

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR PID
AUTO - SINTONIZABLE MEDIANTE INTELIGENCIA DE
ENJAMBRES PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO
COLECTIVO DE LOS SISTEMAS PERTENECIENTES A
PROCESOS ESTUDIADOS EN EL CERFIN-SECAP

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO EN MASTER EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES

ING. WILLIAM MANUEL MONTALVO LÓPEZ

DIRECTOR: Dr. Andrés Rosales Acosta

Quito, Septiembre 2015

William Manuel Montalvo López

Septiembre .2015

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR PID AUTO
- SINTONIZABLE MEDIANTE INTELIGENCIA DE ENJAMBRES
PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO COLECTIVO DE
LOS SISTEMAS PERTENECIENTES A PROCESOS
ESTUDIADOS EN EL CERFIN-SECAP

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO EN MASTER EN
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES

ING. WILLIAM MANUEL MONTALVO LÓPEZ

wil2904@hotmail.com

DIRECTOR: Dr. Andrés Rosales Acosta

andres.rosales@epn.edu.ec

Quito, Septiembre 2015

DECLARACIÓN

Yo William Manuel Montalvo López, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

William Montalvo L.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por William Manuel Montalvo López, bajo mi supervisión.

Dr. Andrés Rosales Acosta
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador –EPN, a mis Profesores y a mi Director, por haberme formado profesionalmente e incentivar mi espíritu de investigación.

Al Instituto Ecuatoriano de Crédito Educativo - IECE, por confiar en mí y haberme apoyado económicamente en mi proceso de especialización.

Y al Servicio Ecuatoriano de Capacitación Profesional SECAP y su Centro de Formación Industrial - CERFIN, por ser la entidad que me ha abierto sus puertas y me ha permitido entrenarme y a la vez poder impartir mi aprendizaje a mis estimados estudiantes.

William

DEDICATORIA

A mi Papa Dios por ser mi fortaleza, mi apoyo y mi sustento.

A mis padres por haberme dado la vida e inculcarme los valores y principios que me han guiado en mi existencia.

A mis hermanos y seres queridos, por estar siempre en los momentos importantes
de mi vida
William

CONTENIDO

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE TABLAS	xiii
RESUMEN	xiv
PRESENTACIÓN	xv
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. LOS ALGORITMOS BIO INSPIRADOS	1
1.2. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA	2
1.3. PLANTEAMIENTO GLOBAL DEL PROBLEMA E HIPOTESIS	4
1.4. OBJETIVOS, TAREAS Y RESULTADOS	5
CAPÍTULO 2	6
2. ANÁLISIS DE MÉTODOS DE CONTROL AUTOMÁTICO, ESTRATEGIAS DE SINTONÍA PID Y MODELACIÓN DE SISTEMAS	6
2.1. INTRODUCCIÓN	6
2.2. LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO	6
2.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL	7
2.3. GENERALIDADES DE LA ACCIÓN DE CONTROL PID	9
2.4. MÉTODOS DE SINTONÍA	11

2.4.1.	MÉTODOS CLÁSICOS	11
2.4.2.	MÉTODOS BASADOS EN INTELIGENCIA COMPUTACIONAL	17
2.5.	MODELACIÓN DE SISTEMAS	27
2.5.1.	MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE MODELOS	28
2.6.	IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS	28
2.6.1.	PASOS DE LA IDENTIFICACIÓN	28
CAPÍTULO 3		31
3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID AUTO SINTONIZABLES		31
3.1.	INTRODUCCIÓN	31
3.2.	PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN	32
3.2.1.	MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE PROCESOS	32
3.2.2.	CONTROLADOR DE AUTOMATIZACIÓN PROGRAMABLE – PAC	42
3.3.	IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE LA SINTONÍA DEL CONTROLADOR ...	51
3.3.1.	CÁLCULO DE LOS INDICES DE DESEMPEÑO	52
3.3.2.	SINTONIZACIÓN POR OSCILACIÓN CRÍTICA – ZIEGLER Y NICHOLS	52
3.3.3.	SINTONIZACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS	57
3.3.4.	SINTONIZACIÓN MEDIANTE INTELIGENCIA DE ENJAMBRES – OPTIMIZACIÓN POR CÚMULOS DE PARTICULAS (PSO)	66
3.3.5.	AUTO SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID MEDIANTE INTELIGENCIA DE ENJAMBRES	68
CAPÍTULO 4		73
4. PRUEBAS Y RESULTADOS		73
4.1.	INTRODUCCIÓN	73
4.2.	MODELO DE LA PLANTA	73

4.2.1.	NIVEL	73
4.2.2.	FLUJO	76
4.2.3.	PRESIÓN	79
4.3.	AJUSTE EXPERIMENTAL DE PARAMETROS DE ALGORITMOS GENÉTICOS	81
4.4.	ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE CONTROLADORES Z-N Y PSO, EN BASE AL ERROR ABSOLUTO – IAE.....	87
4.4.1.	TEST DE WILCOXON DEL PROCESO DE NIVEL Z-N Vs PSO.....	88
4.4.2.	TEST DE WILCOXON PROCESO DE FLUJO Z-N Vs PSO.....	91
4.4.3.	TEST DE WILCOXON PROCESO DE PRESIÓN Z-N Vs PSO.....	94
4.5.	TEST DEL DESEMPEÑO DE CONTROLADORES GA Y PSO, EN BASE AL ERROR ABSOLUTO – IAE.....	97
4.5.1.	TEST DE WILCOXON PROCESO DE NIVEL GA Vs PSO.....	98
4.5.2.	TEST DE WILCOXON PROCESO DE FLUJO GA Vs PSO.....	101
4.5.3.	TEST DE WILCOXON PROCESO DE PRESIÓN GA Vs PSO	104
CAPÍTULO 5		107
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
5.1.	CONCLUSIONES	107
5.1.1.	MODELADO DE SISTEMAS.....	107
5.1.2.	SINTONIZACIÓN POR ZIEGLER Y NICHOLS	108
5.1.3.	SINTONIZACIÓN POR ALGORITMOS GENÉTICOS – GA	108
5.1.4.	SINTONIZACIÓN POR CÚMULO DE PARTÍCULAS – PSO.....	109
5.2.	RECOMENDACIONES.....	110
5.2.1.	MODELADO DE SISTEMAS.....	110
5.2.2.	SINTONIZACIÓN POR ZIEGLER - NICHOLS	111

5.2.3. SINTONIZACIÓN POR ALGORITMOS GENÉTICOS	111
5.2.4. SINTONIZACIÓN POR CÚMULO DE PARTICULAS	111
5.3. TRABAJOS FUTUROS	112
5.4. PUBLICACIONES RESULTANTES DE LA INVESTIGACIÓN	112
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	113
ANEXOS	117

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Sistema de control en lazo abierto [22].	8
Figura 2-2. Sistema de control en lazo cerrado [22].....	9
Figura 2-3. Método de lazo cerrado – Oscilación sostenida [10].....	13
Figura 2-4. Método de lazo cerrado – Curva de reacción del sistema [9].....	14
Figura 2-5. Método por realimentación por relé [20].....	15
Figura 2-6. Amplitud y ancho del relé [20].....	16
Figura 2-7. Pasos del método de retroalimentación por relé [20].	16
Figura 2-8. Oscilación periódica con el método de relé [20].	17
Figura 2-9. Estructura de un algoritmo evolutivo simple.....	22
Figura 2-10. El proceso de la identificación [11].	30
Figura 3-1. Módulo didáctico de control de procesos.	32
Figura 3-2. Diagrama de Instrumentación y Tuberías- P&ID, del proceso de Nivel del Módulo Didáctico.....	35
Figura 3-3. Diagrama de Instrumentación y Tuberías- P&ID, del proceso de Flujo del Módulo Didáctico.....	39
Figura 3-4. Diagrama de Instrumentación y Tuberías- P&ID, del proceso de Presión del Módulo Didáctico.	41
Figura 3-5. NI cRIO-9014 Real-Time Controller [13].....	42
Figura 3-6. a) I/O módulos para CompactRIO b) Reconfigurable FPGA Chasis.	43
Figura 3-7. Componentes de un sistema Compact Rio	44
Figura 3-8. a) Interior del tablero del Módulo Didáctico, sin el PAC b) Instalación del chasis en el interior del tablero.....	46
Figura 3-9. a) Fuente de poder del PAC, b) Conectores del PAC.....	47
Figura 3-10. Conexión de I/O del PAC	47
Figura 3-11. Conector externo para control del PAC.....	48
Figura 3-12. Interior del tablero del Módulo Didáctico,	48
Figura 3-13. MAX de National Instruments.....	49
Figura 3-14. a.- Procedimiento de carga de software;.....	49

Figura 3-15. Dirección IP del cRIO-9073	50
Figura 3-16. Respaldo de la configuración del cRIO-9073	50
Figura 3-17. Cálculo de índices de desempeño con	52
Figura 3-18. PID Autotuning VI de LabVIEW	53
Figura 3-19. (a) Algoritmo inicial del procedimiento de auto sintonía por medio del PID Autotuning Wizard. (b) Algoritmo de auto sintonía por medio del PID Autotuning Wizard [22].....	55
Figura 3-20. Algoritmo básico de la estimación del ruido en el sistema.....	56
Figura 3-21. Algoritmo de cálculo de ganancias PID	56
Figura 3-22. Lazo de control “PID GA”.....	57
Figura 3-23. Modelo del Proceso de Control de Nivel.....	58
Figura 3-24. Variables de entrada y salida de la planta.....	58
Figura 3-25. SI Model Estimation Express VI de LabVIEW.....	59
Figura 3-26. Configuración del SI Model Estimation VI de LabVIEW	60
Figura 3-27. Modelo del Proceso de Control de Flujo.	61
Figura 3-28. Variables de entrada y salida de la Planta de Control de Flujo.	61
Figura 3-29. Modelo del Proceso de Control de Presión.....	62
Figura 3-30. Variables de entrada y salida de la Planta de Control de Presión.....	63
Figura 3-31. Ganancias PID óptimas con Algoritmos Genéticos en.....	64
Figura 3-32. Procedimiento de la función objetivo	64
Figura 3-33. Lazo de control “PID PSO”.....	66
Figura 3-34. Ganancias PID optimas por Cúmulo de Partículas, en	67
Figura 3-35. Procedimiento de la funciones PSO.	67
Figura 3-36. Pre – auto sintonización del Controlador PID.	69
Figura 3-37. Auto sintonización por Cúmulo o Enjambre de Partículas – PSO.	71
Figura 3-38. Auto sintonización por Algoritmos Genéticos – GA.....	71
Figura 3-39. Obtención automática de los Índices de Desempeño del controlador	72
Figura 3-40. Panel Frontal del Controlador PID Auto-sintonizable.....	72
Figura 4-1. Datos registrados del sistema de Nivel.....	73
Figura 4-2. Panel frontal en LabVIEW del programa de Adquisición de Datos.....	74
Figura 4-3. Identificación del sistema de nivel y validación del modelo ARX	75

Figura 4-4. Ganancia de los datos reales registrados en el proceso de Nivel.....	76
Figura 4-5. Datos registrados del sistema de Flujo.	77
Figura 4-6. Identificación del sistema de flujo y validación del modelo ARX.....	77
Figura 4-7. Ganancia de los datos reales registrados en el proceso de Flujo.....	78
Figura 4-8. Datos registrados del sistema de Presión.....	79
Figura 4-9. Identificación del sistema de presión y validación del modelo ARX.....	80
Figura 4-10. Ganancia de los datos reales registrados en el proceso de Presión.....	81
Figura 4-11. Modelo “SISTEMA.mdl” en SIMULINK.....	82
Figura 4-12. Tool de Optimizacion de Matlab, seteado en “ga – Genetic Algoritm”.....	82
Figura 4-13. Interacción en Matlab del Algoritmo Genético con la Función Objetivo.....	83
Figura 4-14. Tamaño de población por defecto del “Optimization Tool”.....	83
Figura 4-15. Generaciones por defecto del “Optimization Tool”.	84
Figura 4-16. Obtención experimental de los parámetros de ajuste del tamaño de población y de generaciones de un Algoritmo Genético.....	85
Figura 4-17. Tamaño de población especificada en el “Optimization Tool”.	86
Figura 4-18. Generaciones especificadas en el “Optimization Tool”.	86

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Valores de las constantes PID del método de lazo cerrado de Z – N [9].....	13
Tabla 2-2. Valores de las constantes PID del método de lazo abierto de Z – N [9].....	14
Tabla 3-1. A) Simbología utilizada en el P&ID de la Figura 3-2.....	36
Tabla 3-2. Valores de apertura de válvulas manuales del proceso de nivel.	38
Tabla 3-3. Valores de apertura de válvulas manuales del proceso de flujo.....	40
Tabla 3-4. Valores de apertura de válvulas manuales del proceso de flujo.....	41
Tabla 4-1. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.	88
Tabla 4-2. Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel. ...	90
Tabla 4-3. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.	91
Tabla 4-4. Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo. ...	93
Tabla 4-5. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.....	94
Tabla 4-6. Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión. 96	96
Tabla 4-7. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.	98
Tabla 4-8. Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel... 100	100
Tabla 4-9. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.	101
Tabla 4-10. Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo. 103	103
Tabla 4-11. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.....	104
Tabla 4-12. Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.	106

RESUMEN

Uno de los problemas cotidianos que se presenta en el control de procesos industriales es la sintonía de sus controladores PID, es así que en muchos casos se utiliza el conocimiento empírico de los operarios de mayor experiencia o de métodos clásicos en los cuales sobresale el de Ziegler y Nichols ampliamente utilizado por su sencillez y popularidad.

Pero los valores utilizados, si bien sirven para poner a funcionar los procesos, no son los mejores, por tanto se necesita de nuevos métodos que optimicen estos valores de tal manera que no se desperdicie energía en las plantas y que aumente la vida útil de los equipos.

Este trabajo presenta un controlador PID Auto Sintonizable, con una topología estándar, el cual tiene una pre sintonía en base al método de relé [20] con un ajuste óptimo de sus ganancias utilizando un algoritmo en base a la Inteligencia de Enjambres que es la Optimización mediante Cúmulos de Partículas -PSO, propuesta por Kennedy y Eberhart en 1995 [1, 2], inspirada en los cardúmenes de peces y las parvadas de aves.

El desempeño del controlador diseñado es comparado con dos controladores sintonizados por los métodos de Ziegler – Nichols y por Algoritmos Genéticos AG, utilizando como marco de referencia la integral del error absoluto – IAE, de la respuesta de los sistemas pertenecientes a los procesos estudiados en el CERFIN – SECAP.

PRESENTACIÓN

El informe final de este proyecto tiene la siguiente estructura:

En el primer capítulo, se da una introducción de la importancia del control de procesos y la necesidad de optimizar los valores PID de un controlador.

En el capítulo segundo se hace una presentación del estado del arte de las estrategias de control, las técnicas clásicas y modernas de sintonía de controladores PID, y los métodos para la identificación de sistemas, referenciadas todas éstas, en literatura especializada.

En el capítulo tercero se presenta la plataforma de experimentación, el controlador de automatización programable y la implementación de los algoritmos de Sintonía Óptima.

En el capítulo cuarto se exponen las pruebas y resultados del desempeño de los controladores.

En el capítulo cinco se exponen las conclusiones y recomendaciones a las que se arribó tras el desarrollo de este trabajo. A continuación se indica la bibliografía referenciada a lo largo del informe.

Al final del documento, en anexos, se presentan los programas realizados en LabVIEW, para el controlador de automatización programable; con el fin de que puedan ser consultados y utilizados en futuros trabajos.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. LOS ALGORITMOS BIO INSPIRADOS

Los algoritmos bio – inspirados, se presentan como una buena alternativa para resolver problemas de optimización, debido a que son creados en base a reglas simples que permiten converger a una solución que generalmente es la mejor, y que es determinada en un pequeño periodo de tiempo. Estos algoritmos permiten resolver problemas complejos que las técnicas clásicas, por sí solas, no han podido solucionar, o que en la mayoría de los casos, no muestran una respuesta satisfactoria. En este trabajo, se plantea aplicar uno de los métodos de la inteligencia de enjambres como la Optimización mediante Enjambres de Partículas PSO (por sus siglas en inglés Particle Swarm Optimization), que es un método heurístico para resolver problemas de optimización numérica, desarrollado por Kennedy y Eberhart en 1995 [1, 2], y poderlo emplear en la optimización de los valores PID de controladores de procesos industriales.

Si bien el método ha sido planteado desde hace algunos años, poco se lo ha utilizado en forma práctica y la mayoría de sus aplicaciones solo han sido valoradas académicamente en forma teórica o simulada. Se propone entonces desarrollar este tipo de controlador, el cual será valorado por simulación computarizada y en forma práctica, mediante el módulo didáctico de Control de Procesos existente en el CERFIN – SECAP, el mismo que maneja controladores del tipo PID simples, con un algoritmo de sintonía de control clásico.

Teniendo en cuenta que el módulo didáctico se utiliza para el entrenamiento y capacitación profesional del personal operativo de la industria ecuatoriana,

conviene actualizarlo a través del uso de nuevas técnicas de control computacional.

1.2. IMPORTANCIA Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

En el tema de la sintonización de controladores PID, se han presentado varios trabajos, como lo proponen Astrom y Hagglund [8] o Ziegler y Nichols [9] por ejemplo, pero sobresale este último, por ser un método simple y fácil de implementar.

El problema existente con estos métodos, es que muchas veces los valores hallados no son los mejores, de allí que se debe experimentar con los mismos en pruebas de ensayo y error, para concluir con los valores óptimos, pudiendo esto, tardar minutos, horas o incluso días, según el tipo de planta. Produciendo pérdidas y atrasos, que perjudicarían críticamente a los procesos de manufactura de las industrias ecuatorianas.

Es por ello que se debe necesariamente recurrir a pasos que permitan obtener los valores más cercanos a los ideales en forma rápida y eficiente, como lo podrían ser los algoritmos por Optimización por Enjambre de Partículas - PSO.

La Optimización por Enjambre de Partículas - PSO se introdujo por primera vez por Kennedy y Eberhart [1, 2], siendo ahora uno de los modernos algoritmos heurísticos. Fue desarrollada a través de la simulación de un sistema simplificado, y se ha encontrado robusto en la solución de problemas de optimización no lineal.

La PSO es una técnica que puede generar una solución de alta calidad dentro del menor tiempo de cálculo y características de convergencia estable que otros métodos estocásticos.

En la investigación de este campo, todavía queda mucho por demostrar, como el potencial de la PSO en la solución de complejos problemas de fuerza de operación del sistema.

Se han presentado trabajos para mejorar el algoritmo, como lo expuesto por Angeline [3], Perez y Behdinan [26] en donde se mejora la velocidad y la convergencia del algoritmo.

Yoshida, Kawata y Fukuyama [5], han presentado una optimización de enjambre de partículas de la potencia reactiva y control de tensión (VVC) considerando la evaluación de la seguridad de tensión. Sobre todo se compara con el sistema reactivo tabu (RTS) y la enumeración del método en prácticas de sistemas de poder mostrando resultados prometedores.

Naka, Genji, Yura y Fukuyama [6], han presentado el uso de un método híbrido PSO para resolver de manera eficiente el estado práctico de distribución de la estimación del problema.

Zwe-Lee Gaing [7], presenta una aplicación de un PSO para el diseño óptimo de un controlador para un sistema regulador automático de voltaje AVR, demostrando en forma práctica que el controlador propuesto puede realizar una eficiente búsqueda de los parámetros del controlador óptimo, evitando la deficiencia de la convergencia prematura del método de Algoritmos Genéticos GA.

Las ventajas atribuidas a las técnicas inteligentes de optimización PSO son su paralelismo intrínseco, su capacidad de resolver problemas complejos de gran tamaño con un mínimo conocimiento del sistema que se está identificando. Por ello presenta un enfoque prometedor para resolver el problema de la optimización de los valores PID de un controlador. Por lo tanto este estudio propone el desarrollo de un controlador PID – PSO, para mejorar el conocimiento y las

competencias del personal encargado del manejo y operación en los procesos industriales.

1.3. PLANTEAMIENTO GLOBAL DEL PROBLEMA E HIPOTESIS

Cada proceso tiene sus propias características físicas, que pueden retardar la reacción de un sistema de control ante típicas perturbaciones, es así que los operadores responsables del funcionamiento de dichas plantas deben estar familiarizados con estas características y estar mejor capacitados para evaluar, ajustar y mantener los sistemas de control en los parámetros ideales de funcionamiento.

Durante muchos procesos se necesita controlar ciertas condiciones físicas, como la temperatura, presión, nivel, flujo, etc., que pueden cambiar por un sin número de factores, y dichos cambios afectan el rendimiento del proceso.

Por ejemplo, algunos cambios pueden reducir la eficiencia de la planta, aumentando las pérdidas y, por tanto, incrementando los costos de funcionamiento. Es por ello que los sistemas de control de procesos ayudan a reducir las estas pérdidas, controlando los cambios de las variables del proceso.

Para el desarrollo científico y tecnológico del DACI - EPN, es fundamental evaluar el desempeño de un grupo de algoritmos bio - inspirados, en la optimización de sistemas y la pregunta que se plantea es: ¿Se pueden aplicar técnicas de Inteligencia de Enjambres para la sintonía óptima de controladores PID de Procesos Industriales?

1.4. OBJETIVOS, TAREAS Y RESULTADOS

El objetivo general de este trabajo es aplicar un Algoritmo de Inteligencia de Enjambres a la Sintonización Óptima de Controladores PID para determinar el comportamiento colectivo de los sistemas pertenecientes a varios procesos industriales utilizados en CERFIN – SECAP.

Como resultado de este trabajo se determina el nivel de desempeño de las técnicas de inteligencia computacional propuestas en la sintonía de controladores PID. Utilizando criterios de desempeño como el tiempo de establecimiento y de respuesta, el sobre paso máximo y el promedio del error absoluto.

Como novedad tecnológica se presenta la implementación en Controladores de Automatización Programables – PAC, de las técnicas de inteligencia computacional como estrategias de sintonía PID.

Como aporte se presenta una plataforma didáctica de carácter industrial, la cual permite implementar en línea estrategias de control clásicas y algunas de las estrategias de inteligencia computacional.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS DE MÉTODOS DE CONTROL AUTOMÁTICO, ESTRATEGIAS DE SINTONÍA PID Y MODELACIÓN DE SISTEMAS

2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se hace referencia a la fundamentación teórica de los Sistemas de Control Automático, las características principales de la estrategia de control PID, con énfasis en los parámetros necesarios para su sintonía.

Se presentan también los métodos de sintonía empleando técnicas de optimización modernas como son los algoritmos genéticos - GA y el enjambre de partículas - PSO.

El capítulo finaliza con los métodos de modelación e identificación de la planta.

2.2. LOS SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO

Kuo [16] en la temática introductoria de los sistemas de control, menciona que los mismos tienen un gran papel en el desarrollo y avance de la civilización moderna y en gran proporción en la calidad de los procesos de manufactura, líneas de ensamble, tecnología espacial, sistemas de armas y transporte, y robótica entre las principales. Sin embargo toda su teoría se puede aplicar en ámbitos sociales y económicos o incluso viceversa.

Su estudio y aplicación han contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas y beneficios asociados al ámbito industrial, pues es en este ambiente en donde se

controlan un gran número de variables, sumado esto a la creciente complejidad de los sistemas.

El control automático de procesos es usado con fines de reducción de costos asociados a la generación de bienes y servicios, ayudando a incrementar la calidad y volúmenes de producción industriales.

Todo sistema de control automático basa su principio en la aplicación del concepto de realimentación o feedback de la información de la variable del proceso - PV, para mantener al controlador central (cerebro) informado del estado de las variables, con el fin de generar las acciones correctivas, y poder conservar al sistema en los términos deseados (set point SP).

En la actualidad el uso de las computadoras ha posibilitado la aplicación en forma rápida y precisa, de las estrategias de control automático a sistemas físicos, lo que hace algunos años atrás era prácticamente imposible de analizar o controlar.

Ogata [17] menciona que las principales ventajas de los sistemas de control digital están en la toma de decisiones y en la flexibilidad de sus estrategias, permitiendo un desempeño óptimo en el proceso.

2.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control se clasifican en sistemas de lazo abierto y lazo cerrado.

La distinción la determina la acción de control, que es la que activa al sistema para producir la salida.

2.2.1.1. Sistemas de Lazo Abierto

Son aquellos en los que la variable de salida (variable del proceso -PV) no tiene efecto sobre la acción de control (variable de control - MV).

El control en lazo abierto suele aparecer en dispositivos con control secuencial, en donde no hay una regulación de variables sino que se realizan una serie de operaciones temporizadas, como es el caso de los procesos de manufactura.

Los sistemas de control a lazo abierto tienen las siguientes características:

- Estos sistemas no pueden estabilizar sistemas inestables.
- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
- Debido a la sencillez de su control, tienden a ser sistemas económicos de implementar.

