en la estabilidad y eficiencia del proceso de producción [27]

### **a) Fricción.**

Se define como fuerza de rozamiento o fuerza de fricción entre dos superficies en contacto a la fuerza que se opone al movimiento de una superficie sobre la otra (fuerza de fricción cinética) o a la fuerza que se opone al inicio del movimiento (fuerza de fricción estática). Las fuerzas de fricción son importantes en la vida cotidiana ya que nos permiten caminar y correr. Toda fuerza de fricción se opone a la dirección del movimiento relativo [28].

### **b) Desgaste.**

El proceso de desgaste puede definirse como una pérdida de material de la interfase de dos cuerpos, cuando se les ajusta a un movimiento relativo bajo la acción de una fuerza. En general, los sistemas de ingeniería implican el movimiento relativo entre componentes fabricados a partir de metales y no metales, y se han identificado seis tipos principales de desgaste, como sigue [27]:

- Desgaste por adherencia.
- Desgaste por abrasión.
- Desgaste por ludimiento.
- Desgaste por fatiga.
- Desgaste por erosión.
- Desgaste corrosivo

### **c) Lubricación.**

El propósito de la lubricación es la separación de dos superficies con deslizamiento relativo entre sí de tal manera que no se produzca daño en ellas: se intenta con ello que el proceso de deslizamiento sea con el rozamiento más pequeño posible. Para conseguir esto se intenta,

siempre que sea posible, que haya una película de lubricante de espesor suficiente entre las dos superficies en contacto para evitar el desgaste [27]

## **4. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO**

### **4.1. METODLOGÍA**

Esta investigación es cuantitativa ya que se basa en el análisis de conceptos y adquisición de datos. La herramienta por desarrollar tendrá la capacidad de funcionar por medio de la recolección de datos para reconocer: oscilaciones o perturbaciones dentro del sistema de control.

### **4.2. TIPO DE ESTUDIO**

El tipo de metodología a implementar para el presente estudio es cuantitativo dado que es un procedimiento que se basa en la utilización de los números para analizar, investigar y comprobar tanto información como datos. La investigación o metodología cuantitativa se produce por la causa y efecto de las cosas, y es uno de los métodos más conocidos y utilizados en las materias de ciencias, como las matemáticas, la informática y la estadística.

### **4.3. 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, los sectores que más utilizan los lazos de control son los manufactureros, químicos, farmacéutico, etc. Con el fin de mantener la satisfacción cliente/usuario y maximizar así ganancias transformando materia prima en productos terminados; cumpliendo restricciones de operación, calidad, seguridad, ambientales y legales.

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

#### **4.4. MÉTODO DE LA INVESTIGACION.**

En este proyecto se utiliza el método de Análisis o Analítico, pues en este se distinguen los elementos del fenómeno de estudio y se procede a revisar ordenadamente cada uno de ellos por separado, comparándolos con un sistema ideal bajo las mismas circunstancias, pero en ausencia de la fricción estática.

#### **4.5. RECOLECCIÓN DE DATOS.**

Los datos para la implementación de los algoritmos de detección serán recolectados de la página web de SACAC (south African council for automation and control) que es un repositorio de listas de datos en donde se muestra el comportamiento de dispositivos de plantas (actuadores) que poseen fricción estática.

## 4.6. CRONOGRAMA

Tabla 1. Cronograma de actividades

<b>Universidad Autónoma del Caribe</b> <b>Proyecto de Grado - Ingeniería Mecatrónica</b> <b>Cronograma de actividades</b>				
COMPONENTES	DESCRIPCIÓN	FECHA INICIO	FECHA FINAL	DURACIÓN TOTAL (DIAS)
OBJETIVO 1	Realizar un análisis comparativo de las técnicas de detección de fricción estática en los actuadores en lazos de control.	06-Nov-19	28-Nov-19	22
Entregable # 1	Cuadro comparativo de las diferentes técnicas de detección de fricción estática en los sistemas de control.			
Actividad 1	Revisión del estado del arte de las diferentes técnicas de detección/diagnóstico de fricción estática en los actuadores en los sistemas de control.	06-Nov-19	20-Nov-19	14
Actividad 2	Determinar lineamientos de priorización de las técnicas de detección/diagnóstico de fricción estática en los actuadores de lazos de control.	20-Nov-19	24-Nov-19	4
Actividad 3	Realizar la comparación de las diferentes técnicas de detección de fricción estática en los actuadores en los sistemas de control en base a los lineamientos definidos.	24-Nov-19	28-Nov-19	4
OBJETIVO 2	Implementar al menos 3 técnicas de detección de fricción estática en lazos de control	28-Nov-19	12-Jan-20	45
Entregable # 2	Informe comparativo de los diferentes softwares (herramienta computacional)			
Actividad 4	Cuadro de costo/ beneficios de los softwares existentes.	28-Nov-19	03-Dec-19	5
Actividad 5	Selección del software adecuado para la implementación las técnicas seleccionadas.	03-Dec-19	06-Dec-19	3
Entregable # 3	Documentación de las técnicas seleccionadas			
Actividad 6	Seleccionar 3 de todas las técnicas de detección/diagnostico clasificadas según los lineamientos de priorización determinados.	06-Dec-19	12-Dec-19	6
Actividad 7	Implementación de las técnicas seleccionadas.	12-Dec-19	31-Dec-19	19
Actividad 8	Caracterización de las 3 técnicas seleccionadas de acuerdo con metodología o procedimientos en la herramienta computacional seleccionada.	31-Dec-19	12-Jan-20	12
OBJETIVO 3	Validar los algoritmos implementados por medio de la herramienta computacional	12-Jan-20	01-Apr-20	80
Entregable # 4	Estructura de validación de algoritmos			

Actividad 9	Selección de los criterios y limitaciones que se aplicarán para la validación de los algoritmos de las técnicas de detección de fricción estática en los actuadores.	12-Jan-20	15-Jan-20	3
Actividad 10	Definición pruebas a realizar para la validación de los algoritmos y su correspondiente metodología.	15-Jan-20	20-Jan-20	5
Entregable # 5	Documentación de los resultados obtenidos de acuerdo con estructura de validación			
Actividad 11	Recolección de datos necesarios para la realización de las pruebas previamente definidas.	20-Jan-20	01-Feb-20	12
Actividad 12	Desarrollo de pruebas simulando entornos ideales/reales además de errores intencionales en lazos de control.	01-Feb-20	03-Mar-20	31
Actividad 13	Reporte del rendimiento de la de las técnicas implementadas en dispositivos de la planta.	03-Mar-20	12-Mar-20	9
Actividad 14	Validación de los algoritmos implementados por medio de la herramienta computacional.	12-Mar-20	01-Apr-20	20
				147
				Duración total (Días)

## 5. PRESUPUESTO

### 5.1. PRESUPUESTO GENERAL

Tabla 2. 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	\$ 8.070.682	\$ 300.000	\$ 0,00	\$ 8.370.682
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
<b>TOTAL, PRESUPUESTO DEL PROYECTO</b>	\$ 0,00	\$ 9.070.682	\$ 971.000	\$ 60.350.460	\$ 83.361.142

## 5.2. PERSONAL CIENTÍFICO Y DE APOYO

El presupuesto invertido en este rubro consiste en el costo del tiempo empleado por el personal de investigación vinculados a este proyecto, que incluye a los directores y a los auxiliares de investigación.

*Tabla 3. 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. Stephany Sucerquia Rincones	Invest. Principal	Titular	\$ 46.666	12	48	Ing. mecatrónica	\$ 26.879.616	\$ 26.879.616
4. Leonardo Escobar Davidson	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 4. Costo personal de apoyo.*

2. PERSONAL DE APOYO								
Nombres y Apellidos	Función dentro del Proyecto	Tipo de Vinculación	Valor Hora (\$)	Dedicación Horas/semana	No. de Semanas	Fuentes de Financiamiento		
						Otras Fuentes Externas	Contrapartida UAC	SUB-TOTAL
1. Diego Ramírez	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 5. 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

El presupuesto dedicado a esta sección incluye licencia de Matlab, investigaciones, consultas y papelería.

Tabla 6. 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.Papeleria	Documentación de la investigación	-	\$ 100.000	\$ 100.000
<b>SUB-TOTAL</b>		<b>\$ 8.070.682</b>	<b>\$ 300.000</b>	<b>\$ 8.370.682</b>

Tabla 7. Costo trabajo de campo.

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

Tabla 8. Costo equipos usados

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

## 6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al ser parte de un macroproyecto el proceso de diagnóstico de fricción estática de herramienta computacional que nos compete en este documento, depende de la detección de las oscilaciones por un dispositivo anterior.

En el siguiente diagrama de flujo (figura 5), se explica el proceso que sigue la herramienta computacional:

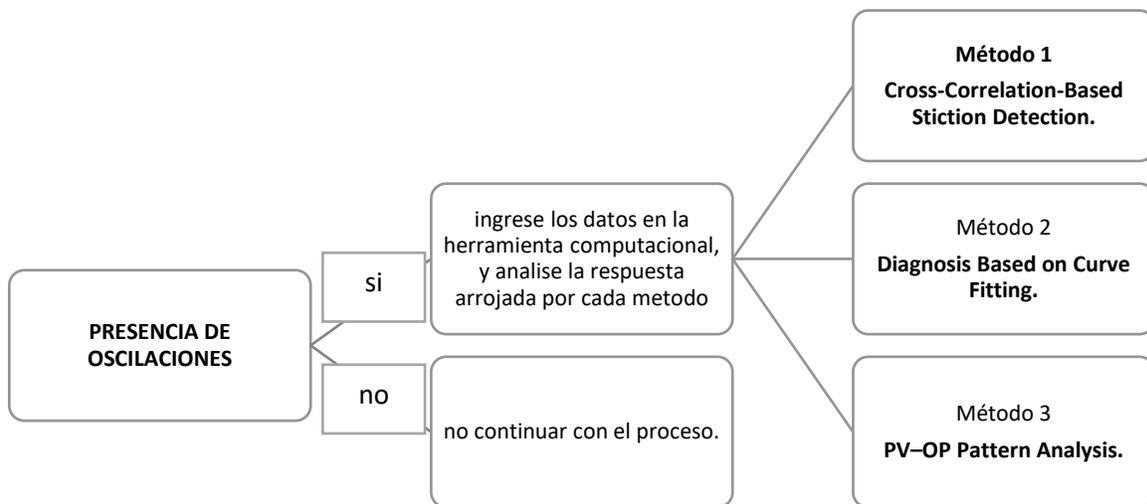


Figura 5. Diagrama de flujo de la herramienta computacional (Autoría propia)

Luego de analizar los resultados arrojados por la herramienta computacional, se puede concluir que existe fricción estática en el sistema si 2 de los 3 métodos indican la presencia de esta, de otro modo, las oscilaciones detectadas podrían haber causadas por otro tipo de problema o perturbación.

## 6.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO

Antes de empezar con la programación de la herramienta computacional, se realizaron los estudios pertinentes (ver tabla 9) para seleccionar los tres métodos a implementar a partir de los lineamientos de priorización que son los siguientes mencionados:

lineamientos de priorización:

- Precisión de la información entregada por la técnica.
- Facilidad de implementación de la técnica.
- Confiabilidad de la información

Tabla 9. Cuadro comparativo de métodos para diagnosticar fricción estática.