Su estructura estaría dada por la Figura 2-1.

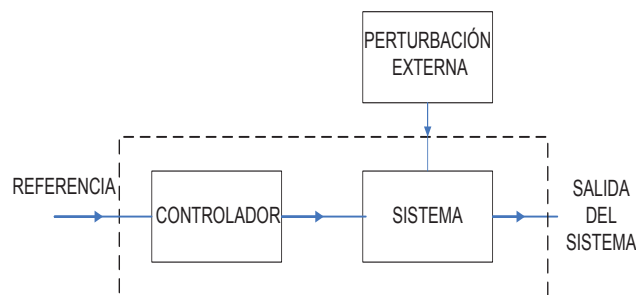


Figura 2-1. Sistema de control en lazo abierto [22].

2.2.1.2. Sistemas de Lazo Cerrado

Son aquellos en los que la señal de salida del sistema (PV) tiene efecto directo sobre la acción de control (variable de control MV).

Los sistemas de control de lazo cerrado se llaman comúnmente sistemas de control realimentados (o con retroacción).

Su estructura generalmente está descrita por la Figura 2-2.

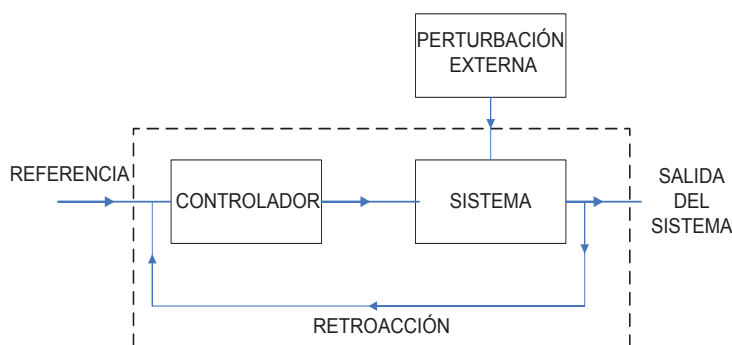


Figura 2-2. Sistema de control en lazo cerrado [22].

2.3. GENERALIDADES DE LA ACCIÓN DE CONTROL PID

La acción Proporcional Integral Derivativa – PID, es una estrategia de control por realimentación, que corrige el error entre la variable del proceso - PV y el valor que se quiere obtener -SP. Calculando y entregando una acción correctora que puede ajustar al proceso a los valores deseados.

El algoritmo de cálculo del control PID se enfoca en tres parámetros diferentes: el proporcional, el integral, y el derivativo.

El valor Proporcional actúa en base al error del sistema; el valor Integral permite eliminar el error en estado estacionario; y, el valor Derivativo proporciona anticipación de la acción de control sobre la respuesta del sistema.

La suma de estas tres acciones es usada para ajustar al proceso mediante el elemento final de control (válvula, calefactor eléctrico, pistón, motor, etc.).

El rendimiento del controlador, depende de sus “ganancias” o valores PID, que son ajustadas en términos deseados de la respuesta del sistema o proceso. Por tanto es de tener presente que el uso del PID para control no garantiza el control óptimo del sistema o la estabilidad del mismo.

Existen diversas funciones de transferencia o estructuras de controladores PID, pero entre las principales están:

- **Standard:**

$$G_C(S) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (\text{Ecuación 2-1})$$

- **Paralelo:**

$$G_C(S) = P + I + D = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (\text{Ecuación 2-2})$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_i es la ganancia integral, K_d es la ganancia derivativa, T_i es el tiempo de la acción integral y T_d es el tiempo de la acción derivativa.

En la práctica, cada fabricante modifica la ecuación del PID según lo crea conveniente, pues suelen incluir detalles adicionales para poder operar en condiciones reales.

Por ejemplo, a veces se suelen incluir filtros en la función, para eliminar ruidos de alta frecuencia que se transfieren a las señales de entrada del controlador, como es el caso de la siguiente función paralela que admite ceros complejos:

$$G_C(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + \frac{K_d S}{T_n S + 1} \quad (\text{Ecuación 2-3})$$

El filtro pasa bajo con el término derivativo reduce la amplificación de ruidos, donde T_n representa la constante de tiempo del filtro.

2.4. MÉTODOS DE SINTONÍA

Determinar las ganancias PID, es el principal problema que existe en los controladores, es así que desde que se inventaron y hasta la fecha se han desarrollado diferentes métodos para hallar estos valores.

A continuación se presentan algunos de los métodos más relevantes:

2.4.1. MÉTODOS CLÁSICOS

En 1940, Taylor Instrument introdujo al mercado el primer controlador PID, llamado Fullscope modelo 100, y hasta entonces su método de sintonización era mediante ensayos de prueba y error.

Entonces, John Ziegler y Nathaniel Nichols, ingenieros de Taylor, se dedicaron a la tarea de realizar pruebas experimentales con varios procesos para determinar una forma simple de sintonizar el nuevo controlador.

El resultado de ese trabajo, fue el método de sintonización ampliamente conocido como método de Ziegler y Nichols.

2.4.1.1. Método de sintonía de Ziegler Nichols

Ziegler y Nichols [9] propusieron una serie de reglas para afinar controladores PID con base a una respuesta experimental, en donde se trata de producir buenos valores para los tres parámetros de ganancia PID:

- K_p - la ganancia de controlador.
- T_i - la constante de tiempo del integrador.
- T_d - la constante de tiempo del derivador.

El procedimiento iniciaba, operando el controlador en su forma proporcional, determinando que, la selección de la sensibilidad (o ganancia K) adecuada del controlador, requería de un compromiso entre la razón de amplitud de la respuesta y el error en estado estable.

Determinaron que un decaimiento del 25%, proporcionaba un ajuste adecuado y que éste se lograba, con una sensibilidad aproximadamente igual a la mitad de la sensibilidad máxima o crítica - K_c .

Para los modos integral y derivativo, se encontró que su ajuste podía relacionarse con el periodo de oscilación crítico, logrando el decaimiento recomendado del 25 %. Partiendo de estos criterios, obtuvieron las ecuaciones de sintonización de los controladores, presentados en las Tablas 2-1 y 2-2.

Básicamente definieron dos métodos, los cuales son el método de lazo cerrado o de oscilaciones sostenidas y el método de lazo abierto o de respuesta de un sistema ante una entrada escalón.

2.4.1.1.1 Método de lazo cerrado

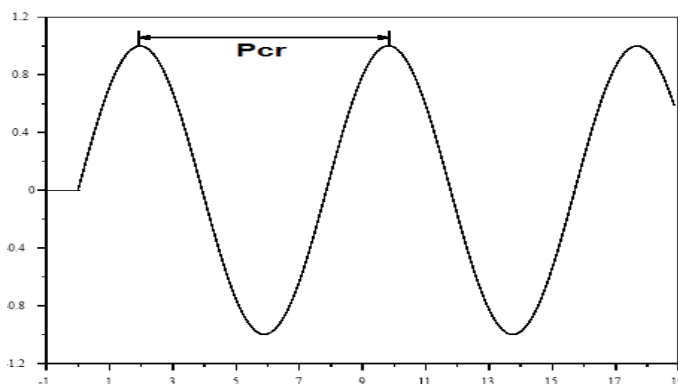


Figura 2-3. Método de lazo cerrado – Oscilación sostenida [10]

Tabla 2-1. Valores de las constantes PID del método de lazo cerrado de Z – N [9]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	0	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{Cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{Cr}$	$0.125P_{cr}$

Las ecuaciones de sintonización de Ziegler y Nichols, empleando la información de la Figura 2-3 acerca de la ganancia y periodo crítico (K_{cr} y P_{cr}) se presentan en la Tabla 2-1.

2.4.1.1.2 Método de lazo abierto

La figura 2-4, muestra la respuesta de un sistema de primer orden, y su modelo con sus valores de ganancia K y tiempo de retardo T_d .

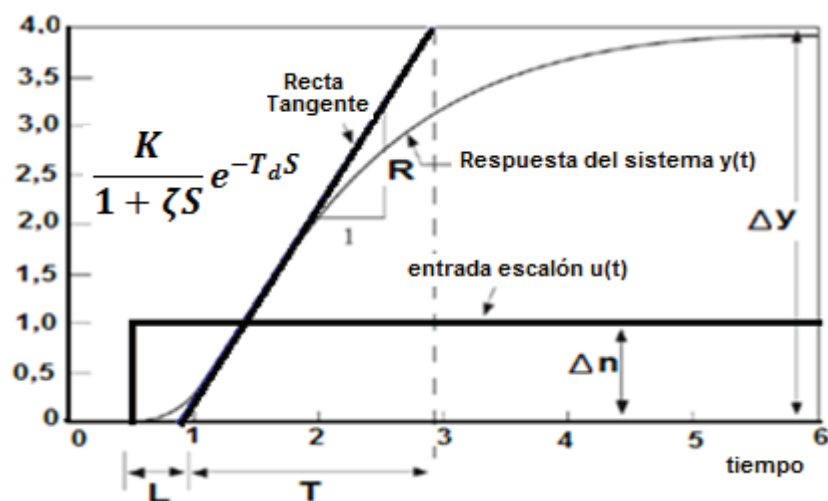


Figura 2-4. Método de lazo cerrado – Curva de reacción del sistema [9]

Las ecuaciones de sintonización de Ziegler y Nichols, empleando la información de la Figura 2-4, acerca de retraso del sistema L , su periodo de oscilación T , y su razón de reacción máxima R , son mostradas en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Valores de las constantes PID del método de lazo abierto de Z – N [9]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{RL}$	0	0
PI	$\frac{0.9}{RL}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$\frac{1.2}{RL}$	$2L$	$0.5L$

Los métodos de sintonía PID clásicos como el método de Z – N no son fáciles de aplicar en su forma original sobre plantas en funcionamiento, principalmente cuando se involucran procesos críticos, cambios súbitos en la señal de control o en el punto de operación afectan la estabilidad límite.

2.4.1.2. Método de sintonía por retroalimentación de relé

Es una variación del método de oscilaciones sostenidas de Ziegler – Nichols, en el cual, inicialmente, era necesario llevar el sistema de control al límite de la estabilidad, utilizando un controlador proporcional, para determinar los parámetros de ganancia crítica K_{cr} y el del periodo de oscilación sostenida P_{cr}

Como esto normalmente no es deseable, e incluso muchas veces no es posible, por el tratamiento del proceso, la información va a ser obtenida empleando un relé para controlar el sistema, como lo propusieron Aström y Hägglund [20]. En la Figura 2-5 se muestra el esquema para la realización de la retroalimentación de relé.

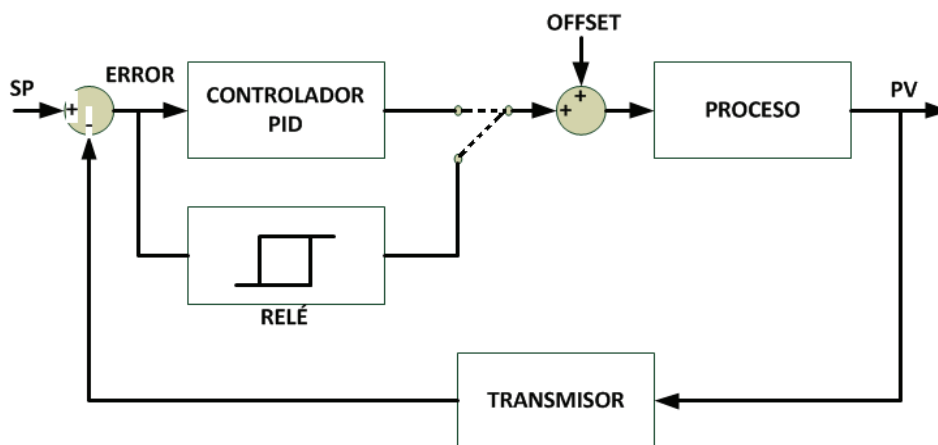


Figura 2-5. Método por realimentación por relé [20].

El periodo de oscilación obtenido por el método del relé tiene un periodo de oscilación similar al obtenido por Z - N.

El relé se parametriza con características de amplitud (d) y ancho de la ventana de histéresis (h), como se muestra en la Figura 2-6.

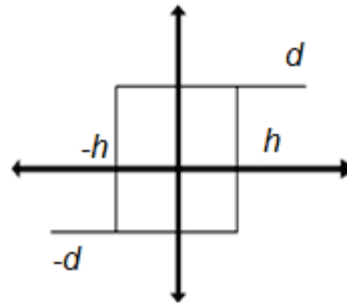


Figura 2-6. Amplitud y ancho del relé [20].

Los pasos para la obtención de los parámetros de sintonía del controlador PID por el método del relé se muestran en el siguiente diagrama de bloques [20]:

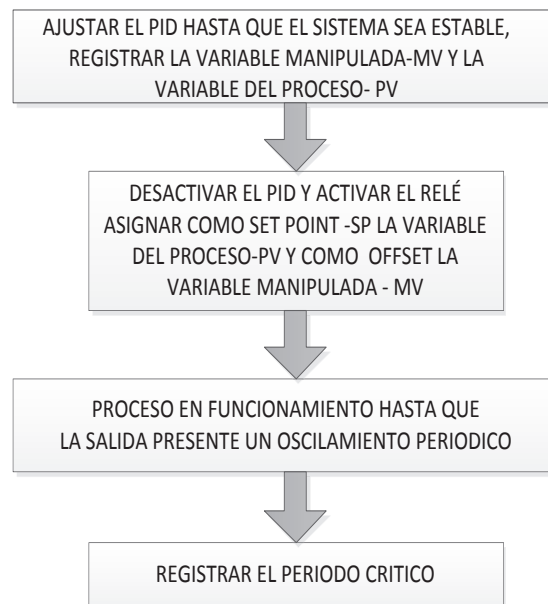


Figura 2-7. Pasos del método de retroalimentación por relé [20].

En el último paso se registran los parámetros indicados en la Figura 2-8, donde T_c es el periodo de oscilación sostenida.

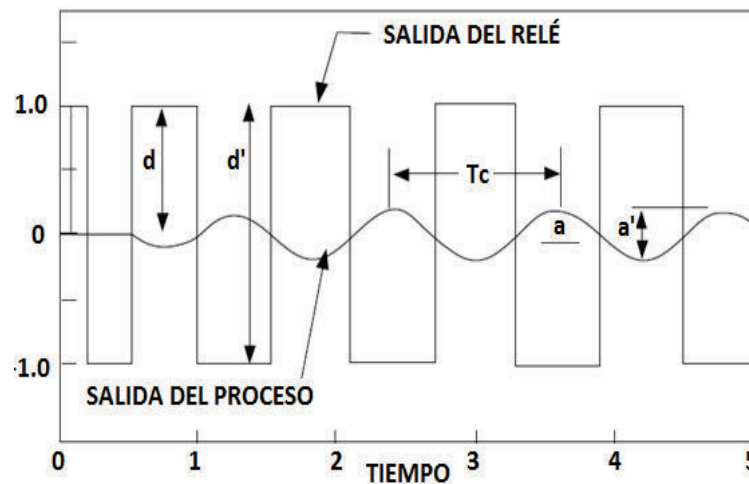


Figura 2-8. Oscilación periódica con el método de relé [20].

Finalmente con los valores obtenidos se determina la ganancia crítica del proceso por medio de las siguientes ecuaciones [20]:

$$K_{cr} = \frac{4d}{\pi\sqrt{a^2-h^2}} \quad \text{o} \quad K_{cr} = \frac{4d'}{\pi\sqrt{a'^2-h^2}} \quad (\text{Ecuación 2-4})$$

2.4.2. MÉTODOS BASADOS EN INTELIGENCIA COMPUTACIONAL

Los programas informáticos que imitan el razonamiento de un “experto”, en una determinada área para resolver un problema, son denominados “Sistemas Expertos” y son los precursores de la Inteligencia Computacional.

King [18] menciona que los sistemas expertos usan reglas lingüísticas para resolver problemas, los cuales aplicados a la industria se pueden utilizar para la predicción y diagnóstico de fallas, gerencia y producción de energía, control y supervisión de sistemas, entre otros.

Uno de los objetivos de los sistemas expertos es la “optimización” de soluciones.

2.4.2.1. Métodos de optimización

La solución óptima es el mejor valor que maximiza o minimiza una función objetivo (fitness), en una vecindad del espacio de búsqueda (óptimo local) o todo el espacio de búsqueda (óptimo global).

En el presente caso de estudio, los parámetros PID del controlador, son obtenidos para tal propósito, usando un método de optimización para una sola función u objetivo. La función fitness está compuesta por los índices de desempeño en el dominio del tiempo de la planta a controlar.

Los índices de desempeño, que generalmente se utilizan en la valoración de un controlador son:

- El tiempo de establecimiento (t_s): Tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final. Por ejemplo, si el tiempo fuese demasiado largo, podría afectar la calidad de la manufactura de un proceso de alimentos.
- El tiempo de respuesta (t_r): Tiempo que se requiere para que la respuesta pase del 10 al 90 %, del 5 al 95% o del 0 al 100% de valor final.
- El error en estado estable (E_{ss}): Diferencia entre el valor de consigna SP y la variable del proceso PV.
- El máximo sobre paso (M_p): Valor pico máximo de la curva de respuesta. Dicho valor no debe sobrepasar un determinado rango, pues suele ser la causa de pérdida de material en un proceso de producción.

- La Integral del error absoluto (*IAE*): Cantidad de material fuera de especificaciones, energía perdida u otra característica indeseada en el control de un proceso. El tener un valor pequeño de la misma implicaría que la variable de proceso estuvo lo suficientemente cerca del valor deseado.

La *IAE* se determina matemáticamente por la siguiente expresión:

$$IAE = \int_0^{\infty} |r(t) - y(t)| dt \quad (\text{Ecuación 2-5})$$

Donde $y(t)$ es la salida del sistema, y , $r(t)$ es el valor deseado.

2.4.2.2.1 Algoritmos genéticos - GA para sintonía de controladores PID

Goldberg [15] menciona que “Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda, basándose en los mecanismos de la selección natural y la genética natural. Combinan la supervivencia del más apto entre estructuras de cadenas, con un cambio de información estructurado pero aleatorio, para formar un algoritmo de búsqueda con algo del innovativo talento de la búsqueda humana”.

Por su potencialidad, los GA, se han expandido rápidamente en el diseño de sistemas de control, como lo demuestra Panchi M. [14], en una aplicación, en la sintonía PID de controladores digitales.

Los algoritmos genéticos simulan computacionalmente el proceso evolutivo que experimentan los seres vivos a nivel genético. Se suele utilizar la siguiente terminología para la estructura de su programa:

- Cromosoma (Cadenas de ADN): Individuo (Cadena de bits).

- Gen (Región del cromosoma): Conjunto de bits de la cadena (representación de variable).
- Locus (Posición del gen): bit (Posición en la cadena).
- Alelo (Tipo de gen): 0 o 1 (Tipo de valor, codificación binaria).

Los algoritmos genéticos (GA) están compuestos por tres operadores fundamentales: Reproducción, Cruce y Mutación (suele ser opcional).

En un problema de optimización, los GA's codifican los parámetros involucrados en una cadena finita de bits y luego corren iterativamente usando los tres operadores en forma aleatoria, comparando su mejor "marcador" con una función fitness. Se realizan paralelamente tareas básicas de copiar cadenas, intercambiar partes de algunos bits de cadenas y, finalmente, encontrar y decodificar la solución al problema.

A continuación se detallan los operadores que conforman un algoritmo genético.

- Codificación de parámetros: La forma más sencilla de representar los parámetros (soluciones posibles) es en forma binaria. Las cadenas de bits pueden ser alargadas (para suministrar más resolución) o acortadas para suministrar menos resolución en la representación de los parámetros.
- Generación Inicial: La población inicial, es generada en forma aleatoria o restringida, creando N cadenas, cada una de longitud m (esto afecta a la resolución). El tamaño de la población es un factor importante en la solución del algoritmo genético, ya que un N grande incrementa la posibilidad de alcanzar la solución en las primeras generaciones pero disminuye la velocidad del algoritmo genético.

- Evaluación de aptitud: Mide cada una de las cadenas por cada generación y produce una medida acerca de la calidad de la solución.
- Reproducción: Se realizan con las cadenas que tienen los mejores valores de aptitud. En una política llamada reproducción elitista a la mejor cadena actual se le garantiza una larga vida de generación a generación al realizar una copia de ella en la siguiente generación.
- Cruce: Es un proceso de intercambio sistemático de información entre dos cadenas. El cruce de la posición de la partición de las cadenas suele ser aleatorio.
- Mutación: Es un proceso opcional, el cual altera ocasionalmente (por cada generación) el valor de un bit, en una posición seleccionada aleatoriamente. Y generalmente es usado para mejorar la oportunidad de que el AG alcance la solución óptima rápidamente.
- Iteración: El GA ejecuta iterativamente los procesos anteriores hasta alcanzar una condición de finalización predeterminada (generalmente es el número de generaciones).

En la Figura 2-9 se muestra la estructura básica de un algoritmo evolutivo simple.

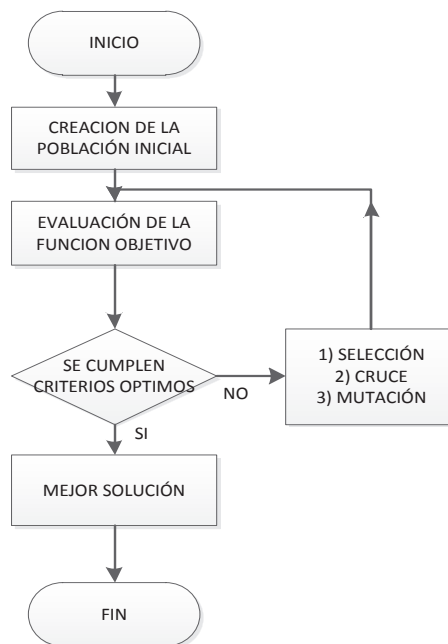


Figura 2-9. Estructura de un algoritmo evolutivo simple.

2.4.2.2.2 Optimización por enjambre de partículas - PSO

Optimización de enjambres es una técnica de optimización estocástica basada en una población, desarrollada en 1995 por el Dr. Eberhart y el Dr. Kennedy [1, 2], fue inspirada en el comportamiento psico-social emergente de las parvadas de aves y cardúmenes de peces.

En un enjambre cada individuo sigue a un líder que lo lleva hacia zonas favorables para cumplir una tarea, dicho comportamiento, es emulado por un algoritmo computacional, para resolver problemas de optimización.

La base del algoritmo PSO son los conocimientos cognitivo y social, que delimitan el comportamiento visto en los enjambres.

El cognitivo de cada partícula es el conocimiento propio adquirido en la búsqueda, y es representado por su mejor posición (su mejor valor con la función fitness) alcanzada, que a la vez es recordada. El conocimiento social en cambio, es el valor de la mejor partícula del enjambre (el líder) y es tomada como referencia para guiar a las demás partículas. En cada generación las partículas actualizan su posición utilizando como referencias tanto el conocimiento cognitivo como el social representado por el líder.

PSO así como los Algoritmos Genéticos, presentan soluciones óptimas para una determinada población de soluciones, los sistemas son inicializados con un tamaño de población y búsquedas para actualizar las generaciones. Sin embargo, como lo menciona Eberhart y Shi [4] a diferencia de los GA, los PSO no tienen operadores de evolución tales como cruce y mutación, esto hace converger a una solución óptima más rápidamente.

En PSO, Kennedy y Eberhart [1] mencionan que “las partículas (soluciones posibles) vuelan a través del espacio problema al seguir la corriente de las partículas óptimas”.

En el tema de optimización del controladores PID por PSO, Geetha. M, Balajee. K. A y Jovitha Jerome [23], presentan un trabajo prometedor, sintonizando en simulación el Controlador de un Tanque de Reacción.

Van Den Bergh [25], presenta una aplicación de los PSO en el entrenamiento de redes neuronales multi capa.

En general, al algoritmo PSO se lo puede seccionar en [1]:

- Representación de soluciones: Una partícula es un punto en un espacio de búsqueda multidimensional, en el cual se intenta encontrar una localización óptima con respecto a una función de adaptación “fitness”.

Se usa la siguiente terminología: X Conjunto de posiciones (estados) de m partículas en un espacio multidimensional.

$$\text{Donde } X = \{X_1, \dots, X_j, \dots, X_l, \dots, X_m\} \quad (\text{Ecuación 2-6})$$

- Selección del líder: La selección del líder del cúmulo (p_{best}) se basa en la comparación del valor calculado de aptitud (en la función fitness), para cada partícula, mediante su vector de los valores para cada variable, con respecto al valor aptitud del líder (fitness p_{best}). Seleccionando como líder del cúmulo a aquella partícula con mejor valor de la aptitud. Si a través de las generaciones, ninguna partícula del cúmulo llegara a mejorar la solución del líder, todas las partículas del cúmulo tomarán la posición del líder del cúmulo (su solución) cada vez más en cada generación (interacción), hasta estar prácticamente en la misma posición, llamándose a esto, “convergencia del cúmulo”.
- Función de vuelo: La nueva posición de cada partícula se halla a partir de una función de vuelo ($V_{id}(t + 1)$), que es en sí una dirección de búsqueda, que está dada por:

$$V_{id}(t + 1) = WV_{id}(t) + C_1 rand(t) * (p_{id} - x_{id}) + C_2 Rand(t)(p_{best} - x_{id}) \quad (\text{Ecuación 2-7})$$

Actualizando su posición (x_{id}) después de haber calculado la nueva velocidad.

$$x_{id} = x_{id} + V_{id} \quad (\text{Ecuación 2-8})$$

Los parámetros que afectan la función de vuelo $V_{id}(t + 1)$ son:

- a) Peso de inercia (W): Regula la influencia de la velocidad de vuelo actual de una partícula en el cálculo del nuevo valor de velocidad, influenciando bajo ciertas condiciones la convergencia del cúmulo.
- b) Velocidad actual de la partícula $V_{id}(t)$: Se refiere a la dirección de vuelo que trae la partícula. Inicialmente parte del reposo.
- c) Coeficiente de aceleración C_1 : Regula la influencia de la mejor posición recordada de una partícula en la actualización de su velocidad, es decir, regula la influencia del conocimiento cognitivo de la partícula.
- d) Coeficiente de aceleración C_2 : Regula la influencia del líder en la actualización de la velocidad de una partícula, es decir, regula la influencia del conocimiento social.
- e) **Rand (t)** y **rand (t)**, representan un número real aleatorio con distribución uniforme entre 0.0 y 1.0, que al multiplicarse por los coeficientes de aceleración previenen repeticiones en los números generados en la función.
- f) Mejor posición alcanzada por la partícula (p_{id}) y partícula líder del cúmulo (p_{best}): Representa la memoria de la partícula, y su mejor posición alcanzada hasta esa generación.
- g) Posición de la partícula (x_{id}): Es la posición actual de la partícula que se toma como referencia para calcular la nueva velocidad.

Hay que tomar muy en cuenta los valores del peso de inercia (W) y de los coeficientes de aceleración (C_1 y C_2), pues de ellos depende la estabilidad y convergencia del algoritmo.

Por ejemplo, Shi y Eberhart [24], proponen un peso de inercia de 0.8 para optimización en espacios.

Perez y Behdinan [26] demostraron que el PSO es solo estable si los coeficientes aceleración cumplen los siguientes requisitos:

$$1) \quad 0 < (C_1 + C_2) < 4 \quad (\text{Ecuación 2-9})$$

$$2) \quad \frac{C_1 + C_2}{2} - 1 < W < 1 \quad (\text{Ecuación 2-10})$$

Donde W es el peso de inercia.

En definitiva, el proceso de optimización utilizando PSO se desarrolla en los siguientes pasos [1]:

- 1.- Inicializar la población de partículas con posiciones y velocidades aleatorias en el espacio problema n dimensional.
- 2.- Para cada partícula, evaluar la función objetivo (fitness u otro criterio de valoración) deseado en las n variables.
- 3.- Comparar la aptitud de cada partícula con su p_{best} . Si el valor actual es mayor que p_{best} entonces hacer el p_{best} igual al valor actual, y p_i igual a la ubicación actual x_i en el espacio n dimensional.
- 4.- Identificar la partícula en la vecindad con el mejor éxito y asignar su índice.
- 5.- Cambiar la posición y la velocidad de la partícula de acuerdo a las ecuaciones de velocidad de vuelo y posición.

6.- Regresar al paso 2 hasta que se alcance un criterio de fin. Usualmente se emplea un número máximo de iteraciones o un valor óptimo de la función de aptitud.

Partiendo de un espacio restringido de búsqueda, el PSO presenta ser un excelente método para hallar los valores óptimos PID de un controlador industrial, pues se aprovecha su capacidad de resolver problemas complejos de gran tamaño con un mínimo conocimiento, utilizando reglas simples.

2.5. MODELACIÓN DE SISTEMAS

Generalmente si se desea conocer las características y comportamiento de un sistema, se debe experimentar físicamente con él.

Pero en muchos casos esto no es viable, debido a que la experimentación es compleja o imposible, debido a que industrialmente no se puede perder tiempo en los procesos, pues producen pérdidas económicas e inclusive materiales.

Por ello se utilizan los modelos de los sistemas, como una manera para obtener valorizaciones aproximadas de su comportamiento dinámico. Y para el caso de los controladores PID, permiten obtener respuestas aproximadas que en muchas veces satisfacen las especificaciones de diseño.

Los modelos más utilizados en el desarrollo de sistemas automáticos son los Paramétricos o Matemáticos, que son determinísticos o estocásticos.

Se dice que un modelo es determinístico cuando expresa la relación entre entradas y salidas mediante una ecuación exacta. Por contra, un modelo es estocástico si posee un cierto grado de incertidumbre. Estos últimos se definen mediante conceptos probabilísticos o estadísticos.

2.5.1. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE MODELOS

Ljung [11], Söderström y Stoica [19] mencionan varios métodos, pero existen dos métodos principales en la obtención del modelo de un sistema:

2.5.1.1. Modelado teórico

Se trata de un método analítico, en el que se recurre a leyes básicas de la física para describir el comportamiento dinámico de un fenómeno o proceso. Es restringido a procesos muy sencillos o a aplicaciones en que no se requiera gran exactitud en el modelo obtenido.

2.5.1.2. Identificación del sistema

Se trata de un método experimental y computacional que permite obtener el modelo de un sistema a partir de datos reales medidos en la planta.

2.6. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

La identificación de sistemas es la obtención de forma experimental de un modelo matemático en su forma continua o discreta, de tal manera que reproduzca con suficiente exactitud las características dinámicas del proceso.

2.6.1. PASOS DE LA IDENTIFICACIÓN

Ljung [11], menciona en términos generales los siguientes pasos:

- Obtención de datos de entrada – salida: Se debe excitar el sistema mediante la aplicación de una señal de entrada (preferente pseudo aleatoria) y muestrear (o registrar) la evolución de sus entradas y salidas.

- Tratamiento previo de los datos registrados: Los datos registrados están generalmente acompañados de ruidos indeseados, por tanto, se ve necesario “filtrar” los datos para facilitar y mejorar el proceso de identificación.
- Elección de la estructura del modelo: Este punto se facilita en gran medida si se tiene un cierto conocimiento sobre las leyes físicas que rigen el proceso, sin embargo es usual el utilizar los modelos paramétricos.
- Obtención de los parámetros del modelo: Es la estimación de los parámetros de la estructura que mejor se ajuste la respuesta del modelo en base a los datos registrados de entrada – salida.
- Validación del modelo: Es la determinación de que si el modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido para la aplicación en cuestión. Si se llega a la conclusión de que el modelo no es válido, se deben revisar los siguientes aspectos como posibles causas:
 - El conjunto de datos de entrada-salida no proporciona suficiente información sobre la dinámica del sistema.
 - La estructura escogida no es capaz de proporcionar una buena descripción del modelo.
 - El criterio de ajuste de parámetros seleccionado no es el más adecuado.

Dependiendo de la causa estimada, deberá repetirse el proceso de identificación desde el punto correspondiente. Por tanto, el proceso de identificación es un proceso iterativo, cuyos pasos pueden observarse en el organigrama de la Figura 2-10.

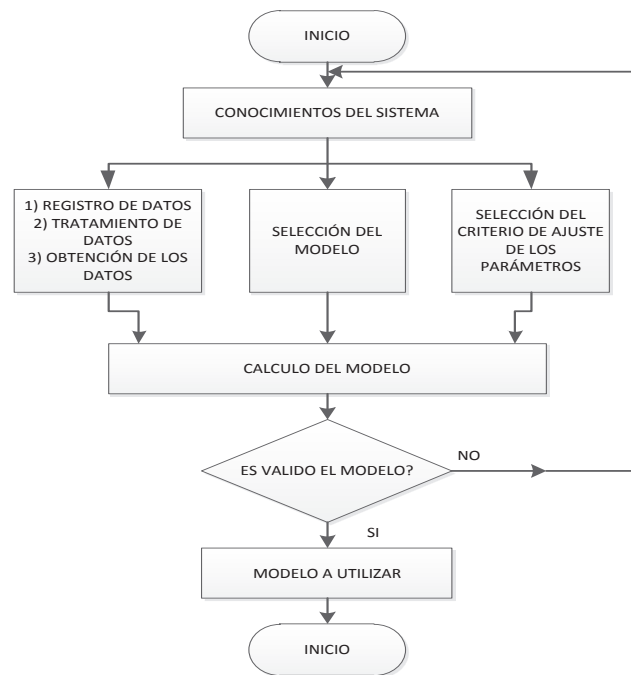


Figura 2-10. El proceso de la identificación [11].

En la actualidad, el proceso de identificación se ha facilitado con la aparición de herramientas computacionales, por ejemplo Ljung [10] desarrolló un Toolbox de identificación en el entorno de Matlab.

La empresa National Instruments [12], en sus nuevas versiones de LabVIEW, incluye un ToolKit de identificación, que funciona óptimamente con sus dispositivos de adquisición.

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID AUTO SINTONIZABLES

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental llevado a cabo para realizar el estudio comparativo de las técnicas de sintonía de la acción PID.

Inicialmente se presenta la plataforma de ensayos conformada por la planta de control de procesos, controlada mediante un Controlador de Automatización Programable -PAC, sus características y detalles principales.

A continuación se implementa el método de sintonía por realimentación de relé de Aström y Hägglund [8] y se calculan las ganancias del controlador PID con los valores de los coeficientes de Ziegler – Nichols [9]. Los resultados obtenidos mediante este método son utilizados como valores referenciales para el diseño de los demás controladores. A la vez se calculan los índices de desempeño para las técnicas de sintonía emergentes.

Se muestra el diseño e implementación de la técnica de sintonía mediante un algoritmo óptimo moderno como el Genético - GA.

Finalmente, se implementa la técnica de sintonía mediante enjambre de partículas PSO, utilizando el mismo lazo de control que el GA.

3.2. PLATAFORMA DE EXPERIMENTACIÓN

La plataforma de experimentación y ensayos estará conformada por el módulo didáctico de Control de Procesos existente en el CERFIN – SECAP (el mismo que maneja controladores del tipo PID simples, con un algoritmo de sintonía de control clásico) y el controlador de automatización programable – PAC, el cual en sí, es un sistema “embebido”, capaz de ejecutar algoritmos complejos mediante programación gráfica o textual estructurada.

3.2.1. MÓDULO DIDÁCTICO DE CONTROL DE PROCESOS

El módulo didáctico de entrenamiento sirve para el estudio de control multi variable.

Contiene lazos de control de nivel, flujo y presión. Donde se puede realizar análisis matemático de las ecuaciones de control, aplicación de los elementos básicos de control tales como sensores, controladores, actuadores, así como convertidores de señal.



Figura 3-1. Módulo didáctico de control de procesos.

El equipo cuenta con unidades de proceso tipo industrial, montado sobre perfil metálico de hierro estructural, tanque abierto de nivel y tanque cerrado de presión, ambos fabricados en acero.

Los comandos de puesta en marcha y paro del equipo tanto general como de sus componentes, se llevan a cabo por medio de un armario de control tipo industrial.

Finalmente, en cuanto a:

- Las estrategias de control: Posibilita llevar a cabo experimentalmente el efecto de la acción proporcional, el tiempo integral, y el tiempo derivativo en controladores PID para las diferentes variables de proceso, con importancia en el ajuste del set point (SP) para cada variable. Además, se puede manipular el tiempo del ciclo en un lazo de control sencillo y su efecto en relación con otras variables de control. El entrenador permite la perturbación multi variable de los sistemas dinámicos en toda su instalación
- El elemento final de control: Es una servo válvula la cual actúa en todos los procesos del módulo didáctico.
- La parte instrumental: Cuenta con sensores de presión, flujo, nivel y temperatura; colocados en puntos estratégicos del proceso, permitiendo al usuario la aplicación de diversas ecuaciones y diagramas en la enseñanza experimental.

Todas las señales de medición de los sensores pueden ser recolectadas por un registrador para su análisis.

El módulo además maneja dos bombas centrifugas con motor de corriente alterna que drenan caudal del tanque de cisterna hacia los distintos procesos.

Para determinar el comportamiento colectivo de los sistemas pertenecientes a varios procesos industriales utilizados en CERFIN – SECAP, se analizarán los controladores diseñados en todos sus procesos (nivel, flujo y presión), debido a que los mismos tienen distintos comportamientos dinámicos en la industria y presentan un excelente desafío para la velocidad de convergencia de los algoritmos óptimos presentados en este trabajo.

3.2.1.1. El Proceso de Nivel del Módulo Didáctico de Control de Procesos

El objetivo del control es mantener el nivel de líquido en un tanque, en un valor determinado, ante los cambios del punto de consigna o ante los cambios de carga simulados. La variable controlada es medida mediante el transmisor de nivel, el cual genera una señal de 4 a 20 mA que es transmitida al PAC.

El agua para llenar el tanque, es impulsada desde el tanque de cisterna, mediante la bomba centrífuga. Una servo válvula recibe una señal eléctrica de 4 a 20 mA del PAC, mediante la cual regula el caudal a suministrar en el proceso.

El lazo de control entonces estará conformado por el Controlador de Automatización Programable – PAC, la servo válvula, el tanque, y el transmisor de nivel; como se muestra en el P&ID de la Figura 3-2 y en la simbología de la Tabla 3-1.

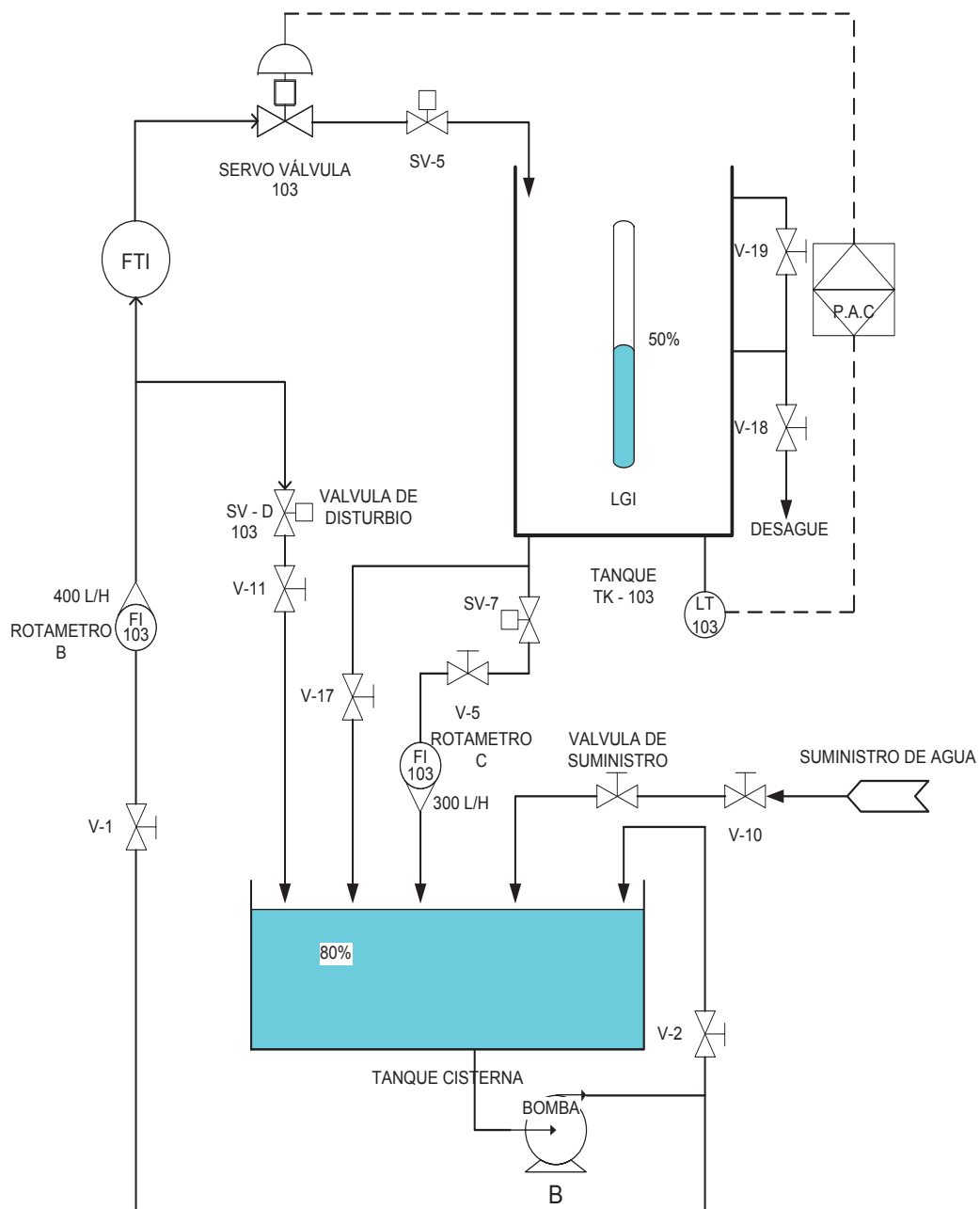


Figura 3-2. Diagrama de Instrumentación y Tuberías- P&ID, del proceso de Nivel del Módulo Didáctico.

Tabla 3-1. A) Simbología utilizada en el P&ID de la Figura 3-2.









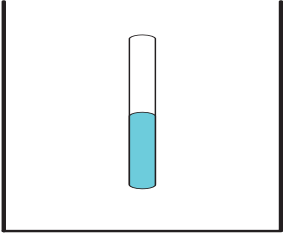


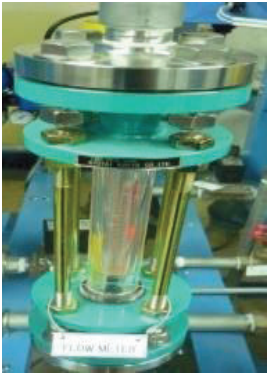




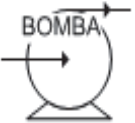

Símbolo	Etiqueta	Significado	Instrumento Físico
	PAC	Controlador de automatización programable – P.A.C.	
	LT	Transmisor de Nivel	
	FTI	Indicador Transmisor de Flujo (Electromagnético)	
		Servo válvula	
	TK	Tanque	

Tabla 3-1. B) Simbología utilizada en el P&ID de la Figura 3-2.

Símbolo	Etiqueta	Significado	Instrumento Físico
	FI	Indicador de Flujo (Rotámetro)	
	SV	Electro válvula	
	V	Válvula	
	BOMBA	Bomba centrífuga	

Para operar el proceso de nivel es necesario que las válvulas manuales, del módulo didáctico, estén aperturadas en los siguientes porcentajes:

Tabla 3-2. Valores de apertura de válvulas manuales del proceso de nivel.

NOMENCLATURA	APERTURA	FUNCIÓN	OBJETIVO
V – 1	100 %	Control manual de caudal del proceso	Fijar lectura de Rotámetro A en 400 L/H
V – 2	50 %	Control manual de caudal del proceso	Fijar lectura de Rotámetro B a 400 L/H
V – 5	90%	Control manual del caudal del proceso	Fijar lectura de Rotámetro C a 300 L/H
V – 10	100 %	Suministro de agua al tanque cisterna	Fijar el 80 % de llenado de líquido en el tanque cisterna
V – 11	25 %	Control manual de caudal de la perturbación	Perturbación
V – 17	0 %	Control de dirección	Direccionar caudal
V – 18	0 %	Control de desborde	Direccionar desborde
V – 19	100 %	Control de desborde	Direccionar desborde

Las electroválvulas SV- 5 y SV – 7, se abrirán o cerraran por medio del conmutador automático, que posee el módulo de ensayos, el cual está parametrizado para operarlas según el proceso que se está ejecutando.

3.2.1.2. El Proceso de Flujo del Módulo Didáctico de Control de Procesos

El objetivo del control es mantener constante el caudal en un sistema de tuberías, ante los cambios del punto de consigna o ante los cambios de carga simulados. La variable controlada es medida mediante el transmisor de flujo, el cual genera una señal de 4 a 20 mA que es transmitida al PAC.

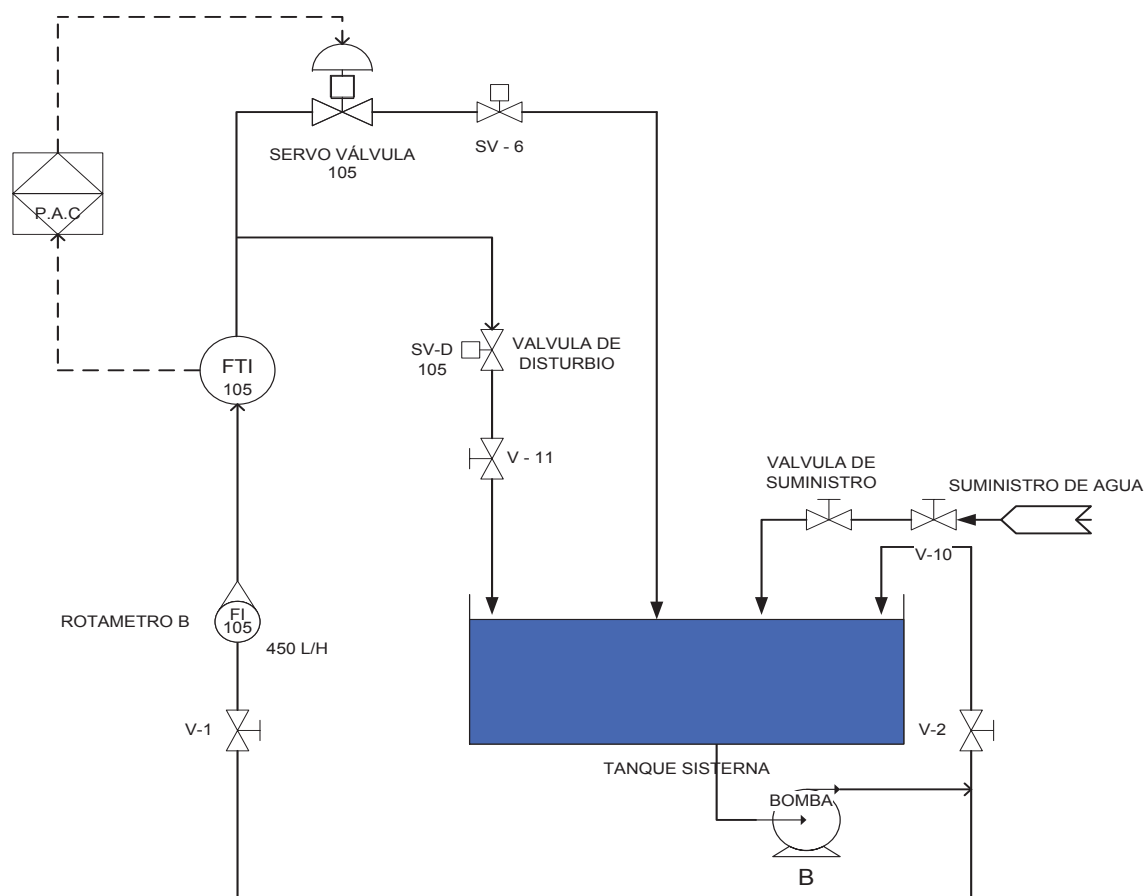


Figura 3-3. Diagrama de Instrumentación y Tuberías- P&ID, del proceso de Flujo del Módulo Didáctico.

El lazo de control entonces estará conformado por el Controlador de Automatización Programable – PAC, la servo válvula, la tubería, y el transmisor de flujo; como se muestra en el P&ID de la Figura 3-3.

Para operar el proceso de flujo es necesario que las válvulas manuales, del Módulo Didáctico, estén abiertas en los siguientes porcentajes:

Tabla 3-3. Valores de apertura de válvulas manuales del proceso de flujo.

NOMENCLATURA	APERTURA	FUNCIÓN	OBJETIVO
V – 1	100 %	Control manual de caudal del proceso	Fijar lectura de Rotámetro B a 450 L/H
V – 2	50 %	Control manual de caudal del proceso	Fijar lectura de Rotámetro B a 450 L/H
V – 11	25 %	Control manual de caudal de la perturbación	Perturbación

3.2.1.3. El Proceso de Presión del Módulo Didáctico de Control de Procesos

El objetivo del control es mantener constante la presión en un tanque presurizado, ante los cambios del punto de consigna o ante los cambios de carga simulados. La variable controlada es medida mediante el transmisor de presión, el cual genera una señal de 4 a 20 mA que es transmitida al PAC.