METODO	APLICACIÓN	INFRAESTRUCTURA DE IMPLEMENTACION
<b>DETECCIÓN DE FRICCIÓN ESTÁTICA BASADA EN CORRELACIÓN CRUZADA</b>	Estadística simple y diagnósticos avanzados. Gran manejo de presión y confiabilidad.	Diagnostica la fricción estática por medio de la no linealidad y el desplazamiento en los actuadores.
<b>DETECCIÓN DE NO LINEALIDAD Y ANÁLISIS DE PATRÓN PV-OP</b>	Se lleva a cabo primero utilizando un método estadístico de orden superior basado en Índices NGI y NLI, Una vez que se detecta o no linealidad, los datos son tratado por un filtro Wiener (PVf, OPf) y el gráfico PVf – OPf, generado a partir de un segmento de los datos que tienen oscilaciones regulares, se utilizan para aislar su causa.	Diagnostica la no linealidad, analizando el comportamiento del movimiento de la válvula o el cambio en la señal de entrada a la válvula.

<p><b>DIAGNÓSTICO BASADO EN EL AJUSTE DE CURVAS</b></p>	<p>Se realiza un ajuste de datos pv, op o sp – pv, para detectar la firma típica de fricción estática y distinguirlo de otras causas.</p>	<p>el controlador la salida o la variable de proceso se ajustan por partes (cada medio ciclo significativo) a los segmentos de curva triangular y sinusoidal usando un método ls</p>
<p><b>ANÁLISIS ESPECTRAL</b></p>	<p>Detección y diagnóstico de fallas por vibraciones en el espectro de la señal de máquinas rotativas, ya sea por excitaciones internas (comportamientos involuntarios) o por excitaciones externas como desbalance de masas, desalineación, roce en cojinetes de la máquina vibrante, entre otros.</p>	<p>Detección y diagnóstico de fallas por vibraciones en el espectro de la señal de máquinas rotativas, ya sea por excitaciones internas (comportamientos involuntarios) o por excitaciones externas como desbalance de masas, desalineación, roce en cojinetes de la máquina vibrante, entre otros.</p>
<p><b>DISTRIBUCIÓN PROBABILÍSTICA</b></p>	<p>La dispersión de los datos detecta cambios y fallas de curvas características de los equipos. Puede diagnosticar desgaste en componentes móviles.</p>	
<p><b>GRÁFICOS DE CONTROL ESTADÍSTICO</b></p>	<p>Este gráfico puede ser utilizado para detectar fallas en progreso, ya que permite registrar las variaciones que sobrepasan cualquier diferencia natural en el proceso durante un período determinado (variaciones por causa asignable).</p>	<p>Los diferentes estados de las variables, de los instrumentos como de los equipos de las plantas son monitoreados y controlados por el Sistema de Control Distribuido. Estos datos son obtenidos por medio de una red de área local y almacenada en una base de datos en tiempo real del Sistema de Información de Planta (PI).</p>
<p><b>FILTROS DETECTORES DE FALLAS.</b></p>	<p>Este tipo de sistema de detección de fallas tiene su aplicación principalmente, donde la generación de residuales físicos no es posible y cuando se dispone del modelo matemático del proceso.</p>	<p>El algoritmo generador de residuales debe residir en un sistema de computación diferente al DCS. Puede estar ubicado en un sistema local (dedicado) o a niveles de mayor jerarquía (nivel supervisor, nivel de optimización o planificación).</p>

Durante el desarrollo de la herramienta computacional se realizaron en total siete versiones debido a las correcciones y ajustes de los lineamientos que se iban encontrando conforme se avanzaba hasta llegar a la versión actual que cumple con los requisitos pertinentes.

En esta sección se describen las versiones versiones 2, 5 y 6 que corresponden a las fases de prototipo de la herramienta computacional (de 7 realizadas en total contando la fase final).

En estas se evidencia con mayor notoriedad el avance del desarrollo de la herramienta computacional.

### 6.1.1. Version 2 del prototipo

En esta versión se desarrolló la vista general de la interfaz (Figura 6). Se organizó por medio de pestañas, de tal modo que en cada una se encontrase un método de detección de fricción estática.

A partir del desarrollo de la interfaz se empezó a trabajar en el primer método.

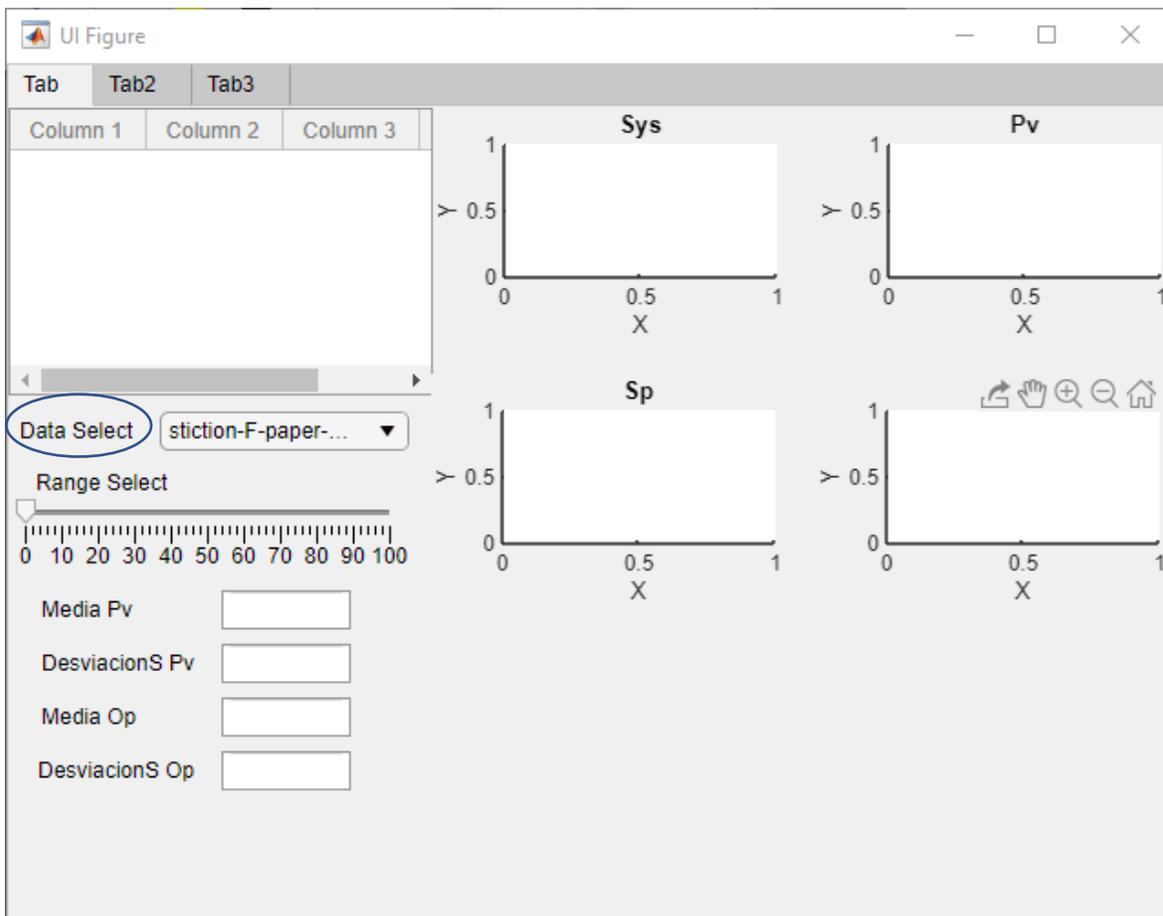


Figura 6. Ventana principal V2 (Autoría propia).

Para seleccionar los datos se utilizaba un menú expandible 'Data Select', el cual fue descartado en versiones posteriores por falta de versatilidad, además presentaba una pobre distribución del espacio.

### 6.1.2. Versión 5 del prototipo

En esta versión se logró mejorar distribución de espacios, además cada método se encontraba en su respectiva pestaña. Se realizaba el proceso de detección por medio del conocimiento de las gráficas.

En esta versión la herramienta computacional aún no mostraba si se había encontrado o no fricción estática.

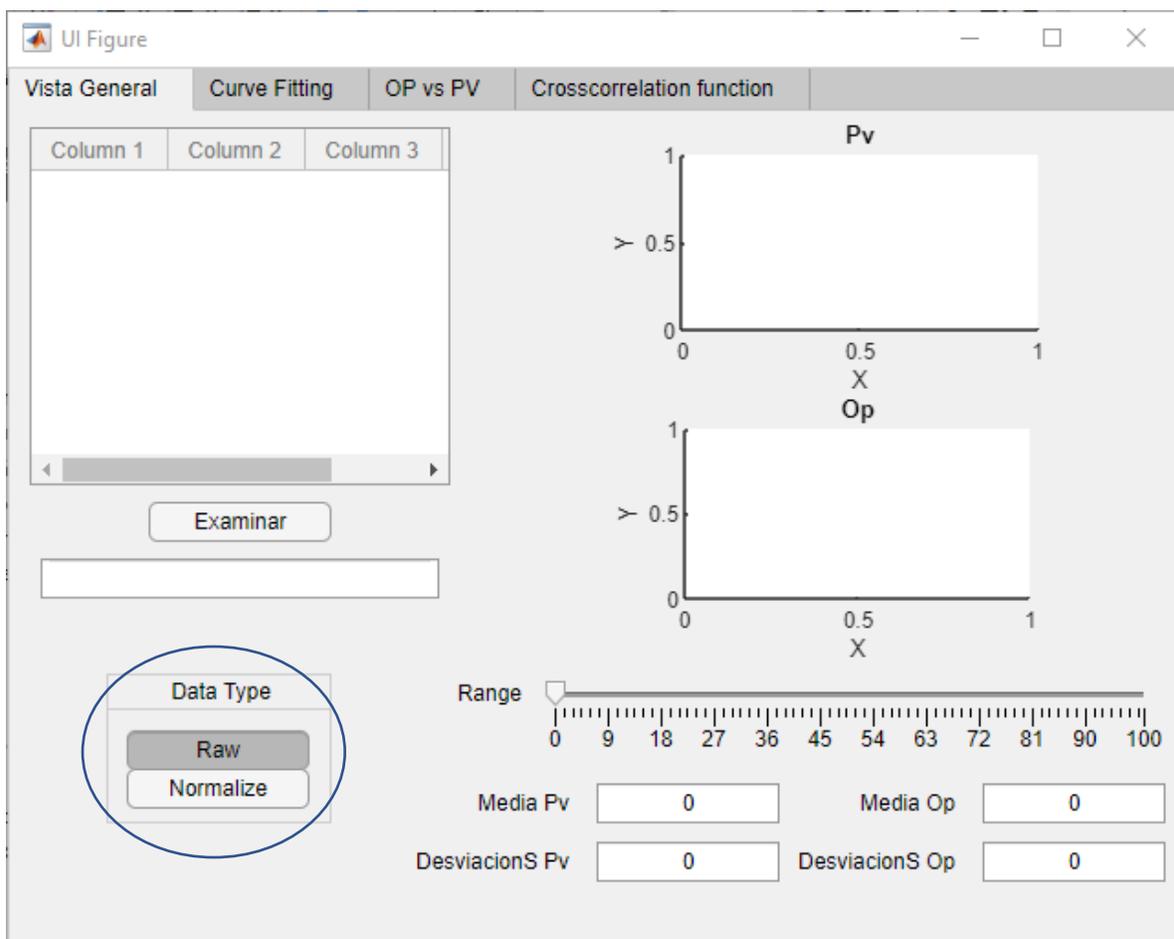


Figura 7 Ventana principal V5 (Autoría propia).

Como se observa en la figura 7, se anularon las gráficas del sistema y de la del set pont dado que fueron consideradas innecesarias.

Se cambió el menú desplegable por el botón de 'Examinar', el cual abre una ventana emergente (Figura 8), en donde el usuario buscara los datos con los que desee trabajar, además se agregó un switch 'Data Type', para cambiar el modo en que se visualizan los datos.

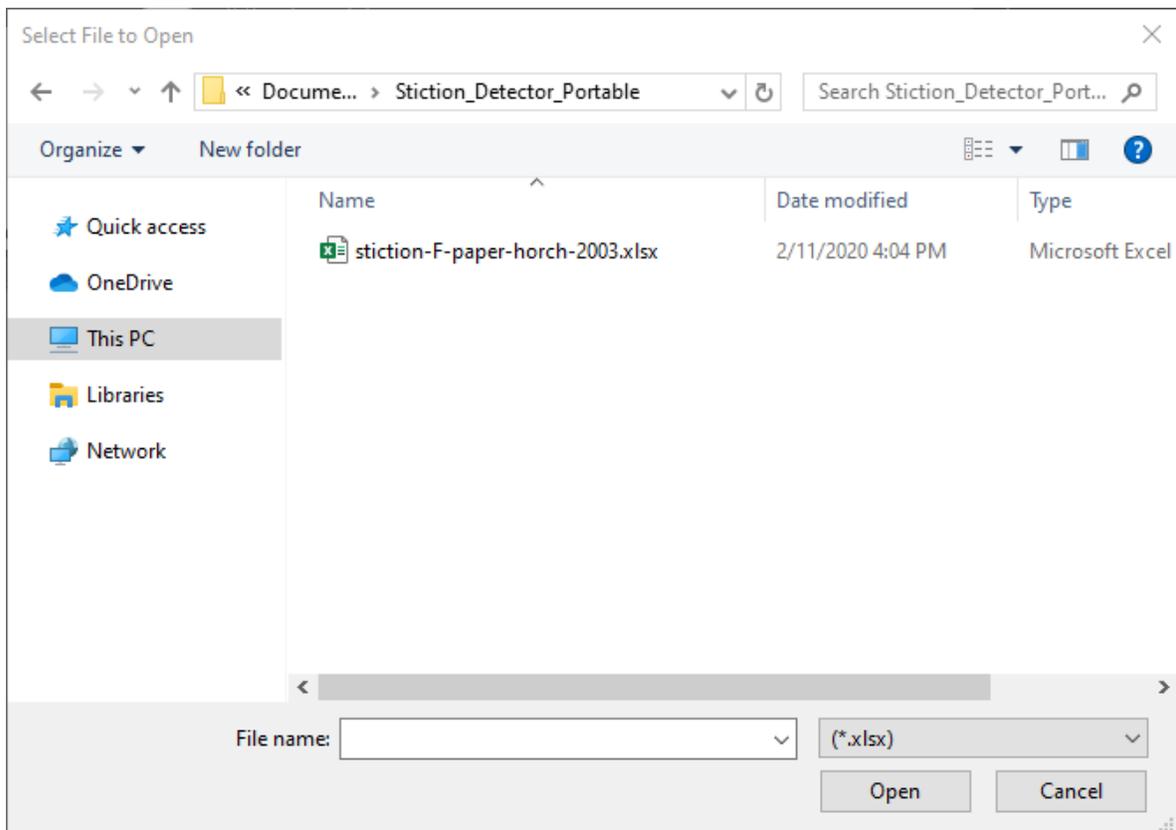


Figura 8 Ventana emergente buscar datos (Autoría propia)

### 6.1.3. Versión 6 del prototipo

En esta versión se llegó a la conclusión de que los métodos eran intuitivos, es decir, que no dependían de un valor o una constante que se aplicara a todas las posibilidades, por consiguiente, la herramienta computacional no cuenta con ventanas emergentes que notifiquen la existencia o no de fricción estática.

Por lo tanto, se optó por adecuar la interfaz para que el usuario pudiese entender por sí mismo los resultados que el programa muestra.

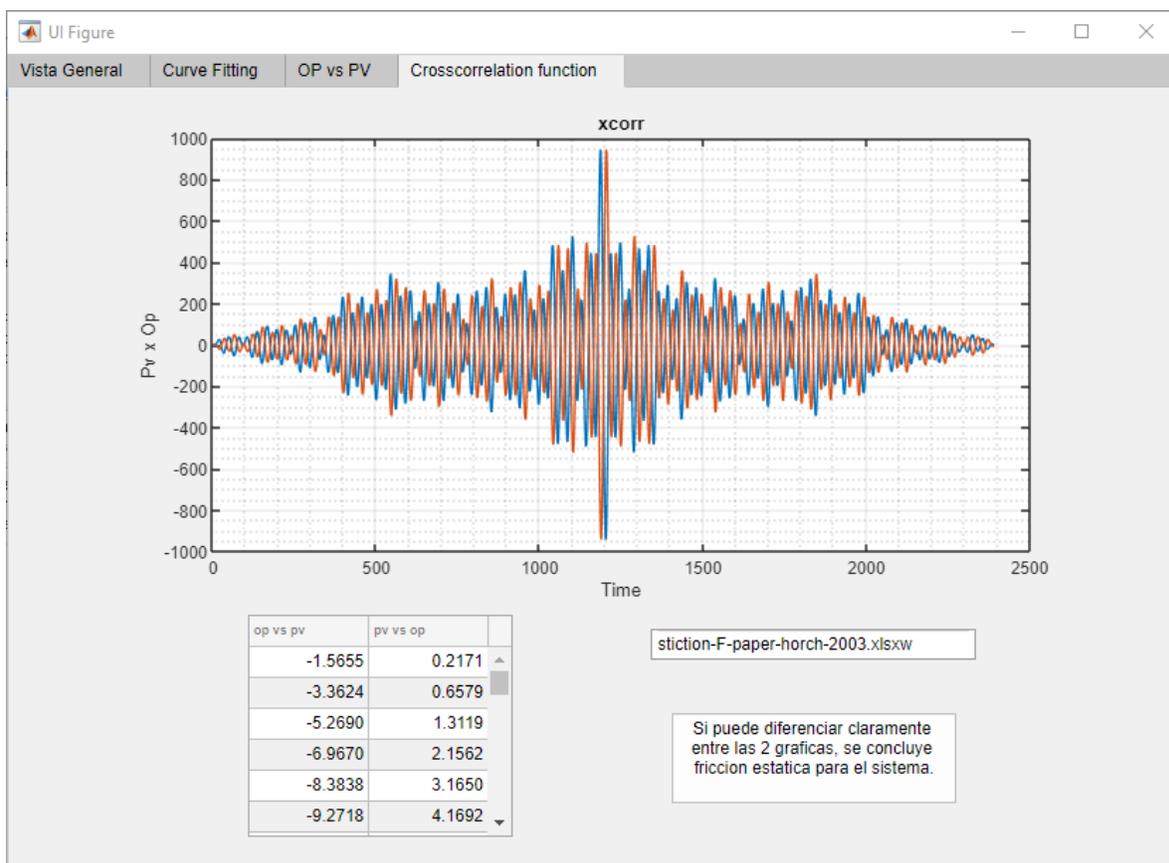


Figura 9. Pestaña 'CrossCorrelation function' V6 (Autoría propia).

En la anterior imagen (figura.9), se muestra la pestaña 'crosscorrelation function', correspondiente al método Cross-Correlation-Based Stiction Detection, en esta se hace uso de tablas, colores y cuadros de texto para guiar al usuario.

## 6.2. DISEÑO DISPOSITIVO FINAL

La versión 7 es la herramienta computacional ya finalizada, esta fue sometida a cambios estéticos, como por ejemplo la adición de reglas y cuadrículas en las gráficas, la opción de acercar y alejar para mejor visualización, además de arreglos en la distribución de elementos y relación de tamaño entre pestañas.

- El dato usado para la prueba e imagen mostradas en los apartados 6.2.1, posee fricción estática y su nombre es 'stiction-F-paper-horch-2003'.

### 6.2.1. Pestaña 'Vista general'

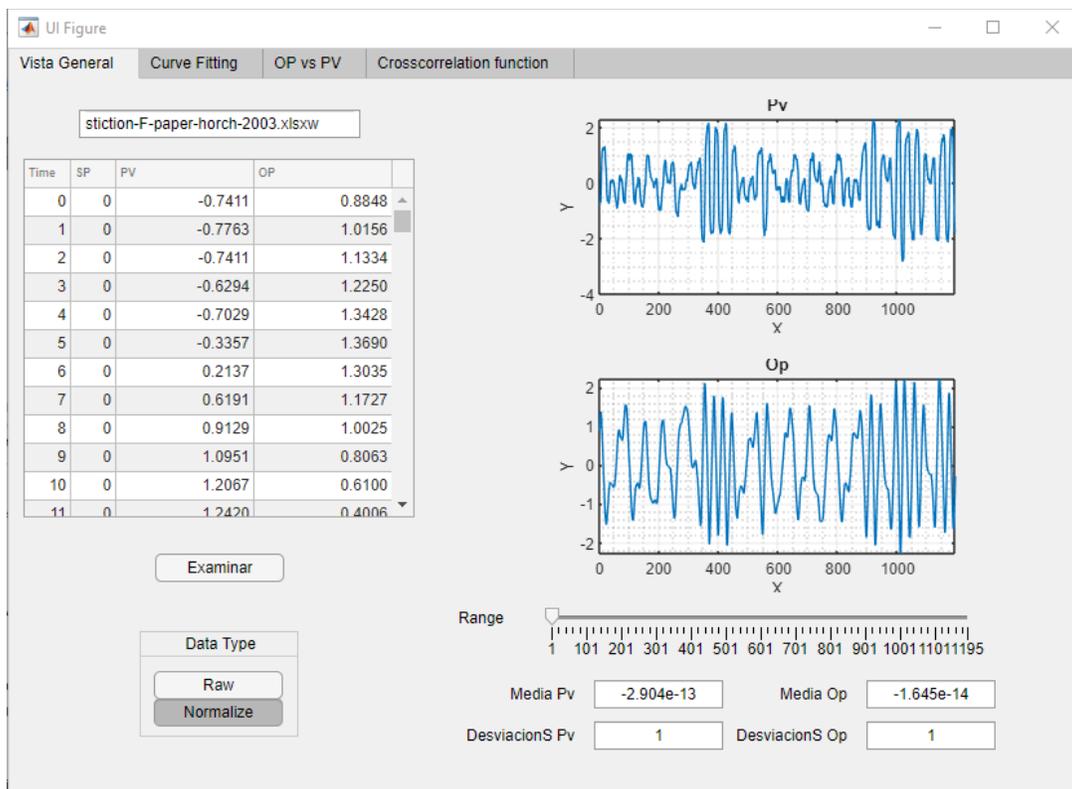


Figura 10. Ventana principal, V7 stiction (Autoría propia)

## **6.3. MATERIALES**

### **6.3.1. Software Matlab**

Sistema de cómputo numérico que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, macOS y GNU/Linux.