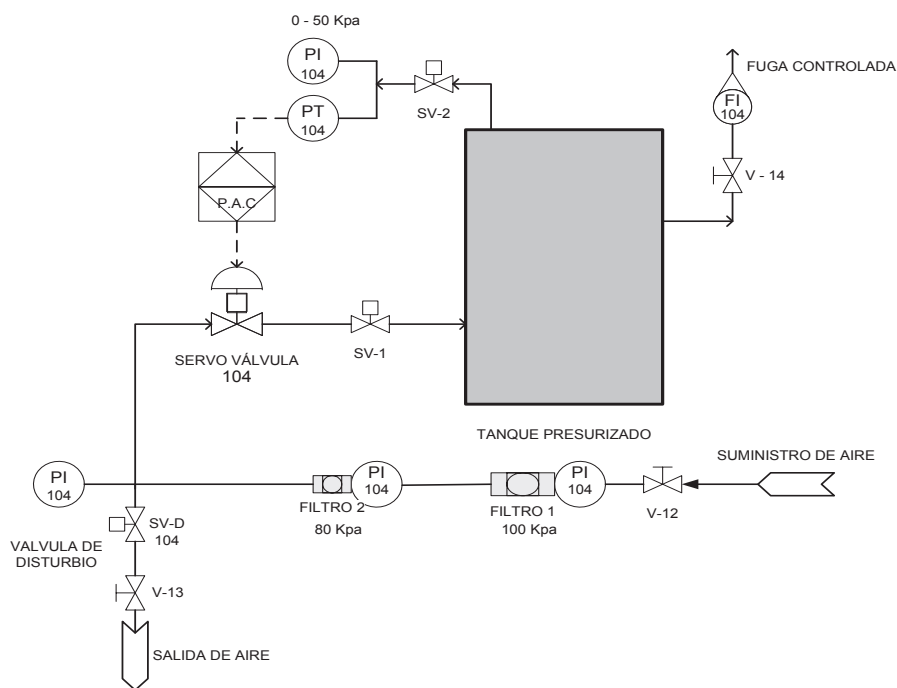


Figura 3-4. Diagrama de Instrumentación y Tuberías- P&ID, del proceso de Presión del Módulo Didáctico.

Para operar el proceso de presión es necesario que las válvulas manuales, del Módulo Didáctico, estén aperturadas en los siguientes porcentajes:

Tabla 3-4. Valores de apertura de válvulas manuales del proceso de flujo

NOMENCLATURA	APERTURA	FUNCIÓN	OBJETIVO
V – 12	90 %	Control manual de flujo del proceso	Fijar lectura de manómetro a 100 KPa
V – 13	25 %	Control manual de flujo de perturbación	Perturbación
V – 14	5 %	Control manual de presión en el tanque	Liberar un porcentaje de presión en el tanque

3.2.2. CONTROLADOR DE AUTOMATIZACIÓN PROGRAMABLE – PAC

Para la implementación del PAC se escogió el cRIO-9073 de National Instruments, el cual es un sistema pequeño, robusto y embebido de control y adquisición de datos; impulsado por las herramientas de programación gráfica NI LabVIEW de National Instruments para desarrollo rápido.

Ofrece un procesador industrial Freescale MPC5200 de 400 MHz, embebido en tiempo real para operación confiable autónoma o distribuida, que ejecuta de manera determinante sus aplicaciones, en el confiable sistema operativo Wind River Vx Works.



Figura 3-5. NI cRIO-9014 Real-Time Controller [13].

Integra un chip FPGA embebido que proporciona la flexibilidad, rendimiento y fiabilidad de hardware personalizado. Incluye módulos industriales de E/S intercambiables en vivo con acondicionamiento de señales integrado para conexión directa a una variedad de sensores y actuadores.

El sistema embebido Compact RÍO tiene como componentes los módulos C Series I/O, un chasis Compact RÍO reconfigurable que contiene el FPGA y el controlador Compact RÍO Real-Time.



(a)



(b)

Figura 3-6. a) I/O módulos para CompactRIO b) Reconfigurable FPGA Chasis.

Tiene un procesador industrial (ver Figura 3-5) que puede operar en red o de manera autónoma, el controlador tiene una entrada para fuente de alimentación DC, un puerto Ethernet para conexión en red y un puerto serial para conexión a periféricos.

Un sistema Compact RÍO [13] consiste de los siguientes componentes (ver Figura 3-6):

- Chasis.
- Controlador (que está integrado al chasis).
- Módulos.
- Software LabVIEW Real –Time.

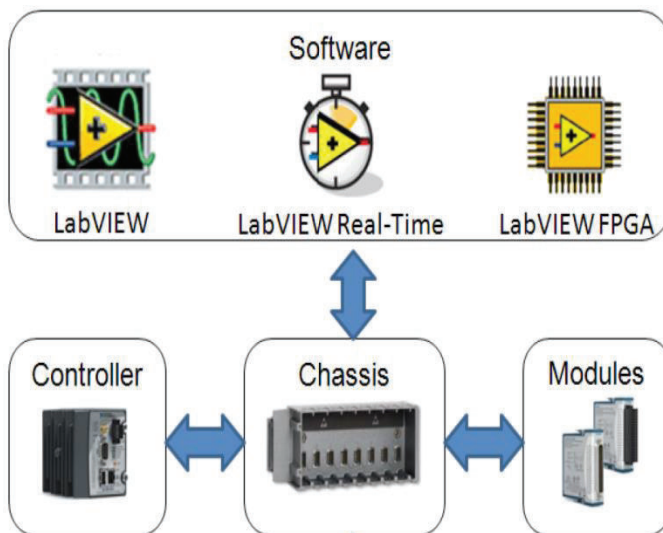


Figura 3-7. Componentes de un sistema Compact Rio

En el proyecto se instalaron dos módulos C en el chasis, para la entrada y salida de datos análogos, a continuación se describen sus características más importantes:

3.2.2.1. Módulo de Entradas – NI 9201

El NI 9201 es un módulo de la Serie C para entrada analógica de 8 canales con aislamiento de canal a tierra, sus características principales son:

- 8 canales de entrada analógicos.
- Resolución ADC de 12 bits.
- Rango de voltaje de entrada $\pm 10V$.
- Precisión máxima del rango de voltaje 0,053V.

- Velocidad de muestreo 500kS/s.
- Energía de consumo del chasis 1W máx.
- Calibre del cable: 0,5 a 2,5 mm².
- Torque de ajuste de cable: 0,5 a 0,6 N*m.
- Peso: 929 g. (32,7 oz).

3.2.2.2. Módulo de Salidas – NI 9263

El NI 9263 es un módulo de salidas analógico de actualización simultánea de cuatro canales a 100kS/s y cuenta con una protección sobre voltaje de $\pm 30V$ y una rápida velocidad de respuesta. Sus características principales son:

- 4 canales de salida analógicos
- Resolución DAC de 16 bits
- Rango de voltaje de salida $\pm 10V$
- Tipo de DAC es String
- Mínima precisión de Rango de Voltaje 0,11V
- Razón de actualización 100kS/s
- Energía de consumo del chasis 1W máx.

- Calibre del cable: 0,5 a 2,5 mm² (24 a 12 AWG)
- Torque de ajuste: 0,5 a 0,6 N*m.
- Peso: 929 g. (32,7 oz).

3.2.2.3. Montaje del PAC en el Módulo Didáctico de Control de Procesos

Para el montaje del PAC en el módulo didáctico de control de procesos, se seleccionó el lugar adecuado en el tablero de control, como la posición de instalación del conector externo de señales de I/O, revisando siempre las especificaciones técnicas de montaje del NI CompactRIO-9073 (ver Anexo 1).



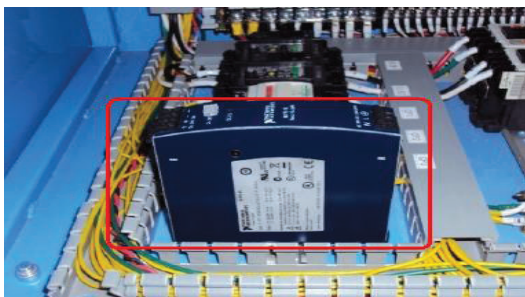
(a)



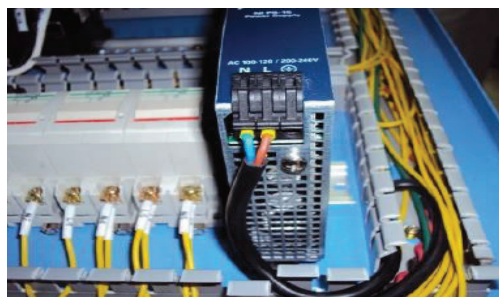
(b)

Figura 3-8. a) Interior del tablero del Módulo Didáctico, sin el PAC b) Instalación del chasis en el interior del tablero.

Se coloca la fuente de poder del NI CompactRIO-9073, instalando a la vez interruptores y protecciones eléctricas, realizando la conexión interna de sus terminales, de tal manera que cuando el selector de control de la máquina estuviese en modo externo el PAC pueda funcionar.



(a)



(b)

Figura 3-9. a) Fuente de poder del PAC, b) Conectores del PAC

Una vez montado el equipo se procedió a conectar las entradas y salidas eléctricas de los sensores y actuadores del módulo didáctico hacia el PAC (ver Anexo 2).

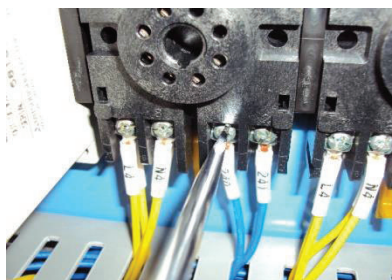


Figura 3-10. Conexión de I/O del PAC

Se procede a instalar el conector externo del PAC.



Figura 3-11. Conector externo para control del PAC.

Finalmente se colocan los módulos de entradas y salidas; y se realiza su respectiva comprobación eléctrica.

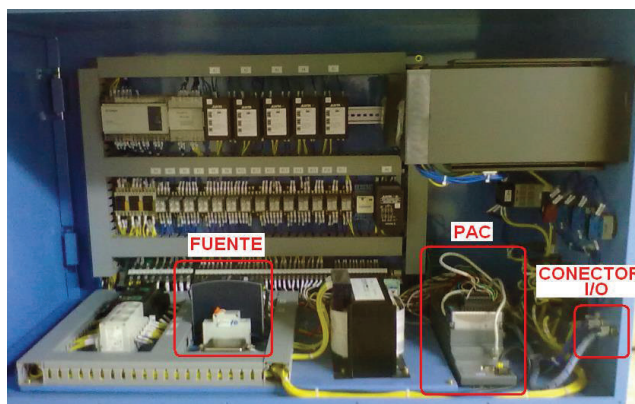


Figura 3-12. Interior del tablero del Módulo Didáctico,
Con el PAC CompactRIO-9073.

3.2.2.4. Configuración del Explorador de Automatización y Medición - MAX

El explorador de Automatización y Medición – MAX de LabVIEW, permite configurar los parámetros de los periféricos que comercializa la empresa National Instruments.

A continuación se presenta en forma resumida, los pasos requeridos para parametrizar y asegurar el funcionamiento del software del cRIO-9073.

- **Paso 1:** Inicializar el MAX.



Figura 3-13. MAX de National Instruments

- **Paso 2:** Reconocimiento y carga de software de periférico.

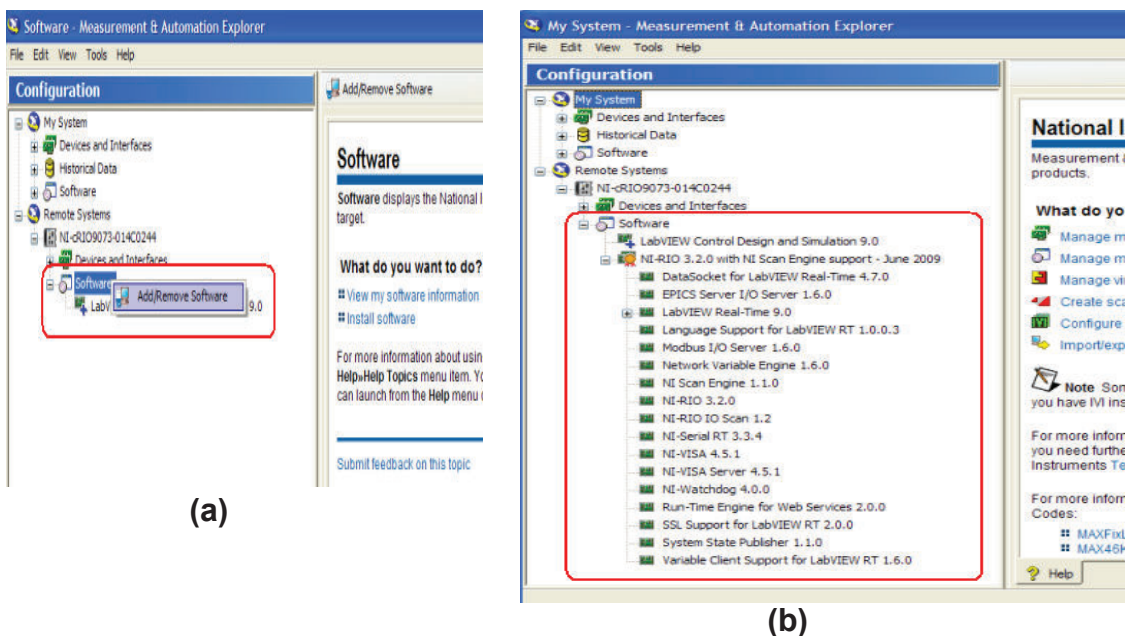


Figura 3-14. a.- Procedimiento de carga de software;

b.- Software y tool kits cargados

- **Paso 3:** Configuración de la dirección IP.

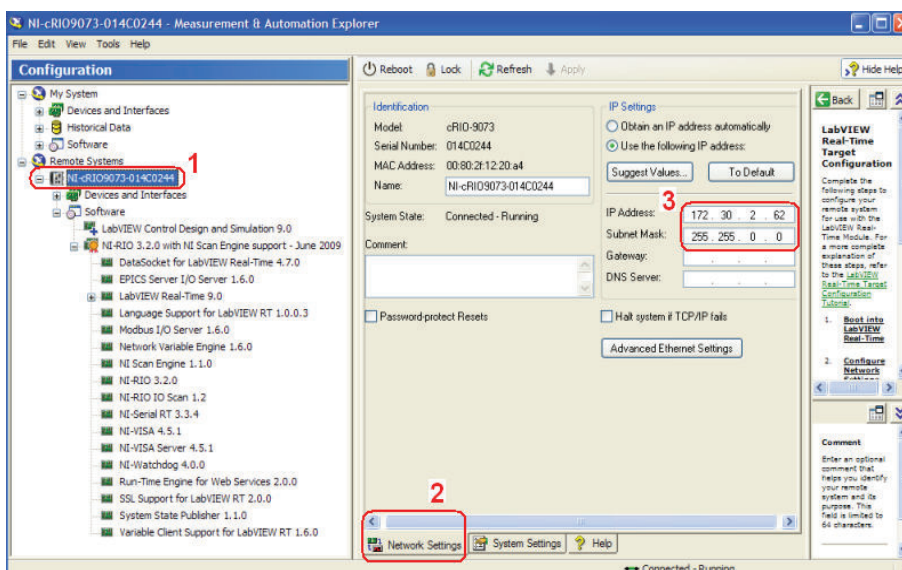


Figura 3-15. Dirección IP del cRIO-9073

- **Paso 4:** Salvar configuración.

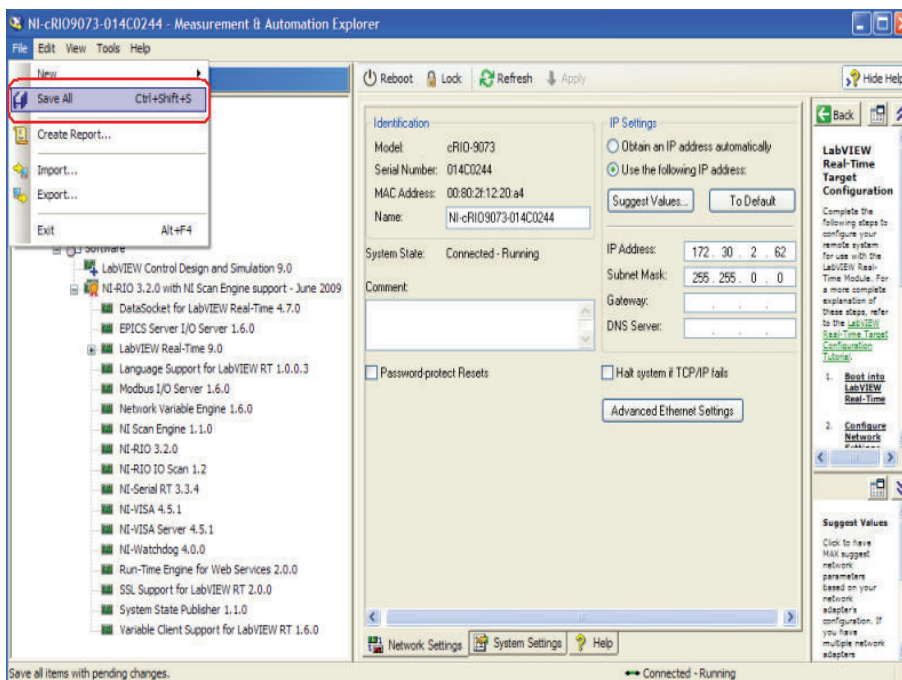


Figura 3-16. Respaldo de la configuración del cRIO-9073

3.3. IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE LA SINTONÍA DEL CONTROLADOR

Para realizar el análisis comparativo de los desempeños alcanzados por la acción de control mediante la aplicación de las técnicas de sintonía bajo estudio, se definen los siguientes índices de desempeño: Máximo Sobre Paso – Mp , Tiempo de subida – tr , Tiempo de establecimiento – ts , Error en estado estable – Ess y la Integral del error absoluto – IAE .

La selección de los criterios depende del tipo de respuesta del sistema deseada.

Para evaluar los criterios se considerará que:

- Cuando se tiene un sobre impulso excesivo Mp , implica que la energía que se le entregó al elemento final de control excedió la energía óptima para alcanzar el valor deseado. Esto aumenta el tiempo de establecimiento y produce posibles oscilaciones de la variable sobre la referencia.
- El ts y el tr , son retardos que la respuesta del sistema presenta hasta llegar a márgenes de valores referidos al punto de consigna, valor deseado o set point -SP, lo útil debería ser un corto tiempo entre los mismos.
- El Ess , representa la diferencia entre el valor deseado y el alcanzado por el actuador, un sistema de control óptimo debe disponer de un error que tienda a cero, es decir, que el valor del actuador debe seguir a la consigna.
- Un IAE , representa básicamente energía de pérdida en el sistema. Un valor pequeño de IAE , implica que la variable de proceso -PV, estuvo lo suficientemente cerca del valor deseado o set point -SP y por tanto se obtuvo un control óptimo.

3.3.1. CÁLCULO DE LOS ÍNDICES DE DESEMPEÑO

Para la determinación de los índices de desempeño, se utilizó el MATLAB script de LabVIEW, como se muestra en la Figura 3-17.

```

MATLAB script
kp] G=series(conpid,planta);
Ti] sys=feedback(G,1);
Td] sinput=1;
[y,t]=step(sinput*sys);
datos=stepinfo(sinput*sys);
%CALCULO DEL SOBRE PASO - Mp%
Mp=(datos.Overshoot)/100;
%CALCULO DEL TIEMPO DE RESPUESTA%
tr=datos.RiseTime;
%CALCULO DEL TIEMPO DE ESTABLECIMIENTO - ts%
ts=datos.SettlingTime;
%CALCULO DEL ERROR EN ESTADO ESTABLE - Ess%
length(y);

```

Figura 3-17. Cálculo de índices de desempeño con MATLAB script de LabVIEW.

El script desarrollado, utiliza el modelo del sistema y la topología del controlador, para calcular la información de su respuesta ante una entrada paso. Su programa, está disponible en código abierto y puede ser utilizado desde el directorio raíz del DVD que se presenta como aporte y estudio junto con este trabajo.

3.3.2. SINTONIZACIÓN POR OSCILACIÓN CRÍTICA – ZIEGLER Y NICHOLS

Para la sintonía mediante los coeficientes de Ziegler y Nichols [9] se desarrolló un programa en LabVIEW, que determina en forma automática los valores de las ganancias PID y los índices de desempeño.

A continuación se presentan las herramientas principales (VI's) y los algoritmos que fueron utilizados:

- El PID Autotuning VI: Este VI usa sus entradas para iniciar un proceso de auto sintonía, utilizando el método de realimentación por relé. Incluye una poderosa herramienta que es el “PID Autotuning Wizard”, que facilita la obtención de las ganancias PID. Su funcionamiento en detalle es explicado en el PID Control Toolkit User Manual [22] de National Instruments.

Las entradas parametrizables se muestran en la siguiente figura:

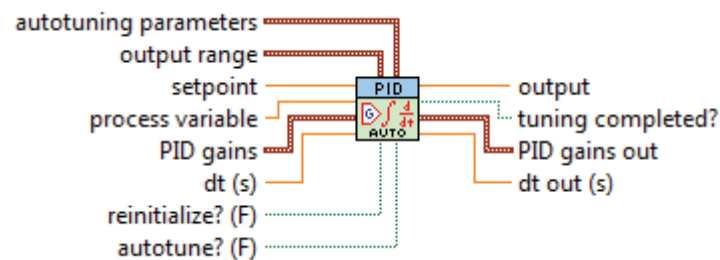


Figura 3-18. PID Autotuning VI de LabVIEW

En donde:

Autotuning parameters: Permite la selección manual gracias al wizard, lo principal a configurar es:

- ✓ Controller Type: Permite la selección del tipo de control P, PI o PID.
- ✓ #Cycles: Permite la selección del número de ciclos de consigna que usara el relé.
- ✓ Relay amplitude: Permite la selección de la amplitud de la acción relativa de consigna que utilizara el relé.
- ✓ Control design: Permite la selección de la respuesta del Controlador PID. Cuando se selecciona “fast” la acción del controlador proporciona

como resultado una respuesta lenta del sistema y cuando se selecciona “slow” la respuesta del sistema tendrá un sobre impulso bajo.

- ✓ Noise level: Es una estimación del nivel de ruido obtenido en la medición de la variable del proceso.
- ✓ Output range: Especifica el rango de acción en forma porcentual de la salida del controlador.
- ✓ Setpoint: Es el punto de consigna de la variable del proceso.
- ✓ Process variable: Es la medida de la variable a controlarse.
- ✓ PID gains: Especifica las ganancias PID del controlador.
- ✓ dt(s): Especifica el tiempo en segundos en el cual opera el VI.
- ✓ Reinitialize?(F): Al activarse resetea los parámetros internos de controlador, como el tipo de controlador por ejemplo.
- ✓ Autotune?(F): Al activarse se habilita al wizard de auto sintonía.
- ✓ Output: Entrega la salida del controlador PID.
- ✓ Tuning completed?: Indica si se ha completado el proceso de sintonía.
- ✓ PID gains out: Retorna los valores de las ganancias PID calculadas.
- ✓ dt out(s): Retorna el actual intervalo de tiempo en segundos.

- El Algoritmo de sintonización Z-N / A-H: El programa emplea el método de realimentación por relé propuesto por Aström y Hägglund [21], en donde se determina inicialmente los valores críticos de ganancia y periodo.

Los pasos se los realiza automáticamente gracias al PID Autotuning Wizard, y se describen en los flujo gramas la Figura 3-19.

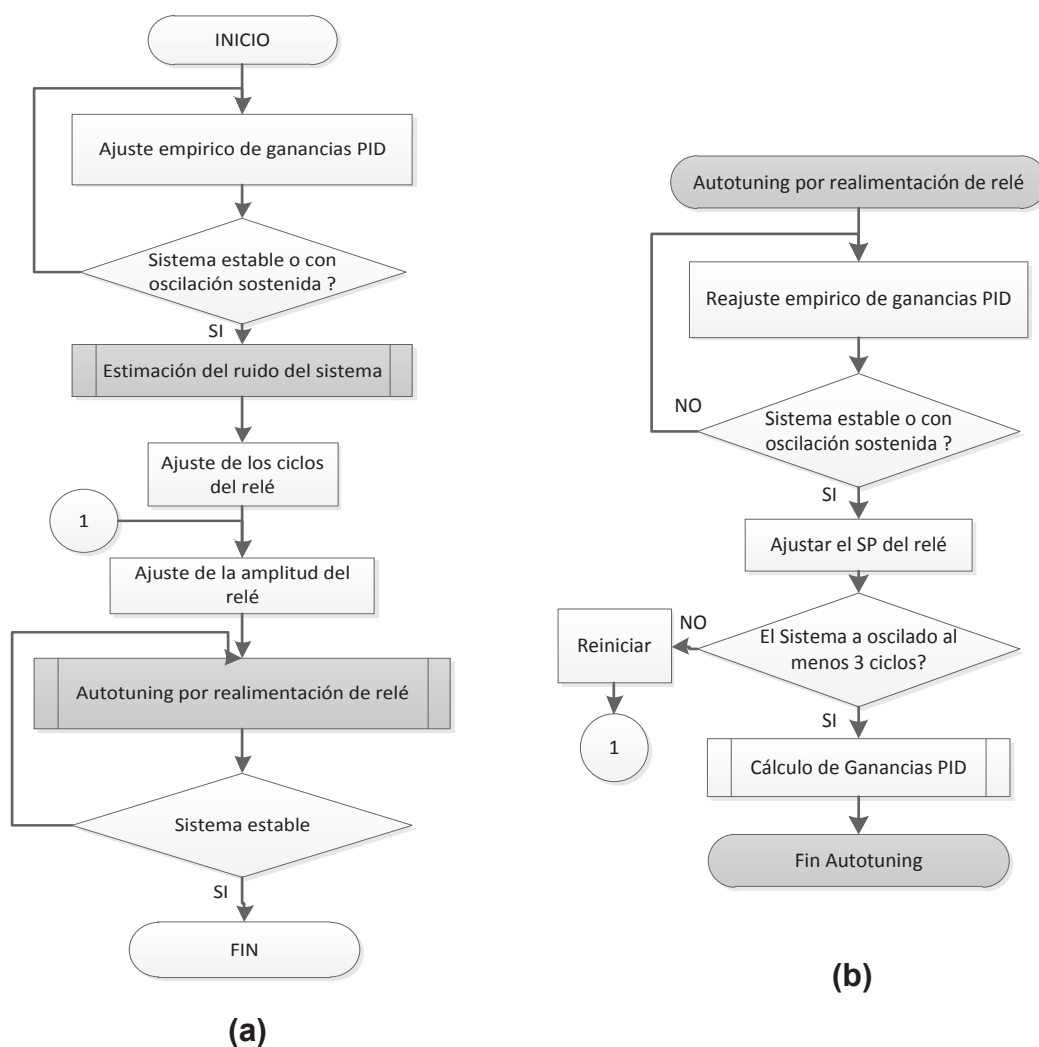


Figura 3-19. (a) Algoritmo inicial del procedimiento de auto sintonía por medio del PID Autotuning Wizard. (b) Algoritmo de auto sintonía por medio del PID Autotuning Wizard [22]

El cálculo del ruido, como se lo muestra en la Figura 3-20, se hace automáticamente también con el PID Autotuning Wizard, y prácticamente es estimado tomando el promedio de diez valores medidos de la variable del proceso.

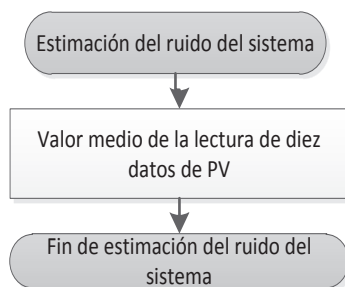


Figura 3-20. Algoritmo básico de la estimación del ruido en el sistema

El cálculo de las ganancias, se determina en base los coeficientes de Ziegler – Nichols [20], y lo hace automáticamente el PID Autotuning Wizard, usando el procedimiento mostrado en la Figura 3-21.

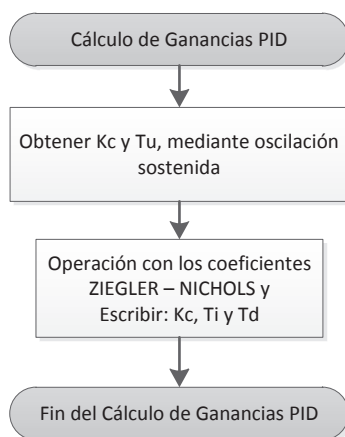


Figura 3-21. Algoritmo de cálculo de ganancias PID

Los parámetros obtenidos, al igual del valor de los índices de desempeño se presentan en el Capítulo IV.

3.3.3. SINTONIZACIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

Para el caso propuesto, el controlador utiliza el modelo del sistema y el algoritmo genético en el lazo de control mostrado en la Figura 3-22.

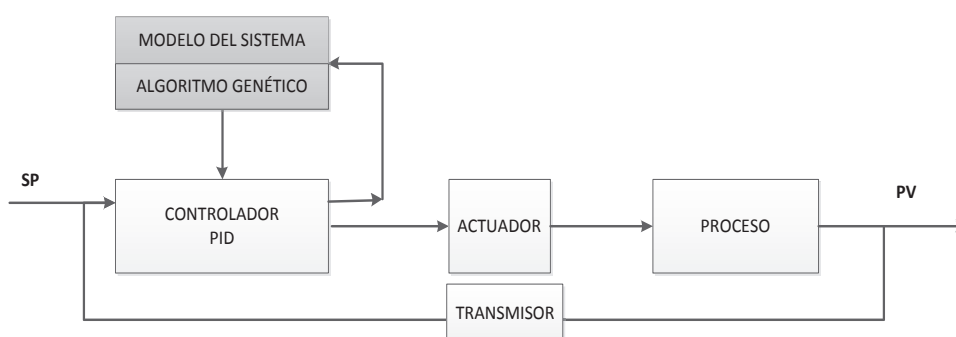


Figura 3-22. Lazo de control “PID GA”.

A continuación se detallan los elementos principales del lazo de control “PID GA”.

3.3.3.1. El Modelo del Proceso de Control de Nivel

El elemento final para controlar el nivel es la servo válvula de entrada hacia el tanque, la cual es controlada por una señal neumática y eléctrica, esta última proveniente del PAC.

El sensor de nivel trabaja bajo el principio de diferencias de presiones hidrostáticas y atmosféricas. Y entrega una señal de corriente estándar de 4 a 20 mA, hacia el módulo de entrada análogo del PAC.

Desde este punto de vista, la planta sobre la que actúa el controlador de automatización programable, está formada por el conjunto Servo válvula + Tanque + Sensor, cuyo modelado es necesario abordar como etapa previa al diseño del controlador.

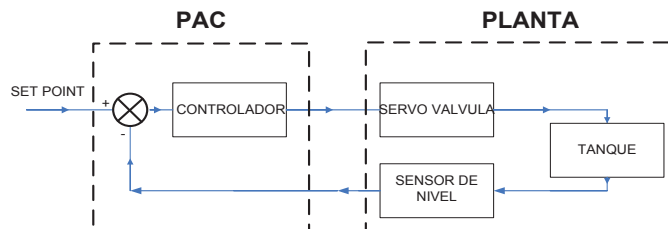


Figura 3-23. Modelo del Proceso de Control de Nivel.

La variable de entrada al modelo fue el porcentaje de caudal suministrado por la bomba, y la variable de salida o de respuesta fue una señal eléctrica de corriente proporcional al nivel en el tanque, como se muestra en la Figura 3-24.

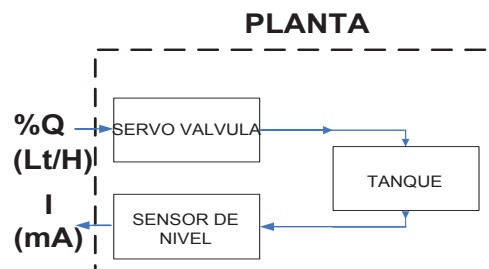


Figura 3-24. Variables de entrada y salida de la planta

El procedimiento para determinar el modelo de la planta fue:

- Ingresar señales escalón binarias de duración aleatoria o pseudoaleatorias, con cambios bruscos de magnitud y con un espectro suficientemente amplio de frecuencias.

- Tomar muestras de la variable de entrada y de salida del modelo cada 3 segundos, utilizando el Toolkit de Generación de Reportes y el VI de escritura de datos medidos –lvm, de LabVIEW, cuyo programa se presenta en los anexos (ver Anexo 3).
- Importar los datos registrados desde el archivo .lvm anteriormente generado, tratarlos y estimarlos mediante el SI Model Estimation Express VI del Toolkit de Identificación de sistemas de LabVIEW, cuyo programa se presenta en los anexos (ver Anexo 4).
- Tratar los datos y ajustarlos a varios modelos dinámicos lineales de auto regresión con variables exógenas. Ya que por lo general, modelos que aceptan regresiones lineales como los ARX conducen a simples y robustos esquemas, además de que solo se debe adoptar estructuras sofisticadas en casos que las estructuras más sencillas no pasen los test de validación.

LabVIEW permite realizar el trato y ajuste a un modelo, mediante el “SI Model Estimation Express VI”.

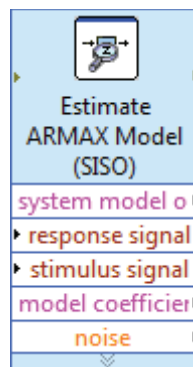


Figura 3-25. SI Model Estimation Express VI de LabVIEW

El SI Model Estimation Express VI, realiza estimaciones para obtener el modelo matemático para un sistema desconocido.

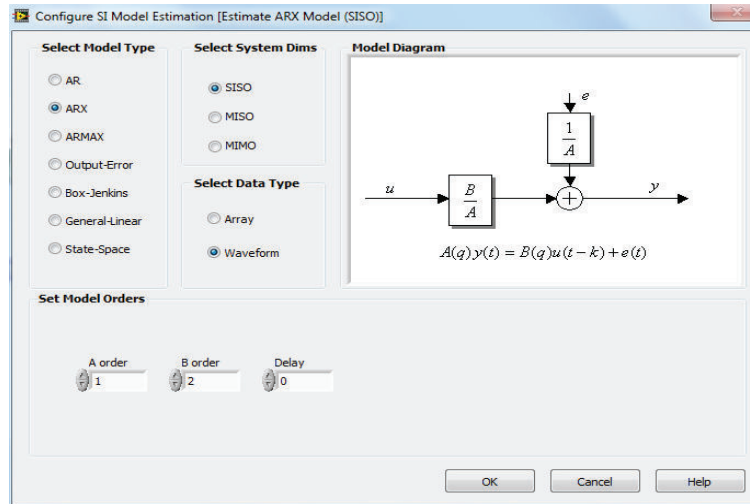


Figura 3-26. Configuración del SI Model Estimation VI de LabVIEW

El VI Model Estimation Express VI, permite trabajar con varios modelos paramétricos lineales y a su vez poder modificar sus cocientes en forma manual, como se muestra en la Figura 3-26.

- Evaluar los modelos, usando como criterio la salida del modelo (ver en el Capítulo 4).
- Seleccionar el modelo cuya salida presenta el mejor ajuste respecto a la señal de salida medida.

A continuación se presenta la función de transferencia del modelo (los detalles de la obtención y la validación se explican en el Capítulo 4), de control de nivel, que se utilizó durante el desarrollo de este proyecto para la sintonía mediante algoritmos genéticos GA y enjambre de partículas PSO.

$$G_{PLANTA-NIVEL} = \frac{0.00417306S + 0.0174206}{S + 0.00564028}$$

3.3.3.2. El Modelo del Proceso de Control de Flujo

El elemento final para controlar el flujo es la servo válvula de entrada hacia la tubería, la cual es controlada por una señal neumática y eléctrica, esta última proveniente del PAC.

El sensor de flujo es magnético y trabaja bajo el principio de la ley de inducción de Faraday. Y entrega una señal de corriente estándar de 4 a 20 mA, hacia el módulo de entrada análogo del PAC.

Desde este punto de vista, la planta sobre la que actúa el controlador de automatización programable, está formada por el conjunto Servo válvula + Tubería + Sensor. Como se muestra en la Figura 3-27.

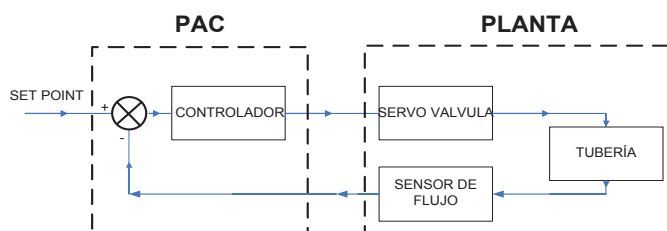


Figura 3-27. Modelo del Proceso de Control de Flujo.

La variable de entrada al modelo fue el porcentaje de caudal suministrado por la bomba, y la variable de salida o de respuesta fue una señal eléctrica de corriente proporcional al flujo en la tubería, como se muestra en la Figura 3-28.

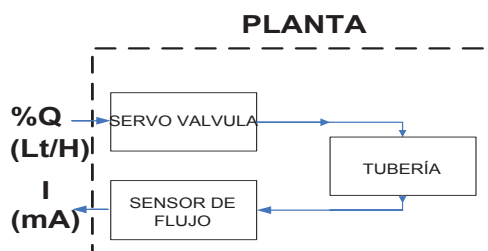


Figura 3-28. Variables de entrada y salida de la Planta de Control de Flujo.

El procedimiento para determinar el modelo de la planta fue el mismo utilizado para el de Control de Nivel (los detalles de la obtención y la validación se explican en el Capítulo 4), obteniendo la siguiente función de transferencia:

$$G_{PLANTA-FLUJO} = \frac{0.00299016S + 0.060051}{S + 0.0520519}$$

3.3.3.3. El Modelo del Proceso de Control de Presión

El elemento final para controlar la presión del tanque (ver Figura 3-4) es la servo válvula de entrada hacia el tanque presurizado, la cual es controlada por una señal neumática y eléctrica, esta última proveniente del PAC.

El sensor de presión es del tipo bourdon y trabaja bajo el principio de deflexión que sufre un elemento elástico que es proporcional a la presión aplicada. Y en conjunto con un transmisor escalado entrega una señal de corriente estándar de 4 a 20 mA, hacia el módulo de entrada analógico del PAC.

Desde este punto de vista, la planta sobre la que actúa el controlador de automatización programable, está formada por el conjunto Servo válvula + Tanque presurizado + Sensor. Como se muestra en la Figura 3-29.

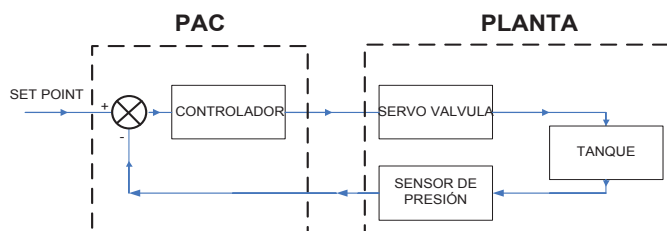


Figura 3-29. Modelo del Proceso de Control de Presión.

La variable de entrada al modelo fue el porcentaje de flujo de aire suministrado por un compresor, y la variable de salida o de respuesta fue una señal eléctrica de corriente proporcional a la presión en el tanque, como se muestra en la Figura 3-30.

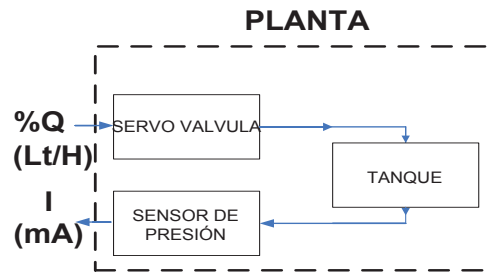


Figura 3-30. Variables de entrada y salida de la Planta de Control de Presión.

El procedimiento para determinar el modelo de la planta fue el mismo utilizado para el de Control de Nivel (los detalles de la obtención y la validación se explican en el Capítulo 4), obteniendo la siguiente función de transferencia:

$$G_{PLANTA-PRESIÓN} = \frac{0.0210471S + 0.0765206}{S + 0.0334581}$$

3.3.3.4. El Algoritmo genético - GA

Para el algoritmo genético se utiliza la función “ga” del toolbox de optimización de Matlab, la cual tiene la siguiente sintaxis:

$$[x, fval] = ga(@función_objetivo, \text{número de variables}, \text{options});$$

La función “ga” es llamada desde un MATLAB script en LabVIEW, como se muestra en la Figura 3-31.

```

MATLAB script
%universo de busqueda%
kpi= kp-kp*0.5;
kpf= kp+kp*0.5;
Tdi= Td-Td*0.5;
Tdf= Td+Td*0.5;
Tii= Ti-Ti*0.5;
Tif= Ti+Ti*0.5;
%algoritmo genetico%
options= gaoptimset('PopulationSize',3,'Generations',8,'PopInitRange',[kpi Tii Tdi;kpf Tif Tdf],'CrossoverFraction',0.5);
[x,fval]= ga(@gpIDN,3,options);
GENkp=x(1);
GENTi=x(2);
GENTd=x(3);
fval

```

Figura 3-31. Ganancias PID óptimas con Algoritmos Genéticos en el MATLAB script de LabVIEW.

En donde:

- La función objetivo “gpIDN”, es un fichero math.h desarrollado en MATLAB y tiene el esquema planteado por Geetha M.[23], algoritmo que trabaja con los valores principales que detallan el comportamiento del sistema y entrega un puntaje de la valorización de la totalidad de ellos.

Sus pasos se describen en el siguiente flujo grama

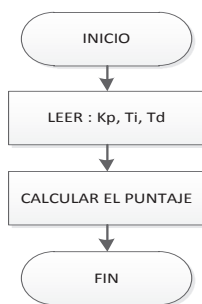


Figura 3-32. Procedimiento de la función objetivo

- El número de variables corresponden a las ganancias PID, calculadas en base al algoritmo genético y a la función objetivo.
- Las opciones parametrizables de la función de “ga”, son configurables desde la línea de comandos y en este caso desde el MATLAB script de LabVIEW, a través de la función “gaoptimset”, con la siguiente sintaxis:

```
options = gaoptimset ('parámetro 1',n1,'parámetro 2',n2, ..... );
```

Los principales parámetros utilizados fueron:

- Tamaño de la Población = 3
- Generaciones = 8
- Rango inicial de la población = [*kpi Tii Tdi ; kpf Tif Tdf*]

Donde *kpi*, *Tii* y *Tdi*, corresponden a los rangos iniciales y *kpf*, *Tif* y *Tdf* son los rangos finales del universo de búsqueda. Dichos rangos fueron el $\pm 50\%$ de los valores PID del método de Ziegler – Nichols.

- Fracción de cruce = 0.5

El detalle de cómo se llegó a determinar los valores de parametrización de la función ga, se presentan en el Capítulo 4, como “Ajuste experimental de parámetros de Algoritmos Genéticos”.

3.3.4. SINTONIZACIÓN MEDIANTE INTELIGENCIA DE ENJAMBRES – OPTIMIZACIÓN POR CÚMULOS DE PARTICULAS (PSO)

Para la optimización por PSO, se utilizó el lazo de control mostrado en la Figura 3-33.

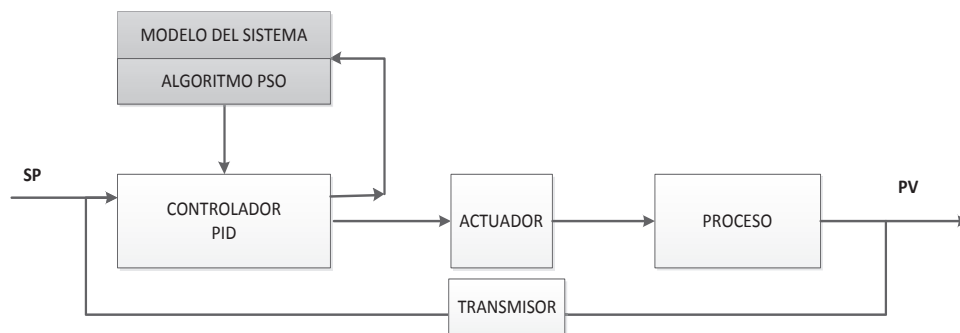


Figura 3-33. Lazo de control “PID PSO”.

En donde el modelo del sistema es el mismo que se utilizó para el lazo “PID GA”.

3.3.4.1. El Algoritmo por Cúmulo de Partículas – PSO

Para el algoritmo PSO se utilizó una función math.h desarrollada en Matlab, con la siguiente sintaxis:

$$[kppso, Tipso, Tdps] = NpsoPIDwm (inkp, inTi, inTd);$$

Función es llamada desde un MATLAB script de LabVIEW, como se muestra en la Figura 3-34.

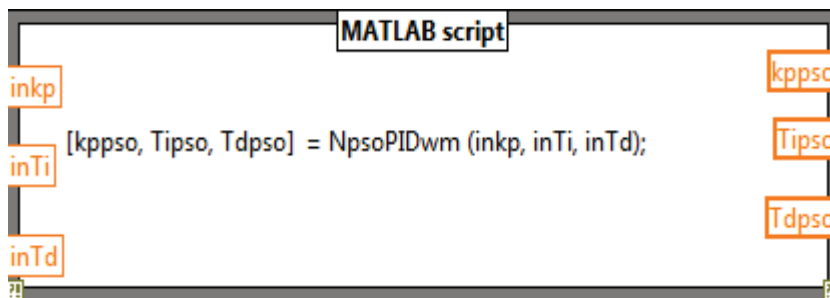


Figura 3-34. Ganancias PID optimas por Cúmulo de Partículas, en el MATLAB script de LabVIEW

En donde:

- La función “NpsoPIDwm”, es un fichero math.h desarrollado en MATLAB para el proceso de Nivel, y que contiene el algoritmo PSO que maneja el “enjambre” de valores PID a ser optimizados e interactúa con la función fitness. Para los procesos de Flujo y Presión se utilizan respectivamente las funciones “FpsoPIDwm” y “PpsoPIDwm”.

Su algoritmo se describe en el siguiente flujo grama

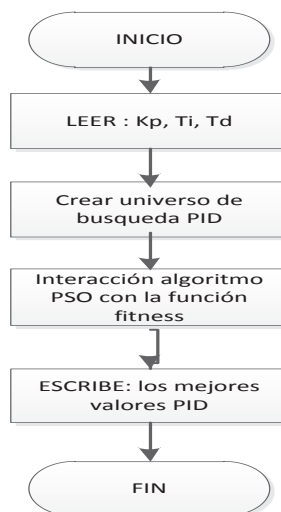


Figura 3-35. Procedimiento de la funciones PSO.

El Algoritmo PSO utilizado, contiene la estructura básica del método de optimización (Ecuación 2-7), al cual se lo modificó, para que maneje tres variables de búsqueda dentro de un universo establecido. Para determinar los valores de parametrización de la función NpsoPIDwm, PpsoPIDwm y FpsoPIDwm, se utilizaron los criterios planteados por Shi y Eberhart [24], y Perez y Behdinan [26].

El programa del Algoritmo PSO, está disponible en código abierto y puede ser utilizado desde el directorio raíz del DVD que se presenta como aporte y estudio junto con este trabajo.

- El universo de búsqueda PID es un rango establecido del ± 50 % de los valores PID (valores semilla obtenidos del método de Ziegler – Nichols) ingresados en las funciones PSO.
- La función fitness es un archivo math.h, llamado “gananciaspidPSO1”, que tiene el esquema planteado por Geetha M.[23], y que toma los valores PID del “enjambre” y los evalúa con el modelo del sistema (que incluye el controlador PID), entregando un “puntaje”, el mismo que sirve como criterio de selección para las mejores partículas en el Algoritmo PSO.

3.3.5. AUTO SINTONIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID MEDIANTE INTELIGENCIA DE ENJAMBRES

Explicado el funcionamiento de los algoritmos desarrollados en este proyecto, se presenta a continuación el programa de bloques diseñado en LabVIEW, llevado a cabo para el “Diseño y Construcción de un Controlador PID Auto-sintonizable mediante Inteligencia de Enjambres para Determinar el Comportamiento Colectivo de los Sistemas Pertenecientes a Procesos Estudiados en el CERFIN-SECAP”. El manual de uso se encuentra en los anexos (ver Anexo 5).

Tomando como referencia controladores industriales que utilizan algoritmos modernos, para auto sintonización, como el Easy Tune de ABB [27], el Accutune III de Honeywell [28], o el Melsec Q de Mitsubishi [29], que emplean métodos patentados por el fabricante que incluyen el modelado de la planta, la auto sintonización del controlador PID diseñado en este proyecto, se basa en la estimación de sus parámetros (proporcional, integral y derivativo) mediante un modelo matemático o una función de transferencia del proceso.

Ya que los procesos a ser controlados son de una planta didáctica que se maneja en el CERFIN - SECAP, los modelos de sus procesos ya han sido determinados con anterioridad (ver capítulo IV), de tal manera que serán utilizados en la estrategia de control óptimo.

El controlador presentado maneja una pre – auto sintonización y un ajuste fino de sus parámetros mediante optimización PSO y GA.