Entre sus prestaciones básicas se hallan la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets). [31]

### **6.3.2. Herramienta de interfaz gráfica app designer**

App Designer es un toolbox de MATLAB que permite crear aplicaciones profesionales sin tener que ser un desarrollador de software profesional. Arrastrando y soltando componentes visuales para diseñar el diseño de su interfaz gráfica de usuario (GUI) y usando el editor integrado para programar rápidamente su comportamiento.[31]

### **6.3.3. Computadora**

Maquina fundamental en el desarrollo de la herramienta computacional, además de ser la plataforma en la que está direccionada principalmente dicha herramienta, usada tanto para programación y diseño como para la recolección de datos.

### 6.3.4. recolección de datos

Las muestras usadas para las pruebas y desarrollo de la herramienta computacional fueron obtenidas del repositorio web de SACAC (the South African Council of Automation and Control)

Éstas se encuentran repartidas en paquetes o carpetas, en cada uno se encuentra un documento Excel que contiene los datos (ver tabla. 10), y un documento de texto que brinda una breve descripción del proceso del cual fueron obtenidos

*Tabla 10. Recolección de datos.*

Time	SP	PV	OP
1	110	107.5	13.85
2	110	107.38	13.95
3	110	107.5	14.04
4	110	107.88	14.11
5	110	107.63	14.2
6	110	108.88	14.22
7	110	110.75	14.17
8	110	112.13	14.07
9	110	113.13	13.94
10	110	113.75	13.79
11	110	114.13	13.64
12	110	114.25	13.48
13	110	114.38	13.32
14	110	114	13.18
15	110	114.38	13.01
16	110	114.13	12.87

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

En la tabla 11 se muestran los datos obtenidos.

*Tabla 11. Paquetes de datos obtenidos*

<b>FILE NAME</b>	<b>DATA LENGTH</b>	<b>TYPE OF MEASUREMENT</b>	<b>DESCRIPTION</b>
stiction-F-paper-horch-2003	1196	Flow	The flow loop shows stiction in the control valve. The PV range is 0-400 and the operating range 0-100%.
stiction-L-chemicals-Thornhill-2003	8640	Level	The analysis in [1] showed that the level control loop LC2 had a sticking valve that caused the control loop to have a limit cycle oscillation. The disturbance caused by this control loop (Tag 22) propagated throughout the plant. A second disturbance is also present in Column 3 (Tags 23-28 and Tag 30) in the form of non-periodic transient excursions. It enters with the direct injection of steam into the column and propagates from the bottom to the top of the column.
stiction-L-paper-horch-2003	1147	Level	This level loop shows control valve stiction. The PV range is 0-100, the operating range 0-100%.
stiction-L-power-baccidicapaci-2018	8641	Level	This is an example of valve stiction in a power plant.
stiction-P-chemical-baccidicapaci-2018	1000	Pressure	This is an example of valve stiction in a pressure control loop. The data is normalised from a larger data set.
stiction-P-oilgas-baccidicapaci-2018	721	Pressure	This is an example of valve stiction in a pressure control loop.
stiction-P-oilgas-DB-N-baccidicapaci-2018	721	Pressure	This is an example of valve stiction in a pressure control loop (consistent behavior among the different runs).

## 6.4. ANALISIS DE RESULTADOS

A través de los estudios realizados y documentados en el entregable # 2 (anexo entregable # 2) se seleccionó el software más adecuado para el desarrollo de la herramienta computacional. Con base al software seleccionado y a los lineamientos de priorización descritos en la sección 6.1 de este documento se realizó un análisis comparativo (tabla 9) de los métodos existentes para la detección de fricción estática en sistemas de control, posteriormente se seleccionó e integró tres de estos métodos, Finalmente se verifico y valido la funcionalidad de la herramienta diseñada.

- El dato usado para la pruebas e imágenes mostradas en los apartados 6.4.1 a 6.4.4, posee fricción estática y su nombre es 'stiction-F-paper-horch-2003'.

### 6.4.1. Pestaña 'Vista general'

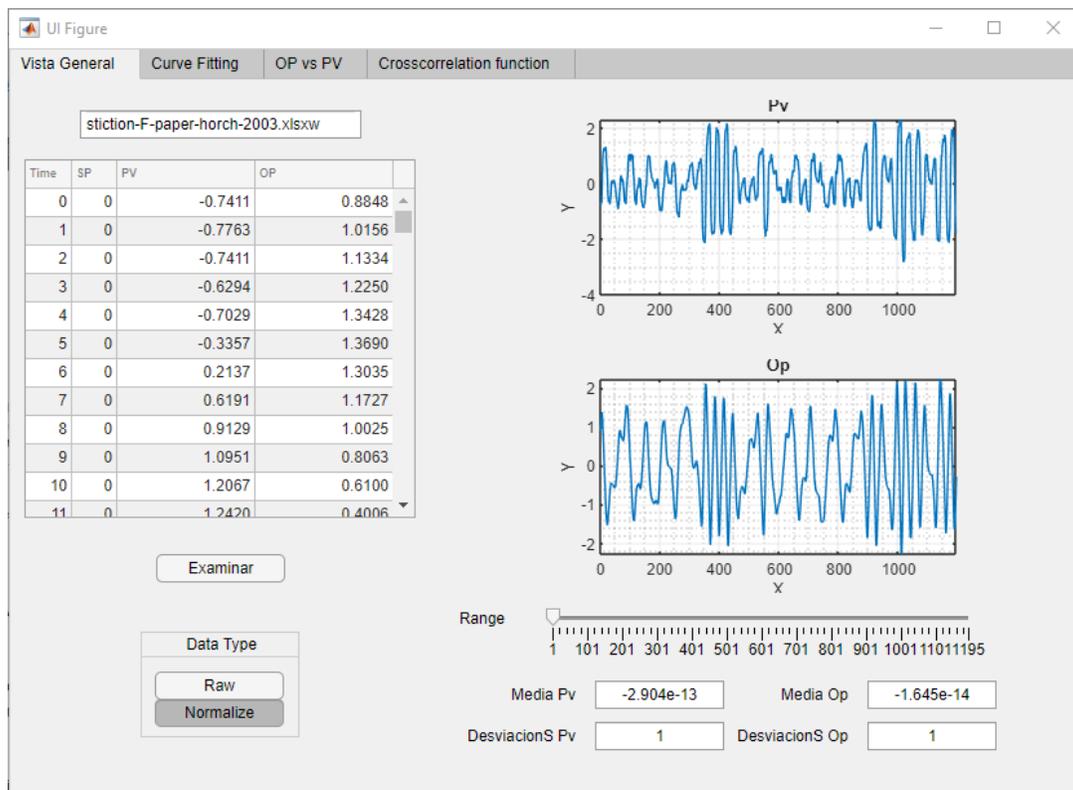


Figura 11. Ventana principal, V7 stiction (Autoría propia)

En esta ventana ( ver figura 10), además de poder ver las graficas de los datos PV y OP, en la parte inferior se encuentra una barra deslizante para manipular el rango máximo del eje horizontal de ambas graficas, y por ultimo los valores de la media y al desviacion estandar de ambas variables.

#### 6.4.2. Pestaña 'Curve fitting'

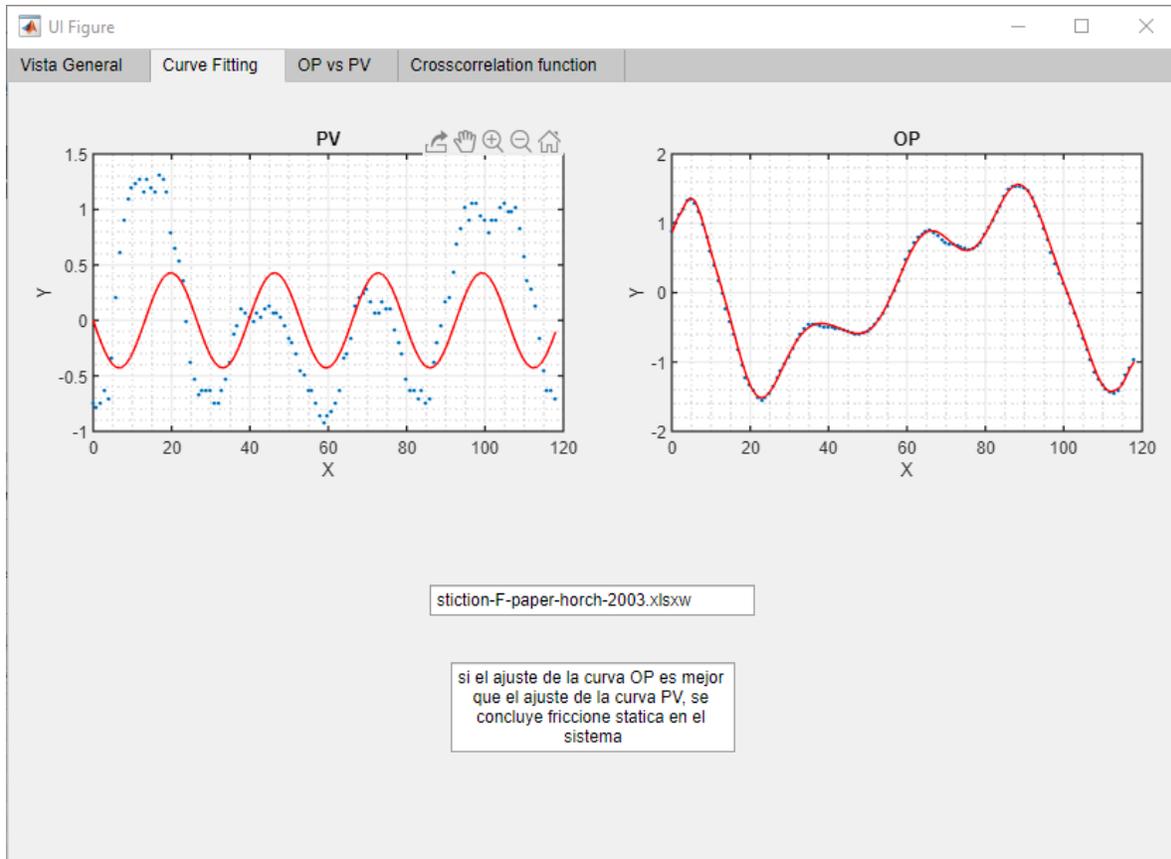


Figura 12. Pestaña 'Curve fitting, V7 (Autoría propia)

En esta pestaña (ver figura 11), se aplica el método curve fitting, el cual consiste en tomar los datos de PV y OP y ajustarlos a una onda senoidal y triangular respectivamente debido a su naturaleza.

La condición para diagnosticar fricción estática es que el ajuste a la onda triangular sea mejor que el ajuste a la onda senoidal, de otro modo, no existe fricción estática presente en el sistema.