El proceso de pre – auto sintonización se muestra en la siguiente gráfica:

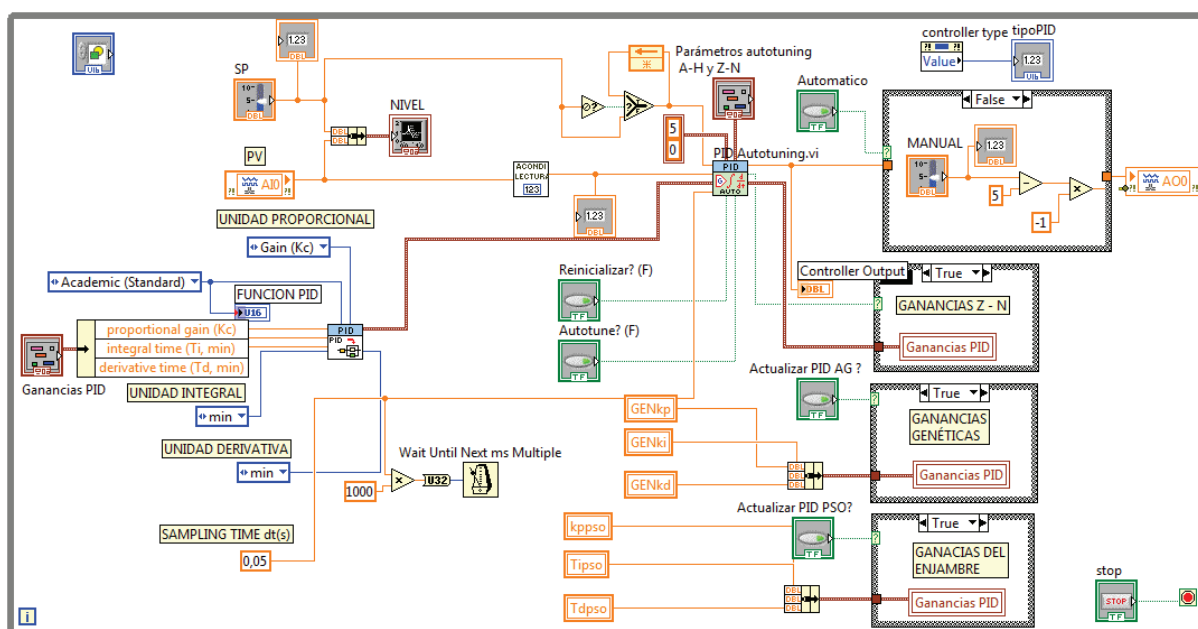


Figura 3-36. Pre – auto sintonización del Controlador PID.

En la Figura 3-36 se trabaja con un lazo “while”, y su principal herramienta es el “PID Autotuning. vi”, con una topología estándar también llamada “académica”.

El PID trabajara con valores limitados en el valor deseado o Set Point –SP, de tal manera de evitar saturación del actuador y por tanto el efecto “windup”.

Para utilizar el controlador es preciso que se den ciertos valores iniciales a sus ganancias PID y que estas produzcan valores aceptables de tal manera que la variable del proceso tenga un comportamiento estable o una oscilación sostenida, respecto al punto de consigna.

Es necesario que se tenga un conocimiento del proceso a controlar de tal manera que no se exceda en los parámetros PID, por tanto se ha configurado por defecto con $K_p = 5$, $T_i = 0$ y $T_d = 0$, los valores de las ganancias PID para todos los procesos.

Como en los PLC Sysmac de Omron [30, 31], a través de su función 191, la cual aplica la prueba de relé de histéresis, el controlador diseñado en el proyecto determina de esta manera los valores de Ziegler y Nichols, los cuales sirven como valores semilla para la optimización de los mismos.

Como el controlador 6355 de Turnbull Control Systems [32], el proceso de auto sintonización (ajuste fino) funciona ya sea que el controlador esté en forma manual o automática, y el programa se diseñó de tal manera que la decisión de aceptar o no los nuevos parámetros PID siempre recaerán en el operador.

Cabe recalcar que en herramientas como el Easy Tune de ABB [27], se utiliza el *IAE* como criterio para determinar los parámetros óptimos, lo cual puede también utilizarse en el controlador diseñado en el presente proyecto.

La auto sintonización ÓPTIMA se utiliza un segundo lazo “while”, y la función PSO llamada mediante un MATLAB script, como se muestra en la Figura 3-37.

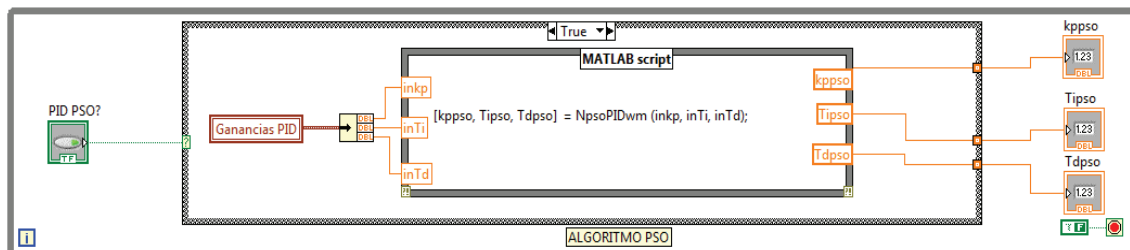


Figura 3-37. Auto sintonización por Cúmulo o Enjambre de Partículas – PSO.

La función “NpsoPIDwm” de la Figura 3-37, varía según el proceso, pues para la Presión la función se llama “PpsoPIDwm” y para el Flujo “FpsoPIDwm”.

La selección del proceso a controlar se debe realizar desde el directorio raíz, lo cual se presenta en el manual de uso que se encuentra en los anexos (ver Anexo 5).

Para comparar el desempeño del controlador PID - PSO, se desarrolló un segundo controlador óptimo, mediante un tercer lazo “while” y la función “ga” de Matlab, llamada desde un script, como se muestra en la Figura 3-38.

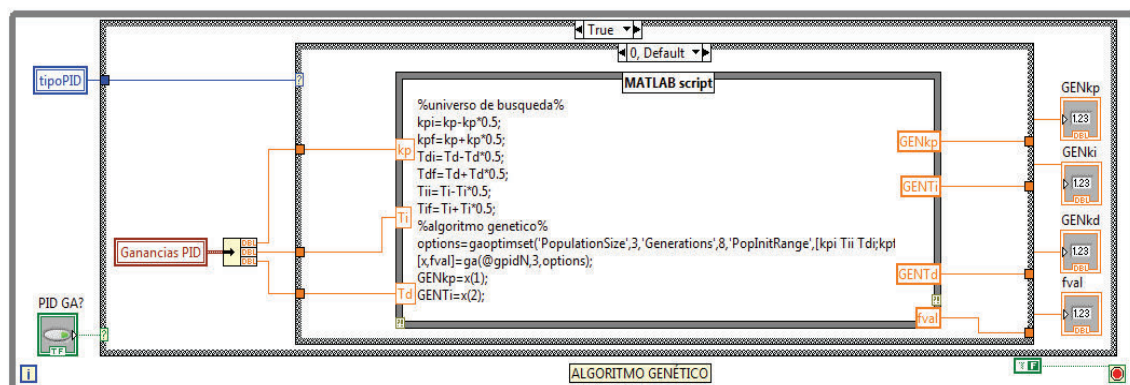


Figura 3-38. Auto sintonización por Algoritmos Genéticos – GA.

Dentro del lazo “while” de la Figura 3-38, se establece un lazo “case” que permite seleccionar si se desea trabajar con un controlador PID, PI o P.

Los valores de los índices de desempeño se obtienen mediante un cuarto lazo “while”, el cual se muestra en la Figura 3-39.

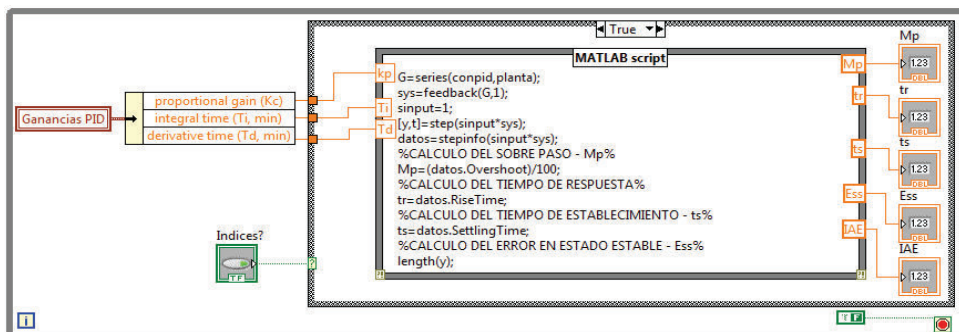


Figura 3-39. Obtención automática de los Índices de Desempeño del controlador

El panel frontal se muestra en la Figura 3-40, y fue desarrollado de tal manera que se pueda operar sin complejos pasos para el operario.

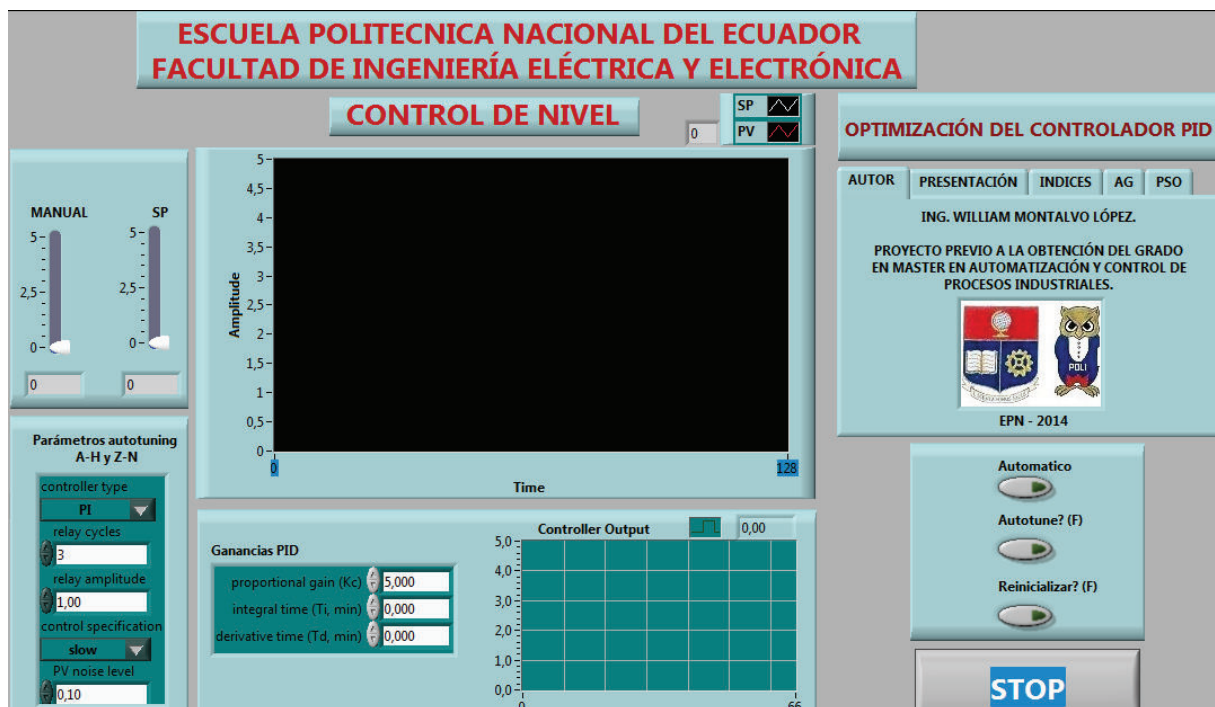


Figura 3-40. Panel Frontal del Controlador PID Auto-sintonizable.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los modelos y valores experimentales obtenidos, para realizar el estudio comparativo de las técnicas de sintonía de la acción PID y poder determinar su Comportamiento Colectivo en los Sistemas Pertencientes a Procesos Estudiados en el CERFIN-SECAP.

4.2. MODELO DE LA PLANTA

4.2.1. NIVEL

Mediante el módulo de entradas análogas del PAC y el Tool Kit de Generación de Reportes de LabVIEW, se tomaron 2000 muestras del sistema (el programa se muestra en el Anexo 4).

Se utilizaron señales de entrada del tipo pseudo aleatorias, con la amplitud máxima del Set Point (SP) del proceso, obteniendo una respuesta (PV) como lo muestra la Figura 4-1.

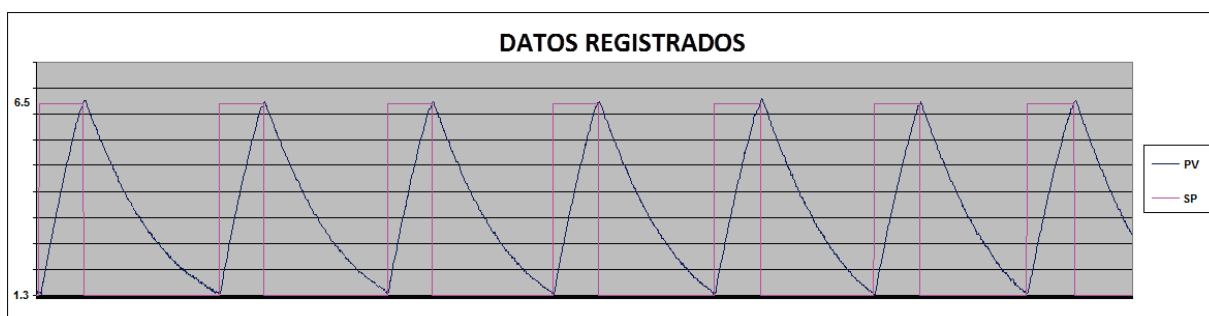


Figura 4-1. Datos registrados del sistema de Nivel.

En el proceso de muestreo, las señales de entradas y salidas fueron registradas en dos archivos *.lvm y *.xlsx. La Figura 4-2 muestra un ensayo en el proceso de nivel, visualizando con la pantalla el programa de adquisición de datos realizado en LabVIEW (el Anexo 3 muestra el programa en diagrama de bloques) y el resultado del registro en un archivo *.xlsx.

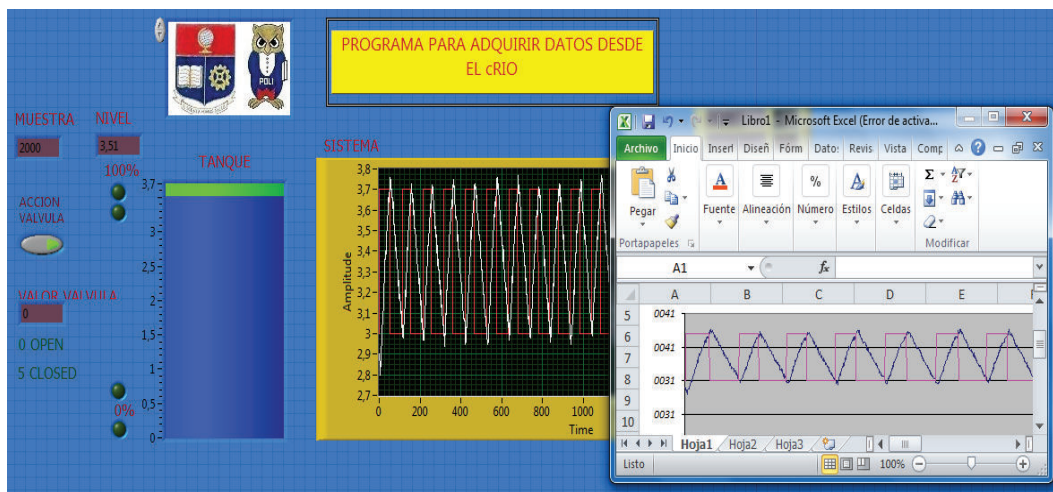


Figura 4-2. Panel frontal en LabVIEW del programa de Adquisición de Datos

Se utilizó el SI Model Estimation Express VI de LabVIEW para obtener varios modelos y ver cuál de ellos se ajusta mejor a la respuesta del sistema.

Para la obtención y validación del modelo se utilizó tres criterios, los cuales fueron:

- Equivalencia gráfica: Se compara la salida del sistema real con la respuesta del modelo del sistema, como se muestra en la Figura 4-3.

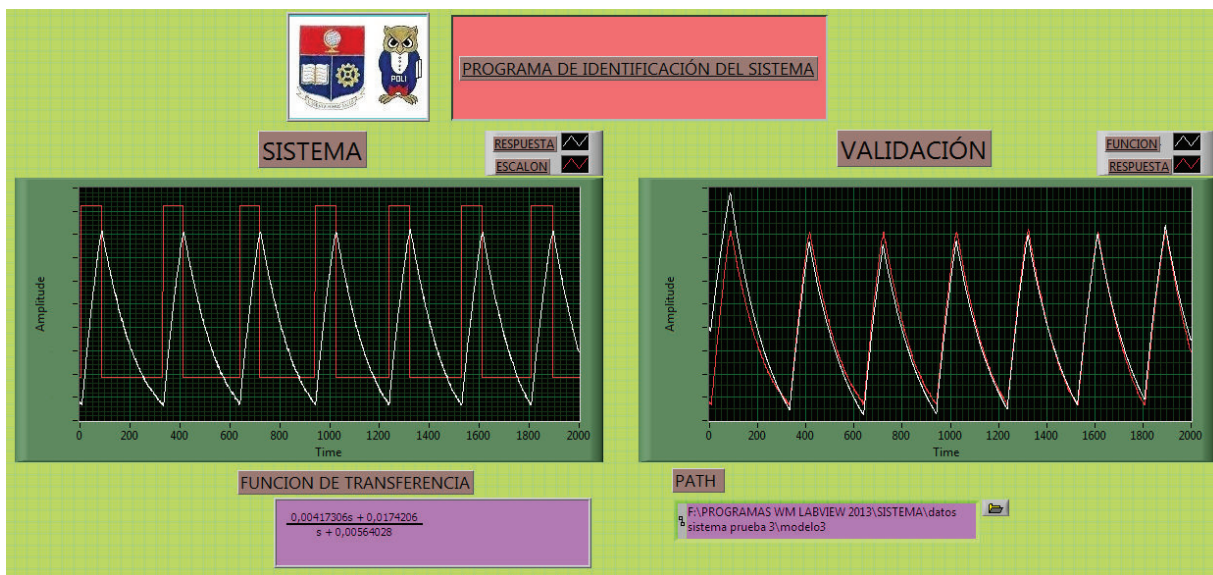


Figura 4-3. Identificación del sistema de nivel y validación del modelo ARX

Obteniendo el mejor resultado con un modelo ARX, con la función de transferencia mostrada en la Figura 4-3.

$$G_{PLANTA-NIVEL} = \frac{0.00417306s + 0.0174206}{s + 0.00564028}$$

- Ganancia estática del modelo: Definida como constante de error de posición estática o ganancia estática K , es determinable como el cociente entre la amplitud de la respuesta del sistema en régimen estacionario y la amplitud del escalón de entrada al mismo. Se obtiene haciendo $S = 0$, en la función de transferencia [31]. Dando un valor de:

$$K_{PLANTA-NIVEL} = 3.089$$

Ganancia de los datos registrados en el experimento real de modelación: 3.076. (Ver Figura 4-4).



Figura 4-4. Ganancia de los datos reales registrados en el proceso de Nivel

Donde de 1.3 a 6.5 unidades, es el valor de la amplitud escalón ingresada a la planta y 4 a 20 mili amperios (mA) son los valores de corriente que entrega el transmisor de Nivel.

Se muestra entonces que las dos ganancias estáticas K , son semejantes (con un error del 1.3%) y coherentes a la **respuesta real** del sistema.

- Validación del modelo con respecto al propósito del modelado: Esta última validación consiste en verificar si el problema que motivó el modelado puede ser resuelto usando el modelo obtenido. Es decir, si el controlador PID - PSO diseñado para el proceso de **Nivel** en base al modelo hallado exhibe una satisfactoria respuesta desde el punto de vista del control, entonces el modelo será "válido", independientemente de los aspectos formales que esto implique.

4.2.2. FLUJO

Mediante el módulo de entradas análogas del PAC y el Tool Kit de Generación de Reportes de LabVIEW, se tomaron 1000 muestras del sistema.

Se utilizaron señales de entrada del tipo pseudo aleatorias, con la amplitud máxima del Set Point (SP) del proceso, obteniendo una respuesta (PV) como lo muestra la

Figura 4-5. Las señales de entradas y salidas fueron muestreadas cada 0.25 segundos y registradas en dos archivos *.lvm y *.xlsx.

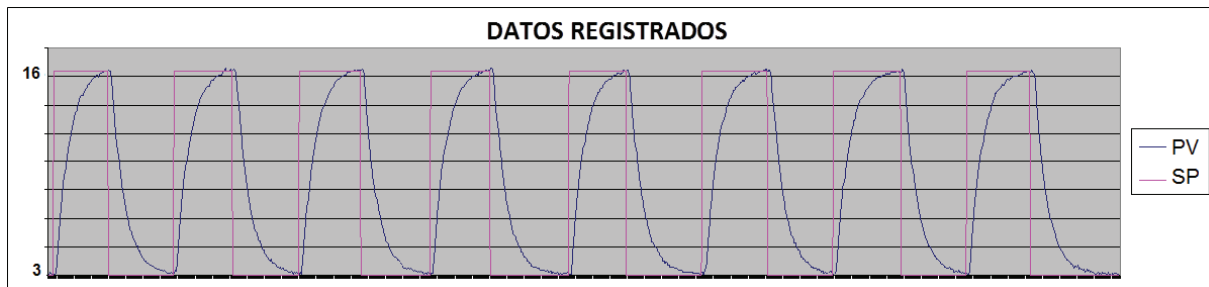


Figura 4-5. Datos registrados del sistema de Flujo.

Para la obtención y validación del modelo se utilizó tres criterios, los cuales fueron:

- Equivalencia gráfica: Se compara la salida del sistema real con la respuesta del modelo del sistema, como se muestra en la Figura 4-6.

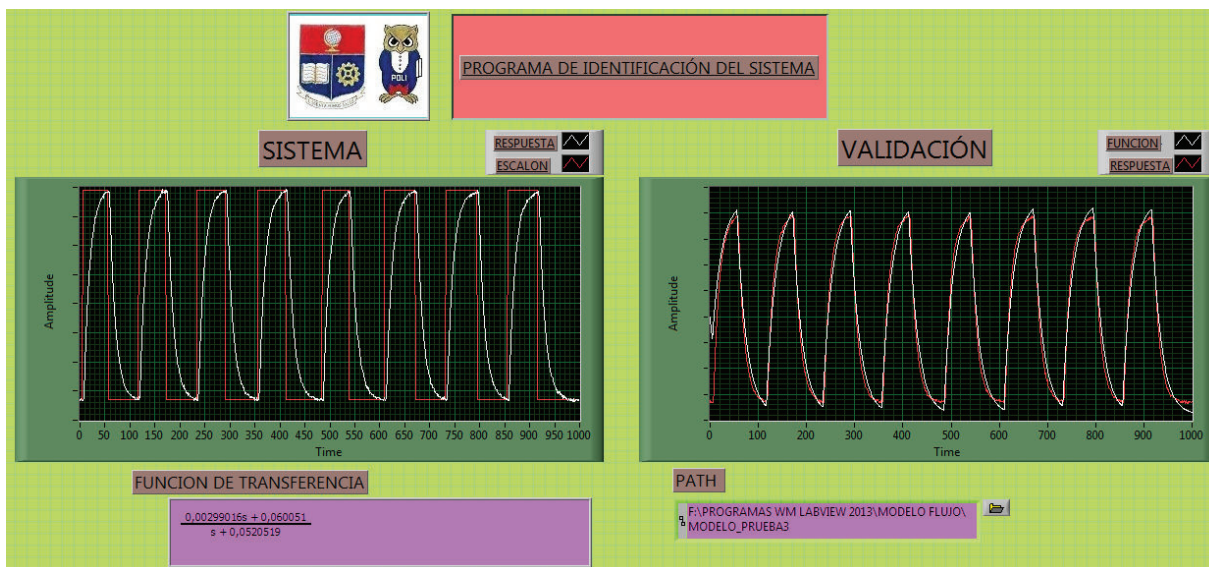


Figura 4-6. Identificación del sistema de flujo y validación del modelo ARX

Obteniendo el mejor resultado con un modelo ARX, con la función de transferencia mostrada en la Figura 4-6.

$$G_{PLANTA-FLUJO} = \frac{0.00299016S + 0.060051}{S + 0.0520519}$$

- Ganancia estática del modelo: Definida como constante de error de posición estática o ganancia estática K , es determinable como el cociente entre la amplitud de la respuesta del sistema en régimen estacionario y la amplitud del escalón de entrada al mismo. Se obtiene haciendo $S = 0$, en la función de transferencia [31]. Dando un valor de:

$$K_{PLANTA-FLUJO} = 1.154$$

Ganancia de los datos registrados en el experimento real de modelación: 1.25 (ver Figura 4-7).