### 6.4.3. Pestaña 'OP vs PV'

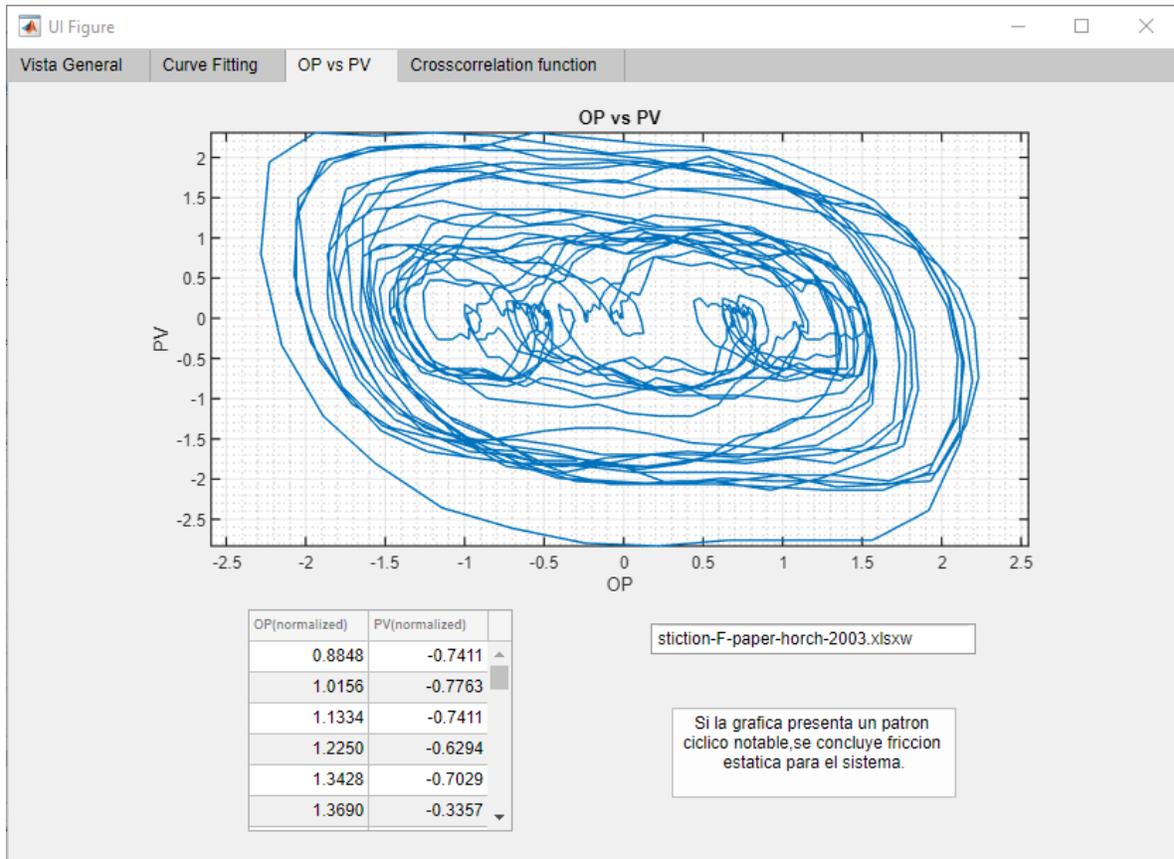


Figura 13. Pestaña 'OP vs PV', V7 (Autoría propia)

En esta pestaña (ver figura 12), se aplica el método PV–OP Pattern Analysis, en el que se grafican los datos de la variable PV vs los datos de la variable OP.

La condición para diagnosticar fricción estática es que en la gráfica se pueda observar un patrón cíclico o elíptico.

#### 6.4.4. Pestaña 'Crosscorrelation Function'

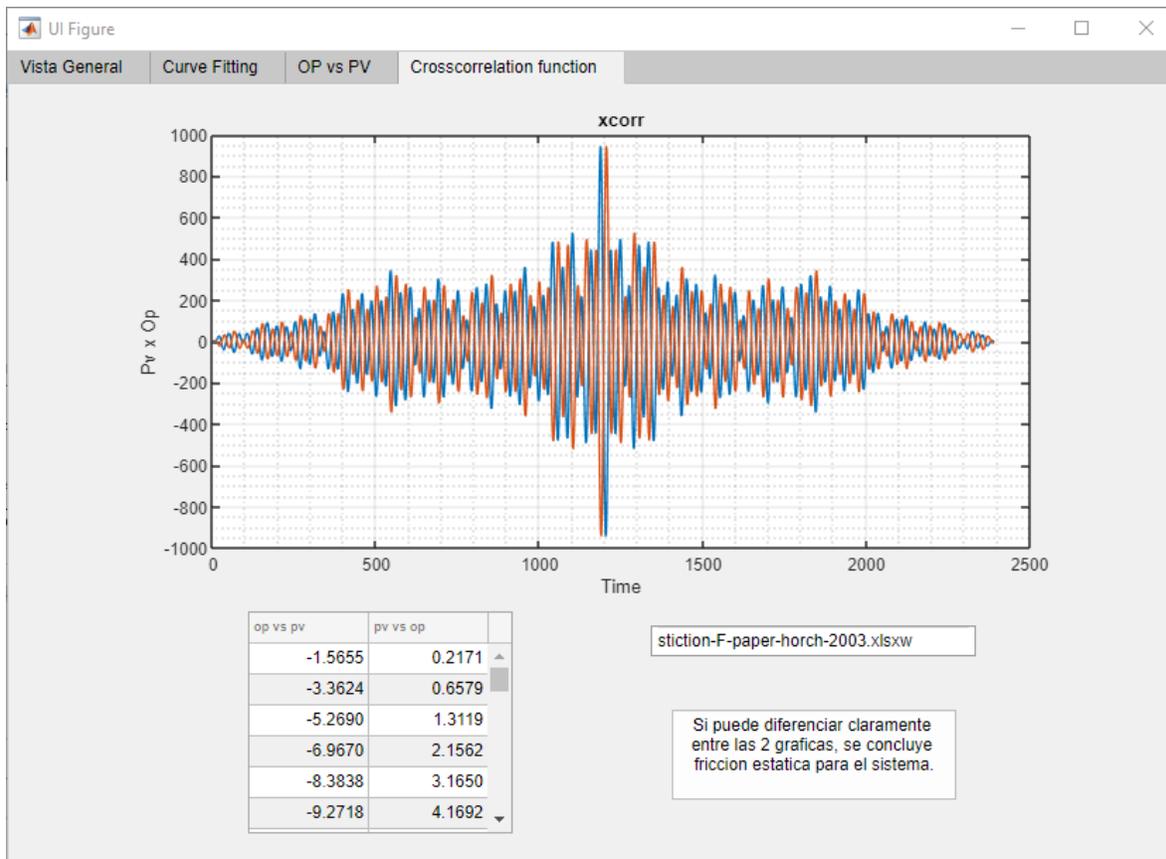


Figura 14. Pestaña 'Crosscorrelation function, V7 (Autoría propia)

En esta pestaña (ver figura 13), se aplica el método 'CrossCorrelation Based Stiction Detection' que consiste en el análisis de la gráfica de correlación cruzada entre la variable OP y la variable PV.

La condición para diagnosticar fricción estática es que la función sea impar con respecto al eje vertical, para una mejor visualización, se grafica dicha función y su inverso, de modo que si se logran ver las 2 graficas de manera clara se concluye que es impar y, por ende, que existe fricción estática en el sistema.

Con el objetivo de reforzar la veracidad de la funcionalidad de la herramienta computacional en la siguiente sección se muestran alternativas al proceso, es decir, un sistema ideal y un sistema cuyo problema no es fricción estática.

- El dato usado para la pruebas e imágenes mostradas en los apartados 6.4.5 a 6.4.7 es ideal, y fue creado con el fin de rectificar posibles errores.

### 6.4.5. Pestaña 'Vista General', sistema ideal

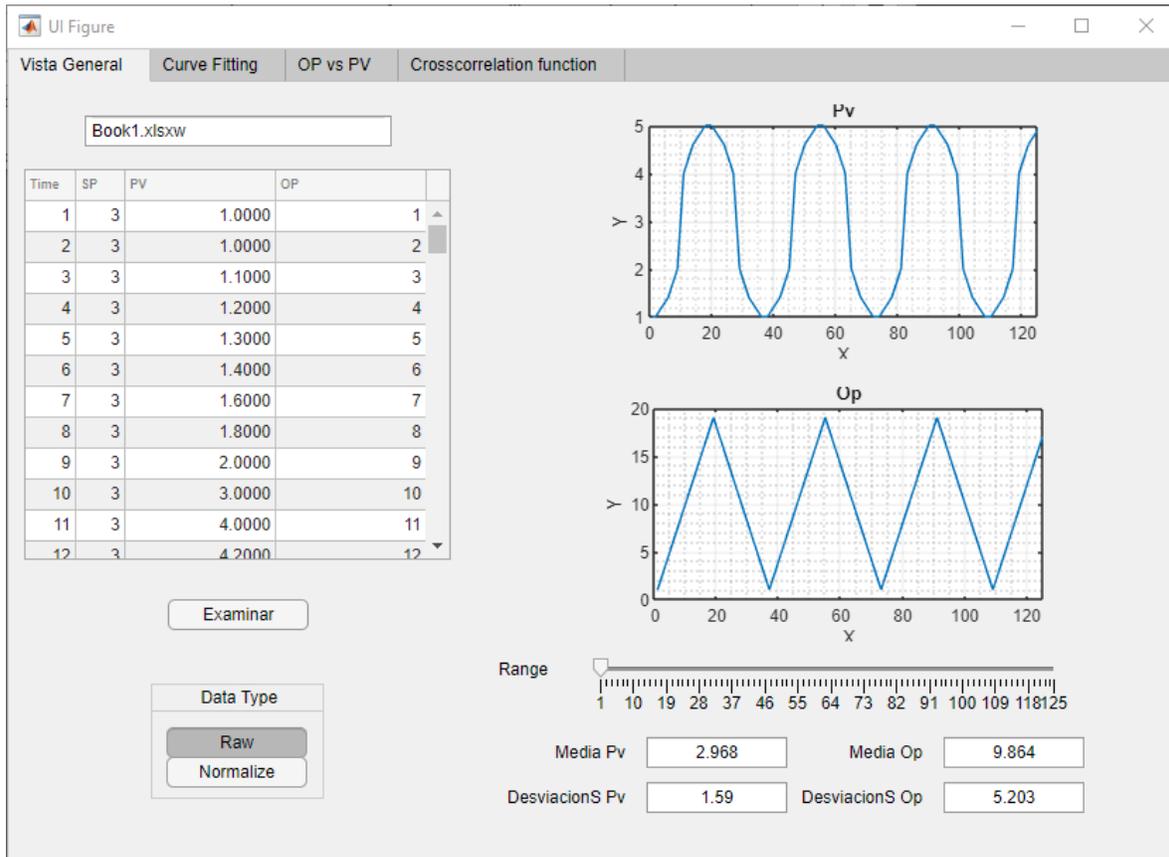


Figura 15. Ventana principal, Ideal (Autoría propia)

### 6.4.6. Pestaña 'PV vs OP', sistema ideal

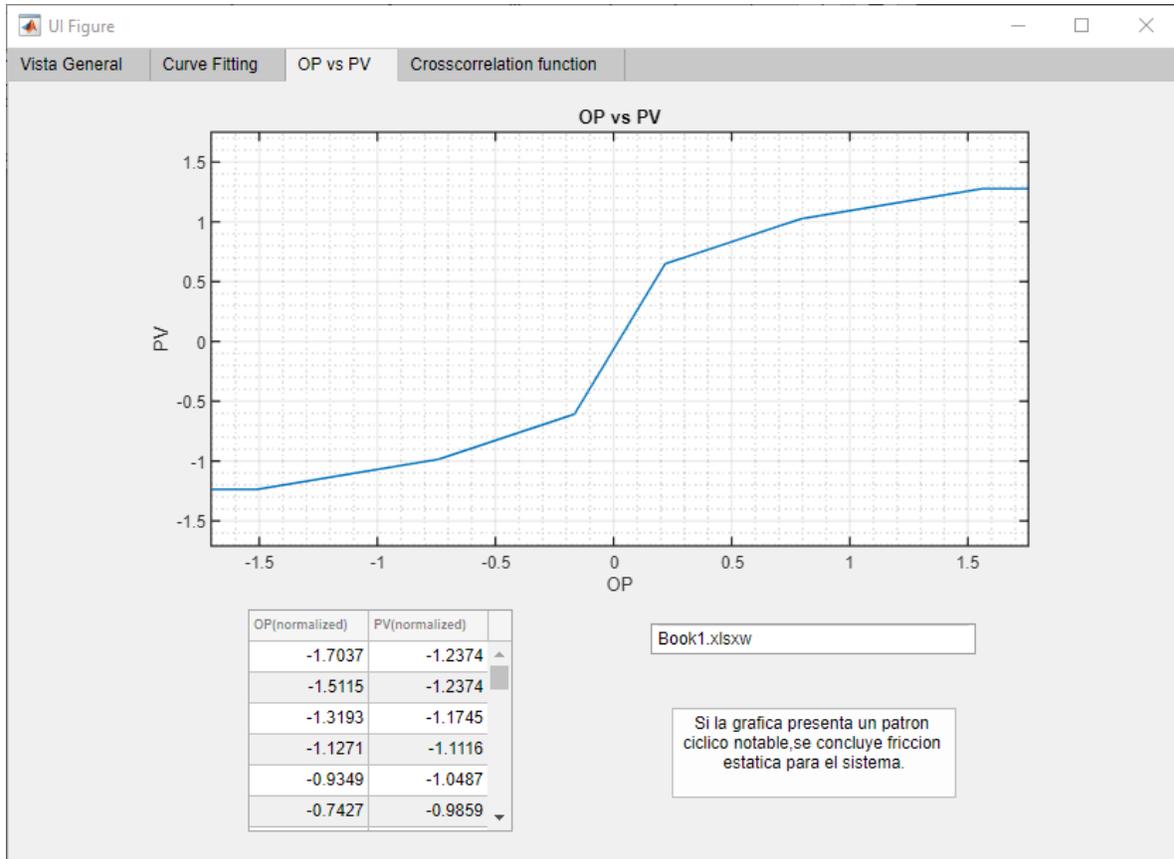


Figura 16. Pestaña 'OP vs PV', Ideal (Autoría propia)

### 6.4.7. Pestaña 'Crosscorrelation Function', Sistema ideal

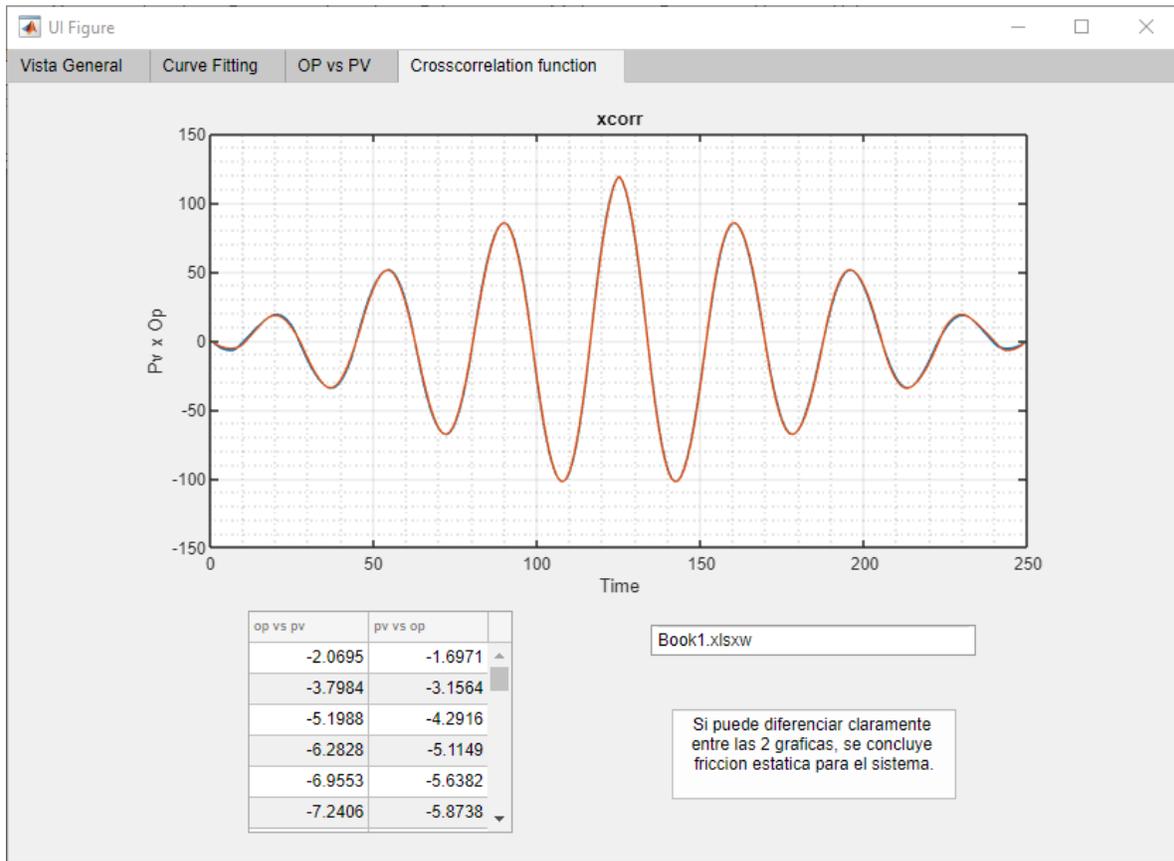


Figura 17. Pestaña 'CrossCorrelation Function', Ideal (Autoría propia)

- El dato usado para la pruebas e imágenes mostradas en los apartados 6.4.8 a 6.4.11 presenta problema de sintonización, no fricción estática, es nombrado como 'tuning-L-paper-horch-2003'.

### 6.4.8. Pestaña 'Vista General' no stiction

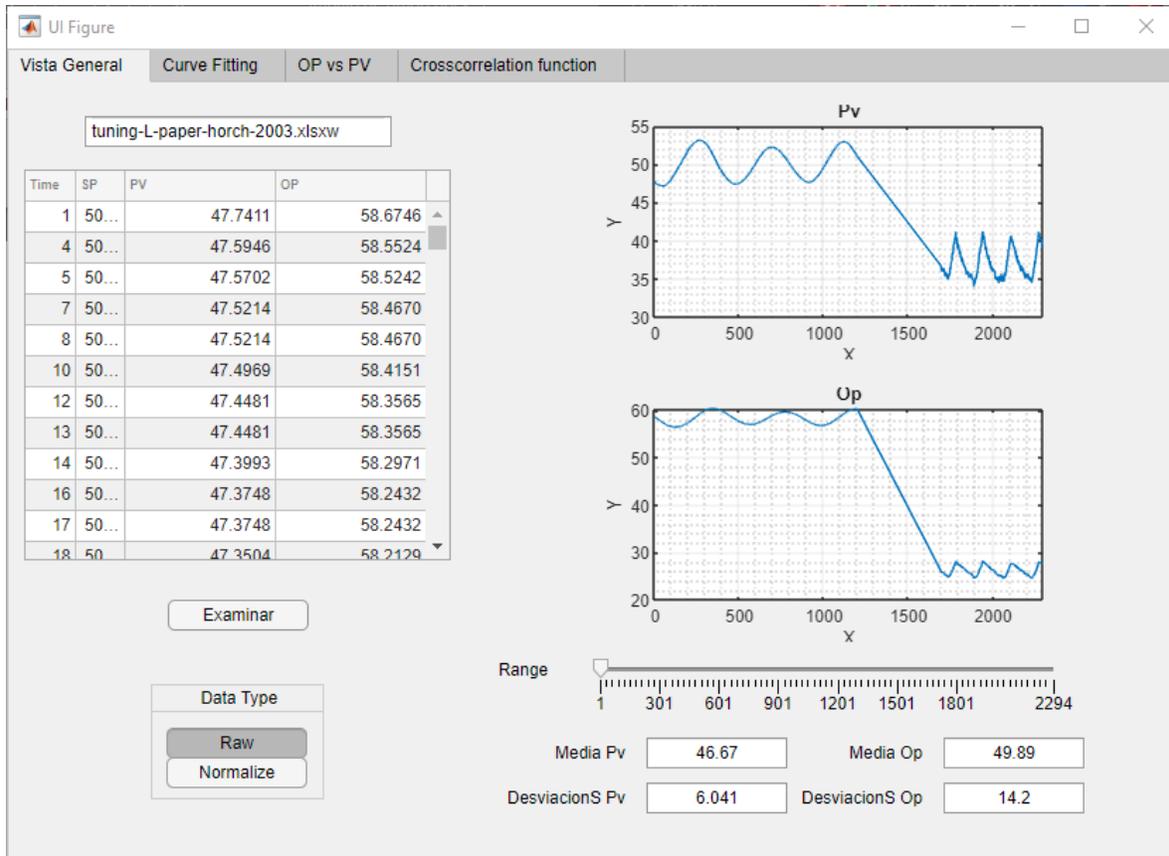


Figura 18. Pestaña 'Vista General', no stiction (Autoría propia)

### 6.4.9. Pestaña 'Curve Fitting' no stiction

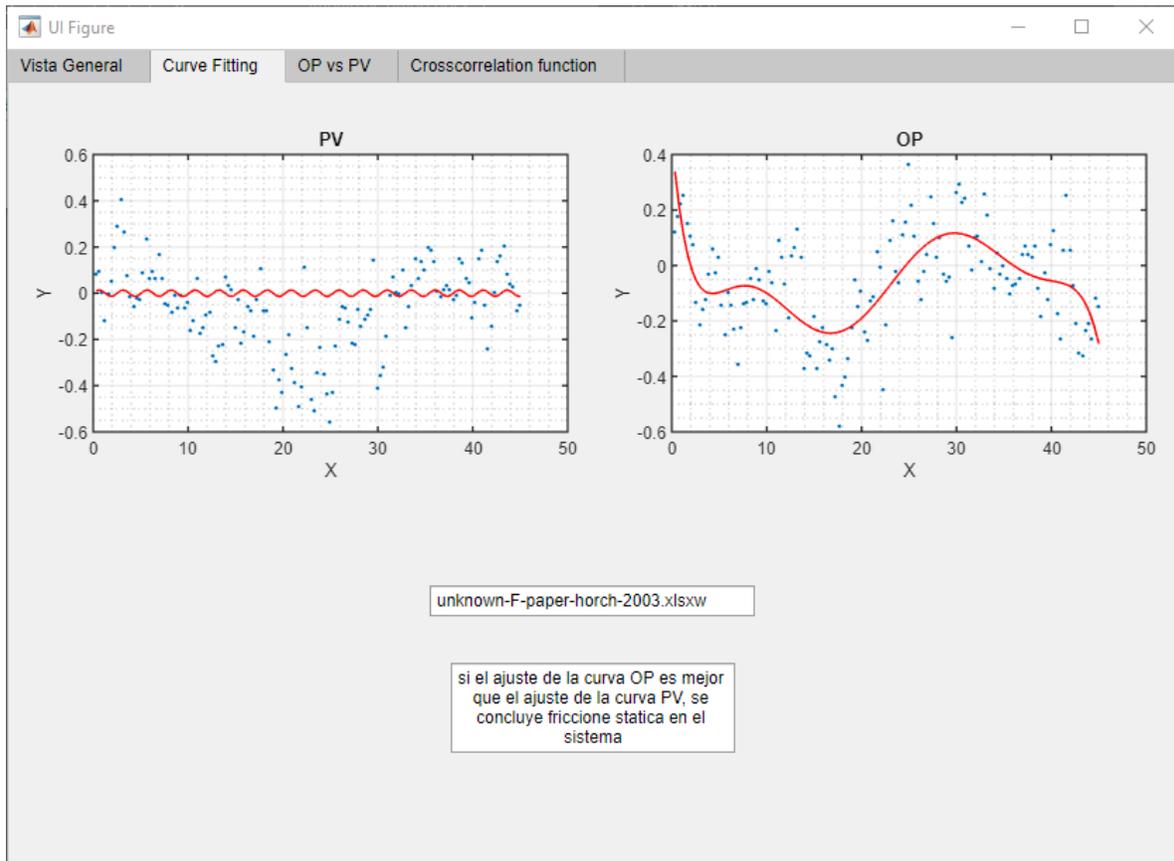


Figura 19. Pestaña 'Curve Fitting', no stiction (Autoría propia)