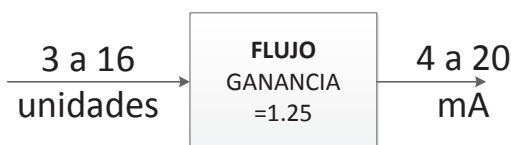


Figura 4-7. Ganancia de los datos reales registrados en el proceso de Flujo

Donde de 3 a 16 unidades, es el valor de la amplitud escalón ingresada a la planta y 4 a 20 mili amperios (mA) son los valores de corriente que entrega el transmisor de Flujo.

Se muestra entonces que las dos ganancias estáticas K , son semejantes (con error del 9.6 %) y coherentes a la **respuesta real** del sistema.

- Validación del modelo con respecto al propósito del modelado: Esta última validación consiste en verificar si el problema que motivó el modelado puede ser resuelto usando el modelo obtenido. Es decir, si el controlador PID - PSO diseñado para el proceso de **Flujo** en base al modelo hallado exhibe una

satisfactoria respuesta desde el punto de vista del control, entonces el modelo será “válido”, independientemente de los aspectos formales que esto implique.

4.2.3. PRESIÓN

Mediante el módulo de entradas análogas del PAC y el Tool Kit de Generación de Reportes de LabVIEW, se tomaron 1100 muestras del sistema.

Se utilizaron señales de entrada del tipo pseudo aleatorias, con la amplitud máxima del Set Point (SP) del proceso, obteniendo una respuesta (PV) como lo muestra la Figura 4-8.

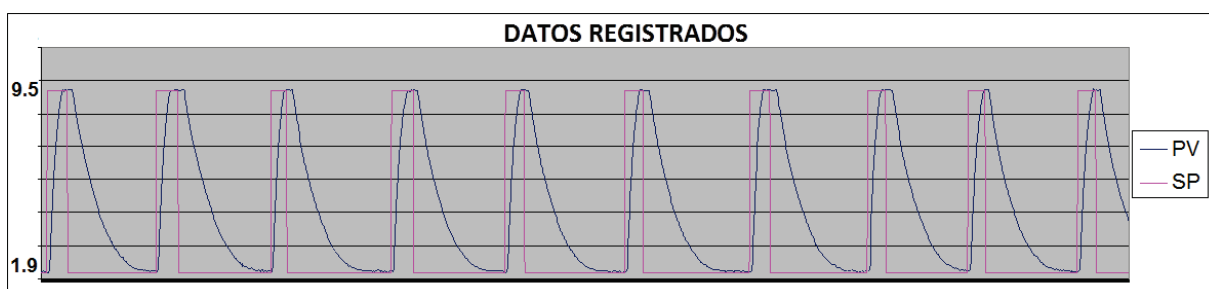


Figura 4-8. Datos registrados del sistema de Presión

Las señales de entradas y salidas fueron muestreadas cada 0.25 segundos y registradas en dos archivos *.lvm y *.xlsx.

Para la obtención y validación del modelo se utilizó tres criterios, los cuales fueron:

- Equivalencia gráfica: Se compara la salida del sistema real con la respuesta del modelo del sistema, como se muestra en la Figura 4-9.

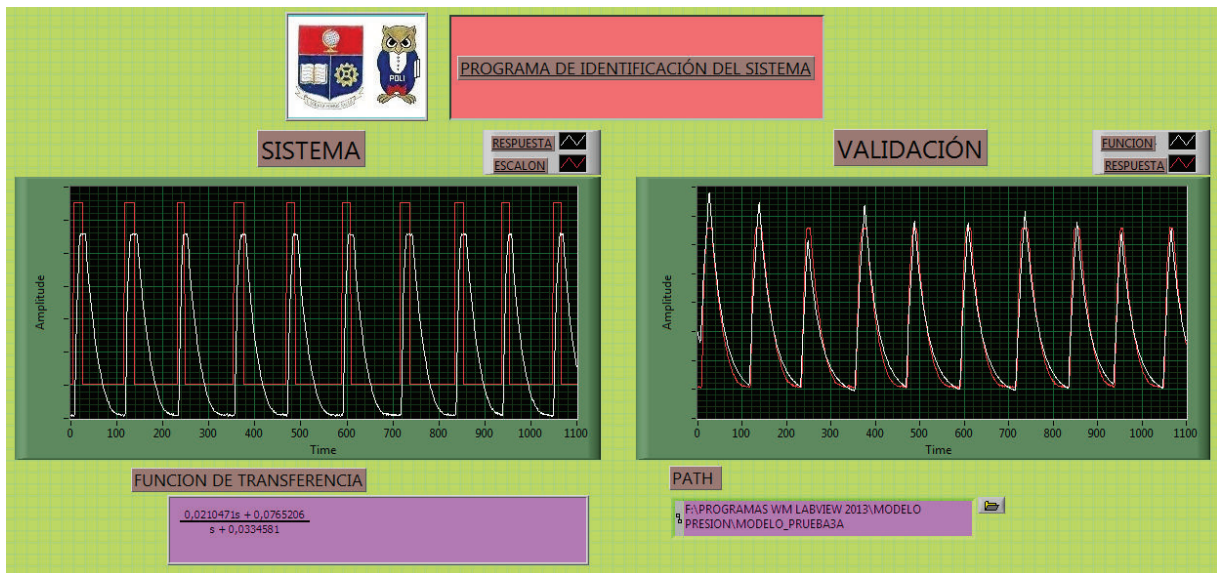


Figura 4-9. Identificación del sistema de presión y validación del modelo ARX

Obteniendo el mejor resultado con un modelo ARX, con la función de transferencia mostrada en la Figura 4-9.

$$G_{PLANTA-PRESIÓN} = \frac{0.0210471S + 0.0765206}{S + 0.0334581}$$

- Ganancia estática del modelo: Definida como constante de error de posición estática o ganancia estática K , es determinable como el cociente entre la amplitud de la respuesta del sistema en régimen estacionario y la amplitud del escalón de entrada al mismo. Se obtiene haciendo $S = 0$, en la función de transferencia [31]. Dando un valor de:

$$K_{PLANTA-PRESIÓN} = 2.287$$

Ganancia de los datos registrados en el experimento real de modelación: 2.1 (ver Figura 4-10).

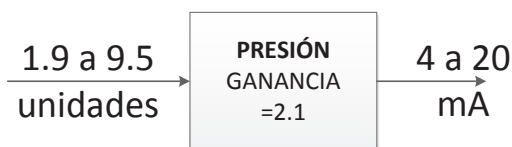


Figura 4-10. Ganancia de los datos reales registrados en el proceso de Presión

Donde de 1.9 a 9.5 unidades, es el valor de la amplitud escalón ingresada a la planta y 4 a 20 mili amperios (mA) son los valores de corriente que entrega el transmisor de Presión.

Se muestra entonces que las dos ganancias estáticas K , son semejantes (con un error del 18.7 %) y coherentes a la **respuesta real** del sistema.

- Validación del modelo con respecto al propósito del modelado: Esta última validación consiste en verificar si el problema que motivó el modelado puede ser resuelto usando el modelo obtenido. Es decir, si el controlador PID - PSO diseñado para el proceso de **Presión** en base al modelo hallado exhibe una satisfactoria respuesta desde el punto de vista del control, entonces el modelo será “válido”, independientemente de los aspectos formales que esto implique.

4.3. AJUSTE EXPERIMENTAL DE PARAMETROS DE ALGORITMOS GENÉTICOS

El criterio que se utilizó para el ajuste de los parámetros, fue el “número de interacciones” para la convergencia del algoritmo, pues se precisa que el mismo sea el más corto posible en un proceso.

Para ello se realizaron pruebas “fuera de línea” con una función objetivo que interactúa con el modelo del sistema (Figura 4-11) y con el Toolbox de Optimización de Matlab (Figura 4-12).

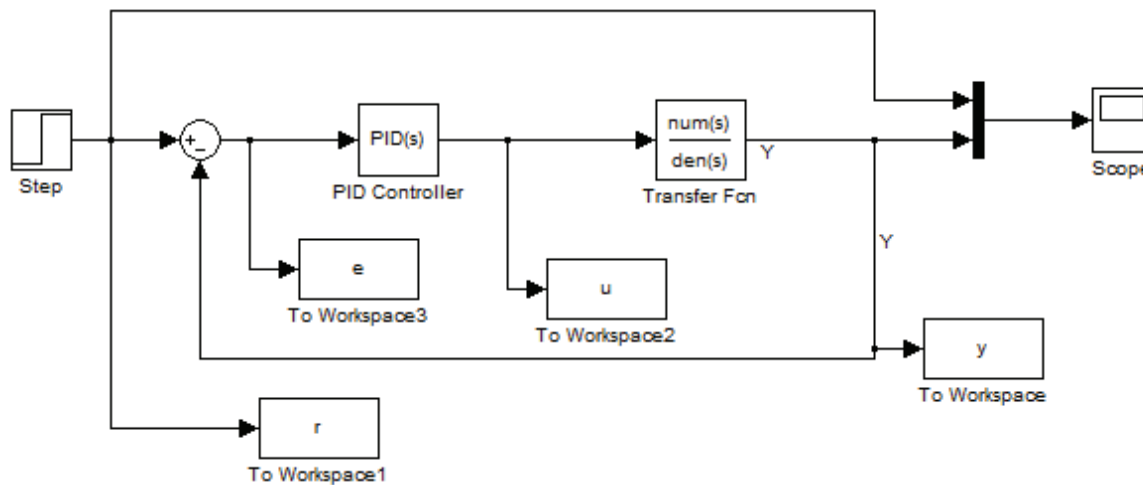


Figura 4-11. Modelo “SISTEMA.mdl” en SIMULINK

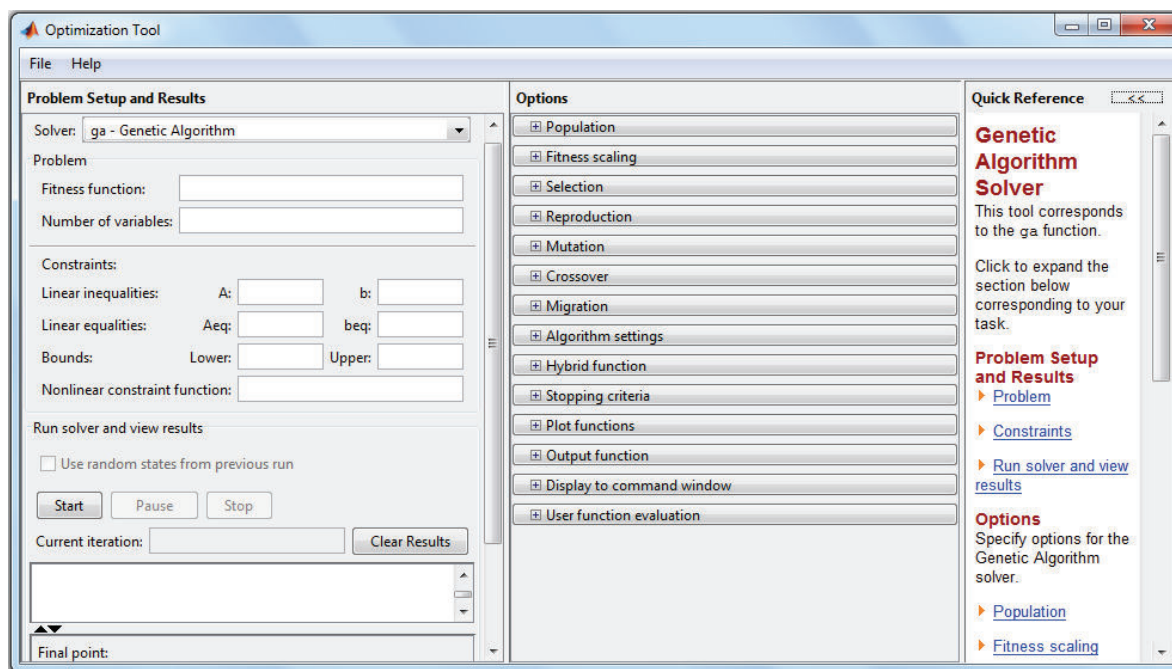


Figura 4-12. Tool de Optimizacion de Matlab, seteado en “ga – Genetic Algorithm”.

El Algoritmo Genético, trabaja con una función objetivo creado en Matlab, el cual se llama “fitness_off_line.m”, de tal manera como se muestra en la Figura 4-13.

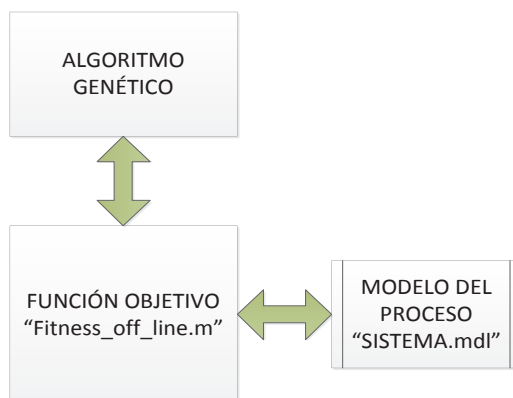


Figura 4-13. Interacción en Matlab del Algoritmo Genético con la Función Objetivo.

En forma inicial se trabajó con los valores por defecto de los parámetros del Algoritmo Genético, que viene en el Optimization Tool, obteniendo largas interacciones (mayores a 50), hasta conseguir la convergencia del algoritmo.

En forma experimental se dedujo que los parámetros principales que disminuyen el tiempo de obtención son el Tamaño de la población y el número de generaciones, como lo muestran las figuras 4-14 y 4-15.

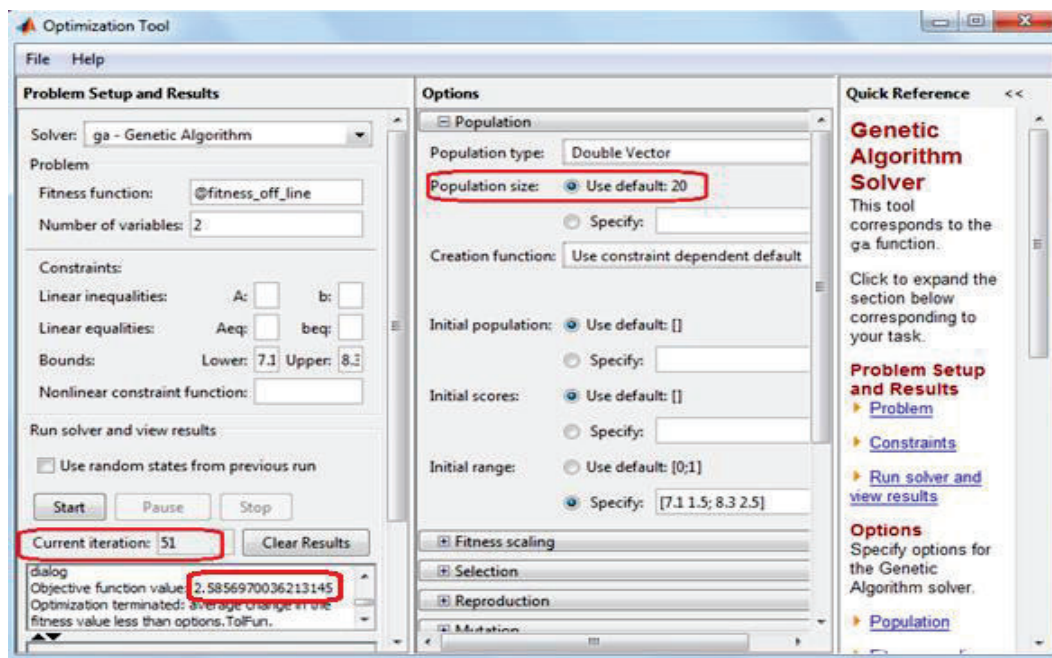


Figura 4-14. Tamaño de población size por defecto del "Optimization Tool"

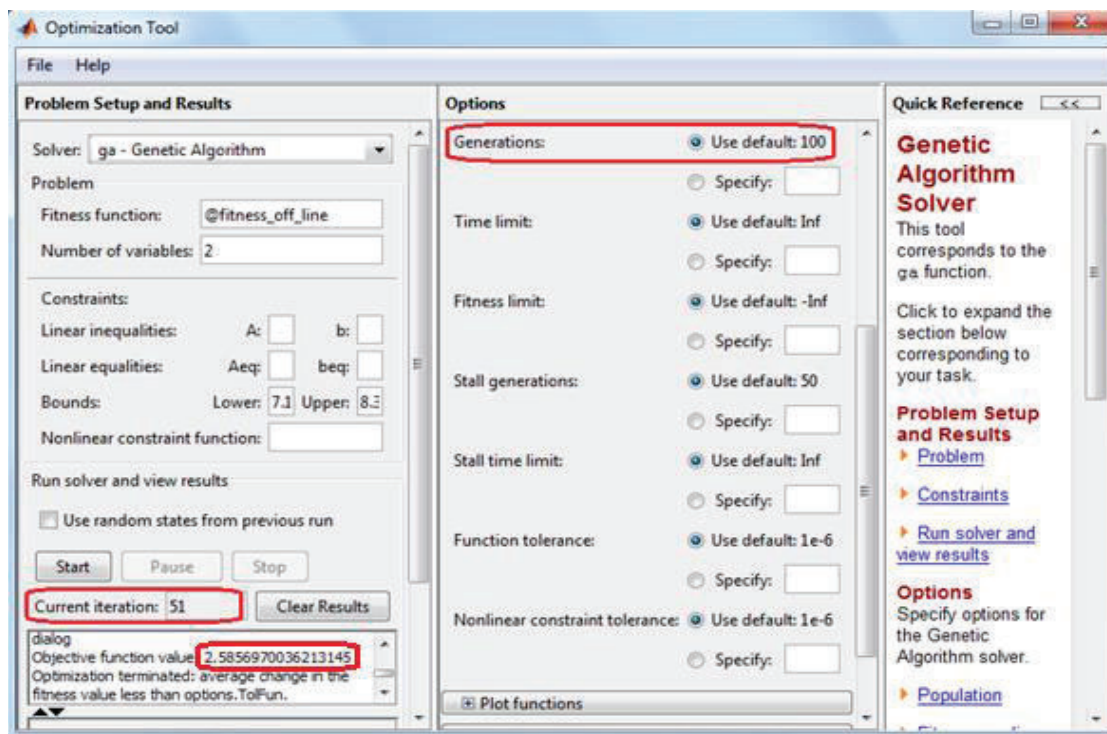


Figura 4-15. Generaciones por defecto del “Optimization Tool”.

El procedimiento para lograr los parámetros adecuados, sin afectar en demasía el puntaje o valor de la función objetivo (el mejor puntaje es el menor), se muestra en el siguiente diagrama de flujo (Figura 4-16)

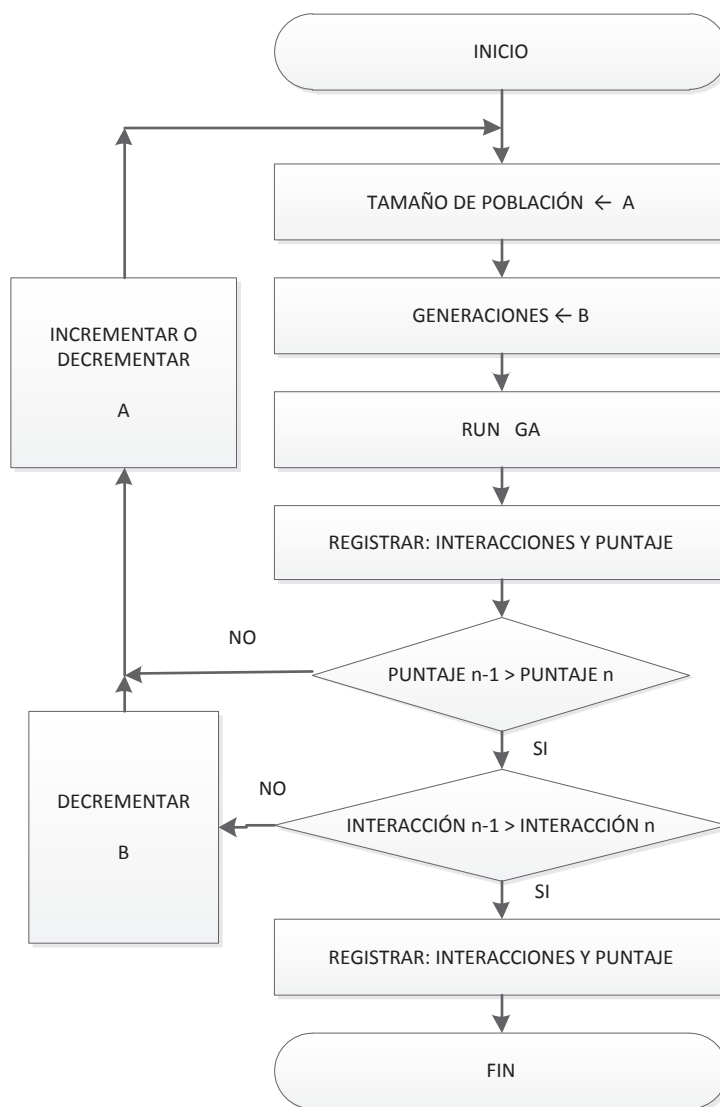


Figura 4-16. Obtención experimental de los parámetros de ajuste del tamaño de población y de generaciones de un Algoritmo Genético.

Obteniendo valores de puntaje casi iguales, con valores de Population size = 3 y Generations = 8, como se muestra en las Figuras 4-17 y 4-18.

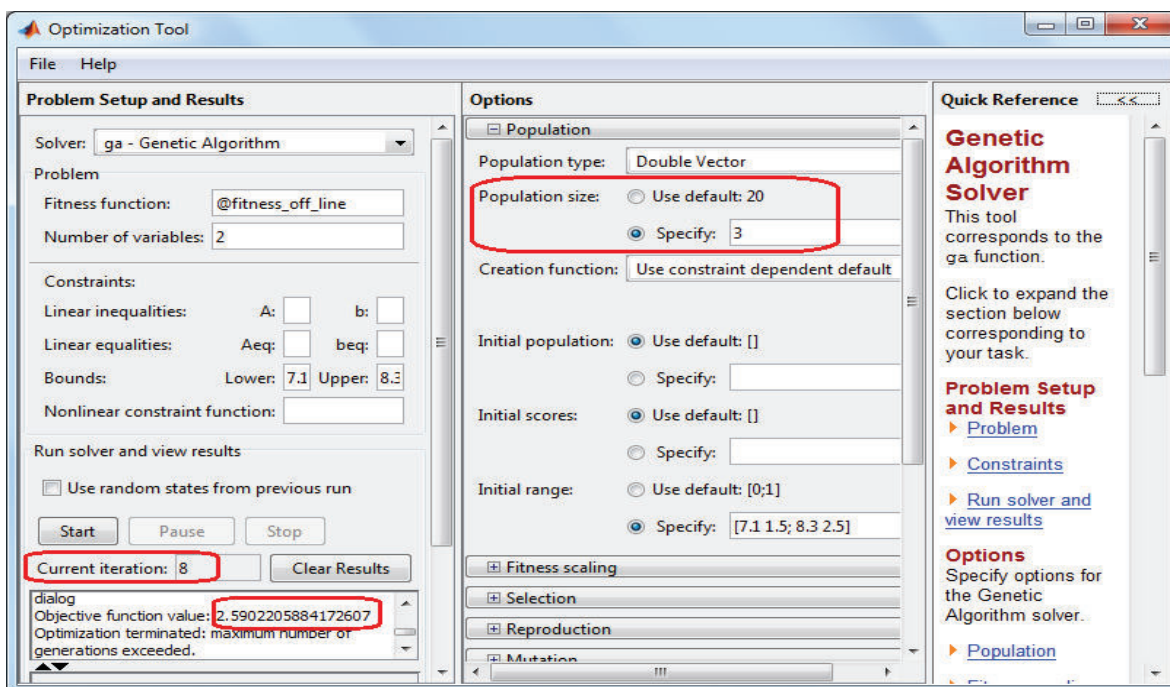


Figura 4-17. Tamaño de población especificada en el “Optimization Tool”.