### 6.4.10. Pestaña 'OP vs PV' no stiction

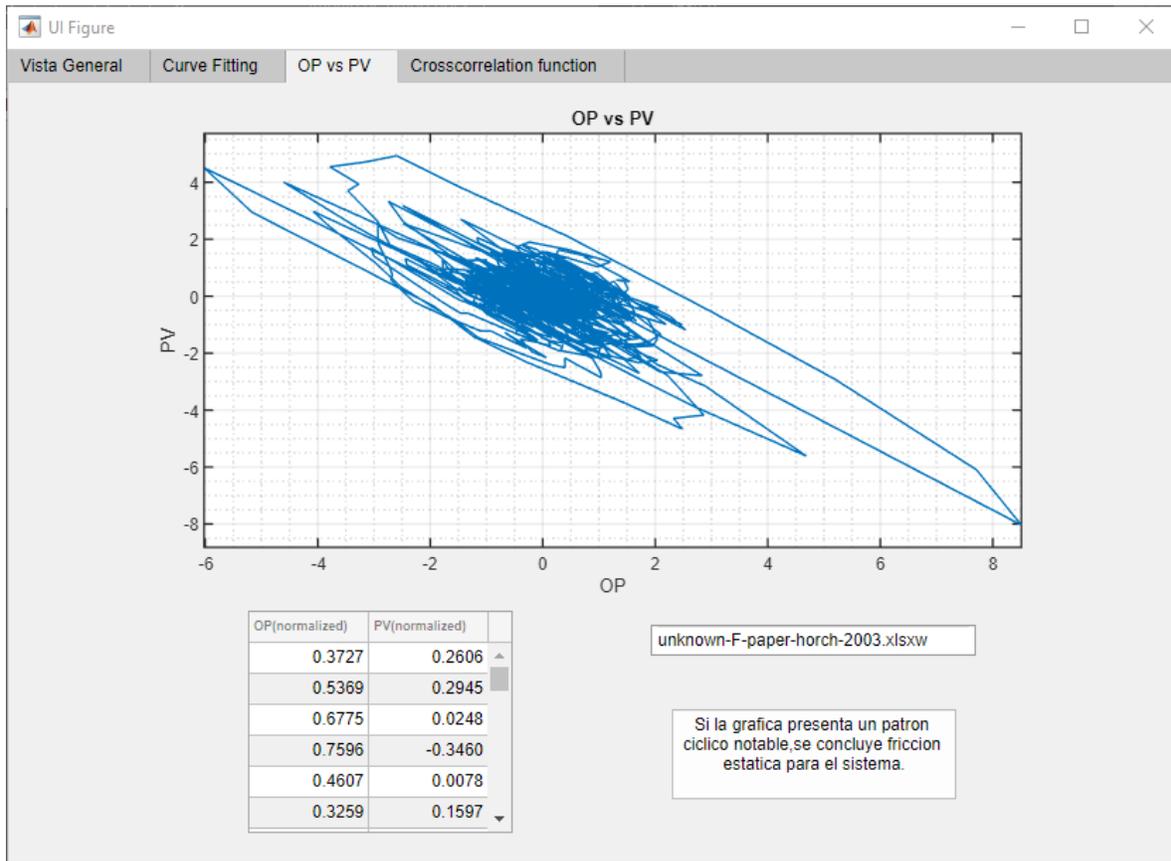


Figura 20. Pestaña 'OP vs PV', no stiction (Autoría propia)

### 6.4.11. Pestaña 'Crosscorrelation Function' no stiction

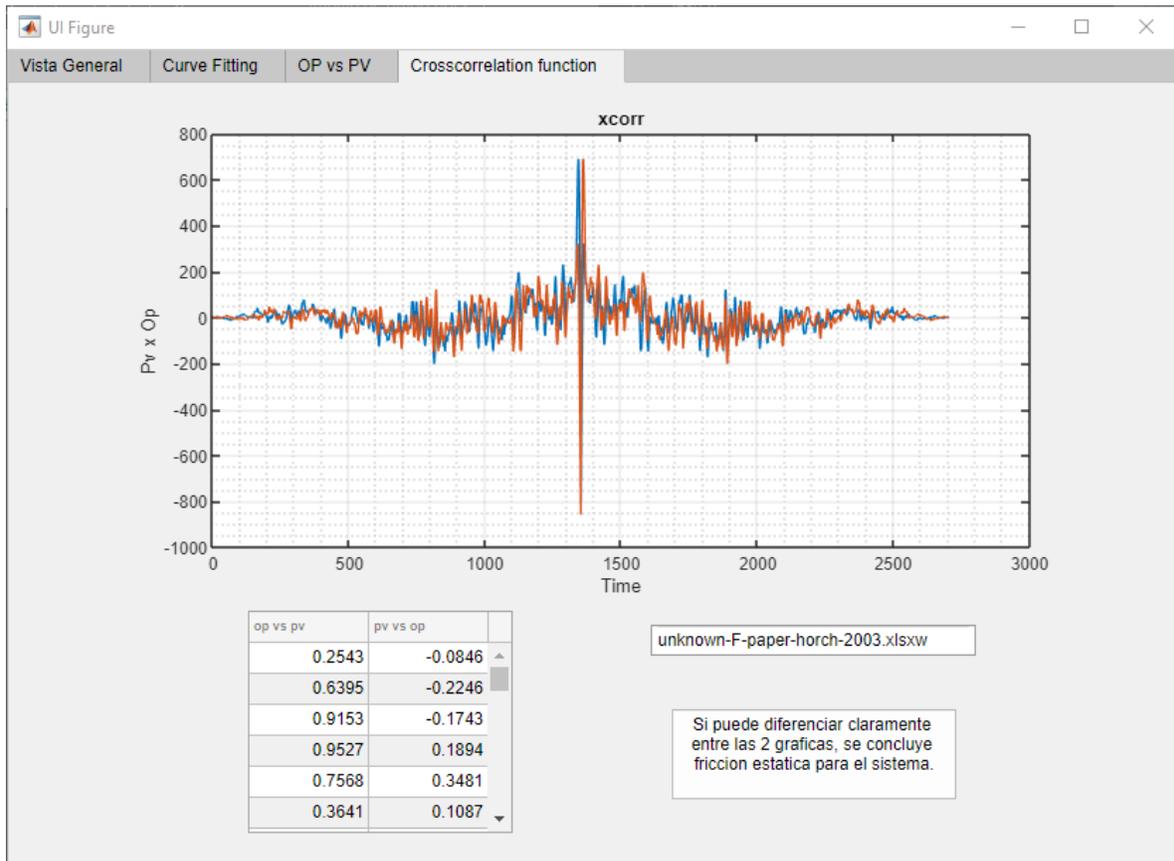


Figura 21. Pestaña 'Crosscorrelation Function', no stiction (Autoría propia)

## 7. CONCLUSION

La tecnología siempre ha sido útil como herramienta para facilitar las actividades del hombre en su diario vivir. La implementación de una herramienta computacional para el diagnóstico de problemas relacionados con la estimulación de los actuadores permite la supervisión y control de todo tipo de perturbación y posibles desviaciones que ocurran a lo largo del proceso, que podrían conllevar a accidentes en la planta, emisiones no deseadas de contaminantes y pérdidas energéticas.

Se realizó un cuadro comparativo para determinar los tres métodos a implementar según los requerimientos establecidos, siendo seleccionados: CrossCorrelation-Based Stiction Detection, Nonlinearity Detection and PV–OP Pattern Analysis, Diagnosis Based on Curve Fitting. Los cuales cumplieron con el objetivo de detectar fricción estática en lazos de control.

Por tanto, la herramienta que se presentó permite mostrar los cálculos de la detección de oscilaciones a partir de la aplicación de estos métodos.

Con el método de 'CrossCorrelation-Based Stiction Detection' se detecta la fricción estática por medio del análisis de la función de correlación cruzada aplicado a las variables PV y OP, por otra parte, el método 'Nonlinearity Detection and PV–OP Pattern Analysis' detecta perturbaciones a partir del análisis y similitud con patrones cíclicos o elípticos, y por último el método 'Diagnosis Based on Curve Fitting' que permite detectar fricción estática al ajustar los datos a curvas ideales con sus mismas propiedades (frecuencia, periodo, etc.).

Se realizaron pruebas con diferentes bases de datos encontradas en el repositorio SACAC con el fin de verificar el funcionamiento óptimo de la herramienta computacional en situaciones donde el proceso presentara, o no, fricción estática.

Al implementar los métodos se llegó a la conclusión de que el análisis de detección de fricción estática es intuitivo, es decir, que su resultado no depende de un valor o una constante, por lo tanto, se agregaron cuadros de texto en las diferentes

pestañas de la interfaz, los cuales describen las condiciones en las que se puede concluir la presencia de fricción estática en el sistema para guiar al usuario.

Para estudios futuros, se recomienda que la interfaz pueda manejar múltiples datos de manera simultánea, con el fin de comparar los patrones que posee la fricción estática en maquinarias del mismo tipo, pero que se encuentran bajo ambientes diferentes.

Además, la posibilidad de lectura y toma de muestras autónoma y continua, y así, disminuir el tiempo de muestreo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA.

[1] Sites.google.com. (2019). Contenido 14 - Maquinas De Desplazamiento Positivo. [online] Available at: <https://sites.google.com/site/desplazamientopositivo/tema-4/clase-13>

[2] Ecured. (2019). Válvula. [Online] Available at: <https://www.ecured.cu/V%C3%A1lvula> [Accessed 2 Oct. 2019].

[3] Ifent.org. 2005. HISTERESIS CAPITULO VII.-MAGNETISMO. [online] Available at: <http://www.ifent.org/lecciones/cap07/cap07-06.asp> [Accessed 25 May 2005].

[4] Sarmiento, H. (2013). Metodología para el establecimiento y ponderación automática de conexiones entre estados funcionales de un proceso como herramienta para el diagnóstico y la predicción de fallos. (Tesis de Doctorado), Departamento de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

[5] Hernández, C., Nieto, J., Carrum, E. (2014). Detección y diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de potencia (SEP) combinando lógica difusa, métricas y una red neuronal probabilística. Research in Computing Science, 72, pp. 47–59.

[6] Hurtado L., Villarreal E., Villarreal L. (2016). Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte. DYNA 83 (199), pp. 19-28.

[7] Inter empresas. (2011). Maximización de la seguridad en las plantas. [online] Available at: <https://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/54332-Maximizacion-de-la-seguridad-en-las-plantas.html> [Accessed 18 Jul. 2011].

[8] RAMIREZ, J., SARMIENTO, H. and LOPEZ-LEZAMA, J. (2018). Diagnóstico de fallas en procesos industriales mediante inteligencia artificial. [online] Revistaespacios.com. Available at: <https://www.revistaespacios.com/a18v39n24/18392412.html> [Accessed 22 Feb. 2018].

[9] Cortes, L., Villarreal-López, E. and Villarreal-López, L. (2019). Detección y diagnóstico de fallas mediante técnicas de inteligencia artificial, un estado del arte. [Online] Revistas.unal.edu.co. Available at: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/55612/63408> [Accessed 2 Oct. 2019].

[10] Lameda, C. (2015). Métodos relacionados con diagnósticos de fallas con síntomas imprecisos mediante comparación de casos. [online] Dialnet. Available at: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5329325> [Accessed 5 Aug. 2015].

[11] Aranguren Zambrano, M. and Tarantino Alvarado, P. (2009). METODOLOGIAS Y TECNOLOGIAS DE DETECCION Y DIAGNOSTICO DE FALLAS APLICADAS A PROCESOS INDUSTRIALES. 1st ed. [ebook] Pamplona, p.1. Available at: [http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_40/recursos/03\\_v13\\_18/revista\\_13/04112011/14.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_40/recursos/03_v13_18/revista_13/04112011/14.pdf) [Accessed 2 Oct. 2009].

[12] Pizzi, N., Kofman, E., Seron, M. and De Dona, J. (2015). Diagnóstico de fallas en actuadores mediante cotas finales probabilistas. [ebook] Available at: [https://www.fceia.unr.edu.ar/~kofman/files/fallas\\_pub\\_format.pdf](https://www.fceia.unr.edu.ar/~kofman/files/fallas_pub_format.pdf) [Accessed 9 Oct. 2015].

[13] Technipedia. (2019). Daños de válvulas y sus causas. [Online] Available at: <https://www.ms-motorservice.com/es/tecnipedia/post/danos-de-valvulas-y-sus-causas/> [Accessed 2 Oct. 2019].

[14] Jelali, D., 2003. Control Performance Management in Industrial Automation Assessment, Diagnosis and Improvement of Control Loop Performance.

[15] Rohilla, P., Kumar, V., & Al-Hakkak, F. (2018). Fuzzy gain scheduling of PID controller for stiction compensation in pneumatic control valve [PDF]. New Delhi: PDF. Retrieved from [http://jcar.me.sru.ac.ir/article\\_856\\_a839df9de21e152a3f9e2bbc6effcbf2.pdf](http://jcar.me.sru.ac.ir/article_856_a839df9de21e152a3f9e2bbc6effcbf2.pdf)

[16] Zakharov, A., Zattoni, E., Xie, L., Pozo, O., & jämsä-Jounela, S. (2019). An autonomous valve stiction detection system based on data characterization [PDF]. Elsevier Ltd. Retrieved from <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0967066113001342?token=C790B957E9394D7C6C1FC2D709061314B0FCF165A6F1C1B01F5146C5BA43272174BA4A918D2327F55960EB0587F2BBE0>

[17] Maruta, H., Kano, M., Kugemoto, H., & Shimizu, K. (2005). Modeling and Detection of Stiction in Pneumatic Control Valves [PDF]. kioto. Retrieved from <https://www.sice.jp/e-trans/papers/E4-3.pdf>

[18] Shoukat Choudhury, M., Shaha, S., Thornhill, N., & Shookc, D. (2005). Automatic detection and quantification of stiction in control valves [PDF]. Elsevier Ltd. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/76992530.pdf>

[19] Manabu, K., Hiroshi, M., Hidekazu, K. and keiko, S. (2004). PRACTICAL MODEL AND DETECTION ALGORITHM FOR VALVE STICTION. [PDF] Cbridge, Massachuset. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1474667017319171?token=A593A96FB BE25CCD91052E521CE2267855318FDEA51B269F48FC1F3A688372A6B786BE3052B1C07F0F50E5505311FFB2>

[20] Daneshwar, M. and Mohd Noh, N. (2015). Detection of stiction inflow control loops based on fuzzy clustering. [PDF] Elsevier Ltd. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0967066115000295?token=15917B2E36CEC470BC2B3239D549F05B9B69E9C32D06A9C5ED6EA607F2D131F2AB7A3289BB2E4D1F296E236F857EAC2C>

[21] Stockmann, M., Haber, R. and Schmitz, U. (2009). Pattern recognition for valve stiction detection with principal component analysis. Barcelona, Spain: Elsevier, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667016359778>.

[22] Yu, W. and Wilson, D. (n.d.). Eliminating Valve Stiction Nonlinearities for Control Performance Assessment. [PDF] Elsevier Ltd. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1474667015303244?token=ADCFDA132DC698B07AC587F5D28EF44F3E33324633321147D6E01ABEE4BC923161FE1B45F22A94236EB7F1EB6CCB79FE>

[23] Starr, K., Petersen, H. and Bauer, M. (2016). Control loop performance monitoring – ABB’s experience over two decades. [PDF] Elsevier Ltd. Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2405896316306036?token=1805136B65557D616A5E56FB58DB13EA79B894128A8FC306F8B410D7D7869D4CEF82912415C4882F1980EC4736BBF73D>

[24] Pouliezos and Stavrakakis. (1994), “Real Time Fault Monitoring of Industrial Processes”, Kluwer Academic Publishers.

[25] Aranguren, S., (2001), “Estudio y Diseño de las Normas, Ingeniería, Metodologías y Tecnologías de los Sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallas (SDDF), para los Elementos de los Sistemas de Automatización del Centro de Refinación Paraguaná (CRP), PDVSA”. Tesis de Maestría. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería. Mérida Venezuela

[26] Tarantino R., Szigeti F., Colina E., (2000) "Generalized Luenberger Observer-Based Fault-Detection Filter Design: An Industrial Application". Control Engineering Practice. Julio, pp. 665-671.

[27] Autoform.com. 2019. Tribología – fricción, desgaste y lubricación. [online] Available at: <https://www.autoform.com/es/glosario/tribologia/>

[28] (Profefelipe.mex.tl. 2019). [online] Available at: <http://profefelipe.mex.tl/imagesnew/4/6/9/5/1/TRIBOLOGIA.pdf>

[29] Jelali, M. (2012). Control Performance Management in Industrial Automation Assessment, Diagnosis, and Improvement of Control Loop Performance. 1st ed. [ebook] Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9781447145455>

[30] Arbildo, A. (2011). El control de procesos industriales y su influencia en el mantenimiento. 29th ed. [ebook] Lima. Available at: [http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf\\_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/\\$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf](http://fresno.ulima.edu.pe/sf/sf_bdfde.nsf/OtrosWeb/Ing29Control/$file/02-ingenieria-produccion-ARBILDO.pdf)

[31] Descripción del producto MATLAB- MATLAB & Simulink- MathWorks América Latina. (2019). Retrieved 4 December 2019, from [https://la.mathworks.com/help/matlab/learn\\_matlab/product-description.html](https://la.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html)

[32] Open Source | www.scilab.org. (2019). Retrieved 4 December 2019, from <https://www.scilab.org/about/scilab-open-source-software>

[33] Secoin.com.uy. 2020. Válvulas De Control: Diagnóstico Y Reducción Del Tiempo De Inactividad | Secoin. [online] Available at: <https://www.secoin.com.uy/blog/v%C3%A1lvulas-de-control-diagn%C3%B3stico-y-reducci%C3%B3n-del-tiempo-de-inactividad> [Accessed 5 April 2019].

[34] Stratus | We prevent business applications from failure. 2020. El Verdadero Coste Del Tiempo De Inactividad - Stratus Technologies. [online] Available at: <<https://www.stratus.com/es/cost-of-downtime/>> [Accessed 13 February 2017].

## 9. ANEXOS

### 9.1. MATRIZ DE RIESGOS

En esta sección, se describen los posibles riesgos que se pueden presentar durante el desarrollo de la herramienta computacional, a través de la matriz de riesgo (tabla 11) para así determinar la probabilidad de ocurrencia, gravedad, valor del riesgo y nivel del riesgo.

Esta matriz de riesgo se realizó con el fin de analizar los posibles riesgos y al mismo tiempo poder dar soluciones (ver tabla 13) oportunas a estos, para así, evitar falencias en el desarrollo y ejecución de la herramienta computacional.

Tabla 12. Matriz de riesgos

MATRIZ DE RIESGOS					
RIESGO	Probabilidad (Ocurrencia)	Gravedad (Impacto)	Valor del Riesgo	Nivel de Riesgo	
	R1	Error en la programación	3	5	15
R2	Falla en la selección del método	2	4	8	Apreciable
R3	Error en el diagnóstico de la falla.	3	1	3	Apreciable
R4	Exactitud.	2	5	10	Importante
R5	Tiempo de respuesta a la falla del programa.	1	1	1	Marginal
R6	Factores externos	2	5	10	Importante
R7	Tiempo de toma de muestras. (muestreo)	1	2	2	Marginal
R8	Compatibilidad con los programas.	1	5	5	Apreciable
R9	Error en la determinación de la dimensión de los datos.	2	2	4	Apreciable
R10	Error en la selección del software.	1	1	1	Marginal
R11	Error en el diseño de la interfaz.	1	3	3	Apreciable
R12	Incumplimiento del cronograma de actividades bajo tiempos establecidos	1	5	5	Apreciable

Tabla 13. Matriz de riesgos 2

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

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

Tabla 14. Riesgos y soluciones

RIESGOS		SOLUCION DE RIESGOS
R1	Error en la programación	Verificar la programación a través del uso de un repositorio de información. Realizar pruebas para identificar errores en el código.
R2	Falla en la selección del método	Seleccionar los métodos partiendo de la lista de requerimientos realizada posteriormente.
R3	Error en el diagnóstico de la falla.	Realizar pruebas con datos del repositorio cuyos resultados arrojen la existencia o no de fricción estática para analizar el comportamiento de la herramienta computacional.
R4	Exactitud.	Al implementar tres métodos para el diagnóstico de fricción estática se analiza desde diferentes perspectivas el resultado, por lo tanto, se tiene un alto índice de exactitud .
R5	Tiempo de respuesta a la falla del programa.	La herramienta computacional diagnosticara fricción estática una vez se hayan cargado los datos.
R6	Factores externos	Se busco un repositorio de información, la cual nos suministra una visión clara y literarias para la construcción del código de cada método de detección de oscilaciones.
R7	Tiempo de toma de muestras. (muestreo)	Promediar el tiempo de muestreo según el proceso a analizar.
R8	Compatibilidad con los programas.	Seleccionar un software adecuado y realizar de forma correcta el ejecutable de la herramienta computacional.