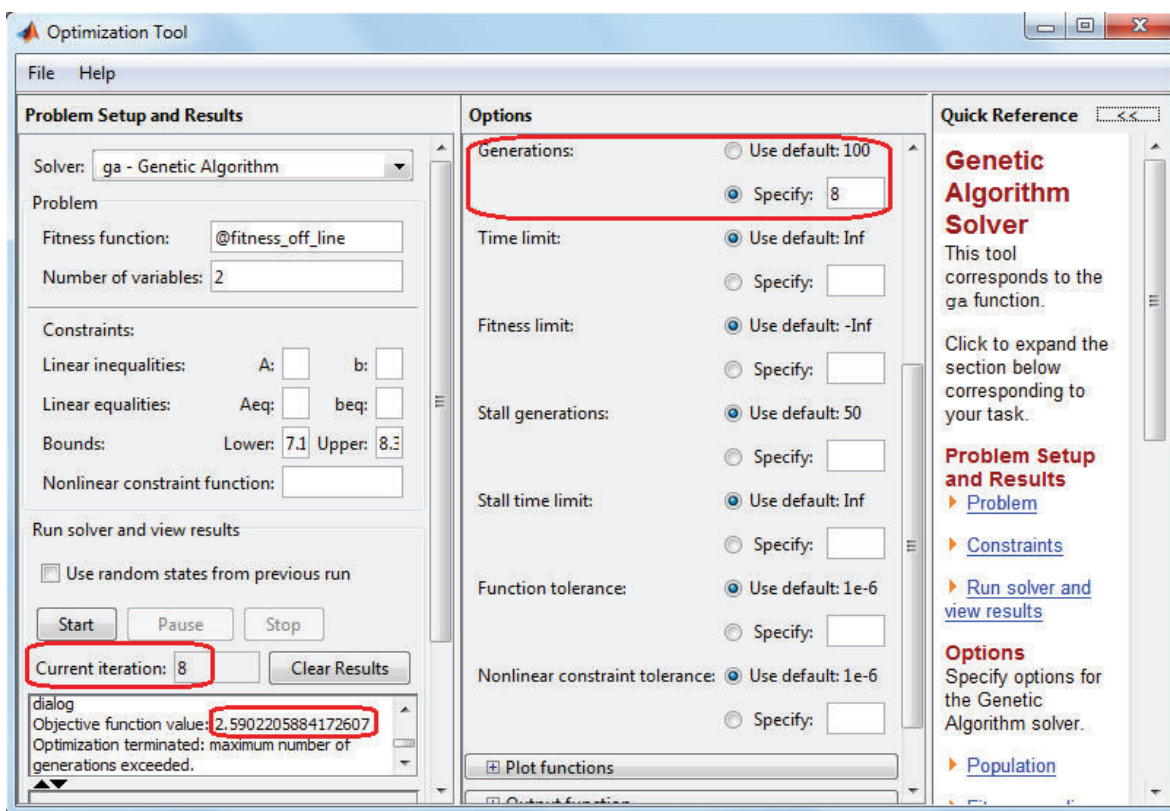


Figura 4-18. Generaciones especificadas en el “Optimization Tool”.

De lo antes mostrado, con los valores especificados se logró disminuir aproximadamente seis veces el número de interacciones y por tanto el tiempo de convergencia del Algoritmo Genético.

La función objetivo “fitness_off_line.m”, está disponible en código abierto y puede ser utilizado desde el directorio raíz del DVD que se presenta como aporte y estudio junto con este trabajo.

4.4. ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE CONTROLADORES Z-N Y PSO, EN BASE AL ERROR ABSOLUTO – IAE

Las siguientes tablas demuestran mediante el Test de Wilcoxon, si el IAE del Método de Ziegler y Nichols es igual o diferente del IAE del Método de Enjambre de Partículas.

Tomando en cuenta que si:

- a. Si el IAE $_{Z-N}$ es igual al IAE $_{PSO}$, no se lograría ningún tipo de optimización.
- b. Si el IAE $_{Z-N}$ es mayor al IAE $_{PSO}$, se estaría demostrando que se ha optimizado el controlador PID, pues se ha disminuido la pérdida de energía en el sistema.
- c. Si el IAE $_{Z-N}$ es menor al IAE $_{PSO}$, se estaría empeorando el sistema, ya que no habría ninguna disminución de energía, sino, un incremento de la misma.

El test de Wilcoxon es el recomendado para muestras (n) pequeñas mayores a 25.

4.4.1. TEST DE WILCOXON DEL PROCESO DE NIVEL Z-N Vs PSO

A continuación se presentan los datos obtenidos para el Test de Wilcoxon del proceso de control de nivel.

Tabla 4-1. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE NIVEL									
HIPÓTESIS		Principal (Ho): $IAE_{Z-N} = IAE_{PSO}$					Media(IAE_{Z-N})=Media(IAE_{PSO})		
		Alternativa (Ha): $IAE_{Z-N} > IAE_{PSO}$					Media(IAE_{Z-N})>Media(IAE_{PSO})		
n	IAE Z-N	IAE PSO	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
1	11,163	10,944	0,219	32	32			0,084	1
2	11,189	11,002	0,187	24	24			0,085	2
3	11,278	11,124	0,154	12	12			0,116	3
4	11,095	10,893	0,202	30	30			0,118	4
5	11,268	11,149	0,118	4	4			0,125	5
6	11,270	11,185	0,084	1	1			0,132	6
7	11,231	11,087	0,144	10	10			0,135	7
8	11,192	11,047	0,145	11	11			0,138	8
9	11,119	10,930	0,189	26	26			0,139	9
10	11,092	10,851	0,241	34	34			0,144	10
11	11,294	11,159	0,135	7	7			0,145	11
12	11,110	10,867	0,243	35	35			0,154	12
13	11,264	11,093	0,170	18	18			0,158	13
14	11,237	11,045	0,192	27	27			0,160	14
15	11,069	10,842	0,227	33	33			0,162	15
16	11,178	10,996	0,182	21	21			0,164	16
17	11,224	11,010	0,214	31	31			0,166	17
18	11,237	11,152	0,085	2	2			0,170	18

Continuación Tabla 4-1. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE NIVEL										
HIPÓTESIS		Principal (Ho): $IAE_{Z-N} = IAE_{PSO}$					Media (IAE_{Z-N})= Media (IAE_{PSO})			
		Alternativa (Ha): $IAE_{Z-N} > IAE_{PSO}$					Media (IAE_{Z-N})> Media (IAE_{PSO})			
n	IAE Z-N	IAE PSO	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN	
19	11,264	11,106	0,158	13	13			0,172	19	
20	11,250	11,118	0,132	6	6			0,181	20	
21	11,112	10,973	0,139	9	9			0,182	21	
22	11,221	11,035	0,185	23	23			0,184	22	
23	11,144	11,020	0,125	5	5			0,185	23	
24	11,139	10,979	0,160	14	14			0,187	24	
25	11,180	10,991	0,189	26	26		26	0,189	25	
26	11,219	11,047	0,172	19	19		26	0,189	26	
27	11,267	11,151	0,116	3	3			0,192	27	
28	11,185	10,988	0,198	29	29			0,194	28	
29	11,199	11,037	0,162	15	15			0,198	29	
30	11,267	11,101	0,166	17	17			0,202	30	
31	11,185	10,991	0,194	28	28			0,214	31	
32	11,156	10,972	0,184	22	22			0,219	32	
33	11,133	10,952	0,181	20	20			0,227	33	
34	11,199	11,061	0,138	8	8			0,241	34	
35	11,245	11,080	0,164	16	16			0,243	35	

Análisis estadístico: Siguiendo el procedimiento de Wilcoxon, las muestras son analizadas, arrojando los siguientes valores:

Tabla 4-2. Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.

Total T+		631
Total T-		0
T=min(T+,T-)		631
$Z = \frac{T - n \frac{(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$		5,17580918
Nivel de Confianza del 95 % (Za)		1,96
Decisión	Z ≤ Za	Se acepta la Ho
	Z > Za	Se acepta la Ha
Interpretación		Como el IAE del método por Z-N, es mayor al IAE del método por PSO, se concluye que el PID PSO es mejor en el proceso de control de Nivel, pues logra disminuir pérdida de energía en el sistema.

4.4.2. TEST DE WILCOXON PROCESO DE FLUJO Z-N Vs PSO.

A continuación se presentan los datos obtenidos para el Test de Wilcoxon del proceso de control de Flujo.

Tabla 4-3. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE FLUJO									
HIPÓTESIS		Principal (Ho): IAE Z-N = IAE PSO					Media(IAE Z-N)=Media(IAE PSO)		
		Alternativa (Ha): IAE Z-N > IAE PSO					Media(IAE Z-N)>Media(IAE PSO)		
n	IAE Z-N	IAE PSO	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
1	20,355	19,310	1,045	19	19			0,281	1
2	20,164	19,146	1,018	17	17			0,495	2
3	20,209	19,542	0,667	8	8			0,535	3
4	20,187	18,910	1,278	26	26			0,560	4
5	20,267	18,921	1,346	27	27			0,644	5
6	20,223	19,727	0,495	2	2			0,651	6
7	20,173	19,188	0,985	15	15			0,657	7
8	20,291	18,845	1,446	30	30			0,667	8
9	20,176	18,921	1,254	23	23			0,700	9
10	20,202	18,780	1,422	28	28			0,758	10
11	20,374	19,840	0,535	3	3			0,832	11
12	20,343	19,070	1,273	25	25			0,974	12
13	20,433	19,782	0,651	6	6		14	0,980	13
14	20,428	19,596	0,832	11	11		14	0,980	14
15	20,249	19,269	0,980	14	14			0,985	15
16	20,325	19,567	0,758	10	10		17	1,018	16
17	20,364	18,898	1,466	31	31		17	1,018	17
18	20,201	18,414	1,787	35	35			1,036	18

Continuación Tabla 4-3. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE FLUJO									
HIPÓTESIS		Principal (Ho): IAE_{Z-N} = IAE_{PSO}					Media(IAE_{Z-N})=Media(IAE_{PSO})		
		Alternativa (Ha): IAE_{Z-N} > IAE_{PSO}					Media(IAE_{Z-N})>Media(IAE_{PSO})		
n	IAE_{Z-N}	IAE_{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
19	20,349	19,313	1,036	18	18			1,045	19
20	20,205	19,923	0,281	1	1			1,117	20
21	20,351	19,377	0,974	12	12			1,122	21
22	20,264	19,246	1,018	17	17			1,146	22
23	20,277	19,298	0,980	14	14			1,254	23
24	20,272	19,628	0,644	5	5			1,261	24
25	20,262	19,562	0,700	9	9			1,273	25
26	20,346	18,701	1,645	33	33			1,278	26
27	20,259	18,998	1,261	24	24			1,346	27
28	20,278	19,156	1,122	21	21			1,422	28
29	20,304	19,648	0,657	7	7			1,424	29
30	20,254	19,694	0,560	4	4			1,446	30
31	20,312	19,195	1,117	20	20			1,466	31
32	20,318	18,636	1,681	34	34			1,470	32
33	20,272	18,848	1,424	29	29			1,645	33
34	20,256	19,110	1,146	22	22			1,681	34
35	20,364	18,894	1,470	32	32			1,787	35

Análisis estadístico: Siguiendo el procedimiento de Wilcoxon, las muestras son analizadas, arrojando los siguientes valores:

Tabla 4-4. Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.

Total T+		632
Total T-		0
T=min(T+,T-)		632
$Z = \frac{T - n \frac{(n + 1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n + 1)(2n + 1)}{24}}}$		5,192188323
Nivel de Confianza del 95 % (Za)		1,96
Decisión	Z ≤ Za	Se acepta la Ho
	Z > Za	Se acepta la Ha
Interpretación		Como el IAE del método por Z-N, es mayor al IAE del método por PSO, se concluye que el PID PSO es mejor en el proceso de control de Flujo, pues logra disminuir pérdida de energía en el sistema.

4.4.3. TEST DE WILCOXON PROCESO DE PRESIÓN Z-N Vs PSO

A continuación se presentan los datos obtenidos para el Test de Wilcoxon del proceso de control de Presión.

Tabla 4-5. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE PRESIÓN									
HIPÓTESIS		Principal (Ho): IAE Z-N = IAE PSO					Media(IAE Z-N)=Media(IAE PSO)		
		Alternativa (Ha): IAE Z-N > IAE PSO					Media(IAE Z-N)>Media(IAE PSO)		
n	IAE Z-N	IAE PSO	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
1	11,362	11,231	0,130	28	28			0,063	1
2	11,375	11,249	0,125	27	27			0,065	2
3	11,374	11,233	0,142	32	32			0,068	3
4	11,343	11,280	0,063	1	1		5	0,070	4
5	11,344	11,262	0,083	12	12		5	0,070	5
6	11,345	11,277	0,068	3	3		7	0,072	6
7	11,360	11,295	0,065	2	2		7	0,072	7
8	11,371	11,257	0,114	21	21			0,073	8
9	11,384	11,279	0,105	14	14		10	0,077	9
10	11,372	11,302	0,070	5	5		10	0,077	10
11	11,380	11,273	0,107	17	17			0,080	11
12	11,391	11,231	0,160	35	35			0,083	12
13	11,381	11,258	0,123	26	26			0,093	13
14	11,380	11,265	0,115	22	22			0,105	14
15	11,362	11,269	0,093	13	13			0,106	15
16	11,383	11,247	0,136	31	31		17	0,107	16
17	11,362	11,256	0,106	15	15		17	0,107	17
18	11,395	11,235	0,160	35	35			0,108	18

Continuación Tabla 4-5. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE PRESIÓN									
HIPÓTESIS		Principal (Ho): IAE_{Z-N} = IAE_{PSO}					Media(IAE_{Z-N})=Media(IAE_{PSO})		
		Alternativa (Ha): IAE_{Z-N} > IAE_{PSO}					Media(IAE_{Z-N})>Media(IAE_{PSO})		
n	IAE_{Z-N}	IAE_{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
19	11,362	11,290	0,072	7	7			0,112	19
20	11,395	11,252	0,143	33	33		21	0,114	20
21	11,324	11,247	0,077	10	10		21	0,114	21
22	11,349	11,277	0,072	7	7			0,115	22
23	11,350	11,278	0,073	8	8			0,116	23
24	11,342	11,233	0,108	18	18		25	0,118	24
25	11,349	11,269	0,080	11	11		25	0,118	25
26	11,365	11,251	0,114	21	21			0,123	26
27	11,347	11,277	0,070	5	5			0,125	27
28	11,362	11,226	0,136	31	31			0,130	28
29	11,352	11,234	0,118	25	25			0,132	29
30	11,348	11,271	0,077	10	10		31	0,136	30
31	11,374	11,266	0,107	17	17		31	0,136	31
32	11,350	11,235	0,116	23	23			0,142	32
33	11,376	11,244	0,132	29	29			0,143	33
34	11,348	11,236	0,112	19	19		35	0,160	34
35	11,354	11,236	0,118	25	25		35	0,160	35

Análisis estadístico: Siguiendo el procedimiento de Wilcoxon, las muestras son analizadas, arrojando los siguientes valores:

Tabla 4-6. Análisis del Test de Wilcoxon Z-N Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.

Total T+		638
Total T-		0
T=min(T+,T-)		638
$Z = \frac{T - n \frac{(n + 1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n + 1)(2n + 1)}{24}}}$		5,290463181
Nivel de Confianza del 95 % (Za)		1,96
Decisión	Z ≤ Za	Se acepta la Ho
	Z > Za	Se acepta la Ha
Interpretación		Como el IAE del método por Z-N, es mayor al IAE del método por PSO, se concluye que el PID PSO es mejor en el proceso de control de Presión, pues logra disminuir pérdida de energía en el sistema.

4.5. TEST DEL DESEMPEÑO DE CONTROLADORES GA Y PSO, EN BASE AL ERROR ABSOLUTO – IAE

Las siguientes tablas demuestran mediante un Test no paramétrico, si el IAE del Método de Algoritmos Genéticos es igual o diferente del IAE del Método de Enjambre de Partículas.

Tomando en cuenta que si:

- a. Si el IAE_{GA} es igual al IAE_{PSO}, no existiría diferencia en la optimización de los dos métodos.
- b. Si el IAE_{GA} es mayor al IAE_{PSO}, se estaría demostrando que se ha optimizado el controlador PID mejor por PSO, pues se ha disminuido la pérdida de energía en el sistema.
- c. Si el IAE_{GA} es menor al IAE_{PSO}, se estaría demostrando que se ha optimizado el controlador PID mejor por GA, pues se ha disminuido la pérdida de energía en el sistema.

El test no paramétrico utilizado, es el de Wilcoxon, y es el recomendado para muestras (n) pequeñas mayores a 25.

4.5.1. TEST DE WILCOXON PROCESO DE NIVEL GA Vs PSO

A continuación se presentan los datos obtenidos para el Test de Wilcoxon del proceso de control de Nivel.

Tabla 4-7. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE NIVEL									
HIPÓTESIS		Principal (H ₀): IAE _{GA} = IAE _{PSO}					Media(IAE _{GA})=Media(IAE _{PSO})		
		Alternativa (H _a): IAE _{GA} > IAE _{PSO}					Media(IAE _{GA})>Media(IAE _{PSO})		
n	IAE _{GA}	IAE _{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
1	10,981	10,944	0,037	8	8			0,008	1
2	11,074	11,002	0,072	25	25			0,013	2
3	11,237	11,124	0,114	27	27			0,016	3
4	11,222	10,893	0,329	35	35			0,018	4
5	11,136	11,149	-0,013	2		2		0,021	5
6	11,239	11,185	0,054	18	18			0,032	6
7	11,158	11,087	0,071	23	23			0,035	7
8	11,039	11,047	-0,008	1		1		0,037	8
9	10,962	10,930	0,032	6	6		10	0,039	9
10	10,866	10,851	0,016	3	3		10	0,039	10
11	11,261	11,159	0,102	26	26			0,042	11
12	10,928	10,867	0,062	20	20			0,046	12
13	11,330	11,093	0,237	33	33			0,047	13
14	11,091	11,045	0,046	12	12			0,049	14
15	10,893	10,842	0,051	16	16			0,050	15
16	11,239	10,996	0,242	34	34			0,051	16
17	11,142	11,010	0,132	28	28		18	0,054	17
18	11,206	11,152	0,054	18	28		18	0,054	18

Continuación Tabla 4-7. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE NIVEL										
HIPÓTESIS		Principal (Ho): $IAE_{GA} = IAE_{PSO}$					Media (IAE_{GA})= Media (IAE_{PSO})			
		Alternativa (Ha): $IAE_{GA} > IAE_{PSO}$					Media (IAE_{GA})> Media (IAE_{PSO})			
n	IAE_{GA}	IAE_{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN	
19	11,296	11,106	0,190	30	30			0,056	19	
20	11,272	11,118	0,155	29	29			0,062	20	
21	11,210	10,973	0,237	33	33		22	0,066	21	
22	11,053	11,035	0,018	4	4		22	0,066	22	
23	11,085	11,020	0,066	22	22			0,071	23	
24	10,937	10,979	-0,042	11		11	25	0,072	24	
25	11,042	10,991	0,050	15	15		25	0,072	25	
26	11,103	11,047	0,056	19	19			0,102	26	
27	11,222	11,151	0,072	25	25			0,114	27	
28	11,036	10,988	0,049	14	14			0,132	28	
29	11,262	11,037	0,225	31	31			0,155	29	
30	11,167	11,101	0,066	22	22			0,190	30	
31	11,012	10,991	0,021	5	5			0,225	31	
32	10,933	10,972	-0,039	10		10	33	0,237	32	
33	10,917	10,952	-0,035	7		7	33	0,237	33	
34	11,100	11,061	0,039	10	10			0,242	34	
35	11,127	11,080	0,047	13	13			0,329	35	

Análisis estadístico: Siguiendo el procedimiento de Wilcoxon, las muestras son analizadas, arrojando los siguientes valores:

Tabla 4-8. Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Nivel.

Total T+		614	
Total T-		31	
T=min(T+,T-)		31	
$Z = \frac{T - n \frac{(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$		-4,651676605	
Nivel de Confianza del 95 % (Za)		1,96	
Decisión	$Z \leq Z_a$	Se acepta la Ho	ok
	$Z > Z_a$	Se acepta la Ha	
Interpretación		Los dos PID sintonizados por GA y por PSO permiten tener aproximadamente la misma disminución de energía en el Proceso de Control de Nivel.	

4.5.2. TEST DE WILCOXON PROCESO DE FLUJO GA Vs PSO

A continuación se presentan los datos obtenidos para el Test de Wilcoxon del proceso de control de Flujo.

Tabla 4-9. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE FLUJO									
HIPÓTESIS		Principal (Ho): $IAE_{GA} = IAE_{PSO}$					Media(IAE_{GA})=Media(IAE_{PSO})		
		Alternativa (Ha): $IAE_{GA} > IAE_{PSO}$					Media(IAE_{GA})>Media(IAE_{PSO})		
n	IAE _{GA}	IAE _{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
1	17,982	19,310	-1,328	26		26		0,008	1
2	19,819	19,146	0,673	14	14			0,029	2
3	19,937	19,542	0,395	8	8			0,084	3
4	18,410	18,910	-0,500	11		11		0,102	4
5	18,837	18,921	-0,084	3		3		0,186	5
6	19,136	19,727	-0,591	12		12		0,218	6
7	18,237	19,188	-0,952	22		22		0,260	7
8	19,063	18,845	0,218	6	6			0,395	8
9	18,735	18,921	-0,186	5		5		0,416	9
10	24,513	18,780	5,733	35	35			0,461	10
11	20,301	19,840	0,461	10	10			0,500	11
12	18,333	19,070	-0,737	18		18		0,591	12
13	19,774	19,782	-0,008	1		1		0,615	13
14	18,796	19,596	-0,800	19		19		0,673	14
15	20,252	19,269	0,983	23	23			0,689	15
16	22,499	19,567	2,932	34	34			0,704	16
17	20,339	18,898	1,441	30	30			0,729	17
18	18,675	18,414	0,260	7	7			0,737	18

Continuación Tabla 4-9. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE FLUJO									
HIPÓTESIS		Principal (Ho): $IAE_{GA} = IAE_{PSO}$					Media (IAE_{GA})= Media (IAE_{PSO})		
		Alternativa (Ha): $IAE_{GA} > IAE_{PSO}$					Media (IAE_{GA})> Media (IAE_{PSO})		
n	IAE_{GA}	IAE_{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
19	20,137	19,313	0,824	20	20			0,800	19
20	22,309	19,923	2,385	33	33			0,824	20
21	17,972	19,377	-1,406	29		29		0,844	21
22	19,949	19,246	0,704	16	16			0,952	22
23	19,986	19,298	0,689	15	15			0,983	23
24	18,503	19,628	-1,125	24		24		1,125	24
25	18,833	19,562	-0,729	17		17		1,170	25
26	19,871	18,701	1,170	25	25			1,328	26
27	20,448	18,998	1,450	31	31			1,330	27
28	19,771	19,156	0,615	13	13			1,393	28
29	19,232	19,648	-0,416	9		9		1,406	29
30	18,217	19,694	-1,477	32		32		1,441	30
31	18,351	19,195	-0,844	21		21		1,450	31
32	20,029	18,636	1,393	28	28			1,477	32
33	20,177	18,848	1,330	27	27			2,385	33
34	19,009	19,110	-0,102	4		4		2,932	34
35	18,865	18,894	-0,029	2		2		5,733	35

Análisis estadístico: Siguiendo el procedimiento de Wilcoxon, las muestras son analizadas, arrojando los siguientes valores:

Tabla 4-10. Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Flujo.

Total T+		375	
Total T-		255	
T=min(T+,T-)		255	
$Z = \frac{T - n \frac{(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$		-0,982748579	
Nivel de Confianza del 95 % (Za)		1,96	
Decisión	Z ≤ Za	Se acepta la Ho	ok
	Z > Za	Se acepta la Ha	
Interpretación		Los dos PID sintonizados por GA y por PSO permiten tener aproximadamente la misma disminución de energía en el Proceso de Control de Flujo.	

4.5.3. TEST DE WILCOXON PROCESO DE PRESIÓN GA Vs PSO

A continuación se presentan los datos obtenidos para el Test de Wilcoxon del proceso de control de Presión.

Tabla 4-11. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE PRESIÓN									
HIPÓTESIS		Principal (H ₀): IAE _{GA} = IAE _{PSO}					Media(IAE _{GA})=Media(IAE _{PSO})		
		Alternativa (H _a): IAE _{GA} > IAE _{PSO}					Media(IAE _{GA})>Media(IAE _{PSO})		
n	IAE _{GA}	IAE _{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
1	11,215	11,231	-0,016	6		6		0,000	--
2	11,266	11,249	0,017	7	7			0,001	1
3	11,302	11,233	0,070	28	28			0,005	2
4	11,238	11,280	-0,041	18		18		0,007	3
5	11,317	11,262	0,055	26	26			0,008	4
6	11,289	11,277	0,012	5	5			0,012	5
7	11,250	11,295	-0,045	20		20		0,016	6
8	11,295	11,257	0,038	15	15			0,017	7
9	11,239	11,279	-0,040	17		17		0,021	8
10	11,336	11,302	0,034	13	13			0,028	9
11	11,219	11,273	-0,054	24		24		0,031	10
12	11,332	11,231	0,100	32	32			0,033	11
13	11,258	11,258	0,000	--			13	0,034	12
14	11,345	11,265	0,080	30	30		13	0,034	13
15	11,274	11,269	0,005	2	2			0,035	14
16	11,327	11,247	0,080	30	30			0,038	15
17	11,291	11,256	0,035	14	14			0,039	16
18	11,365	11,235	0,130	34	34			0,040	17

Continuación Tabla 4-11. Muestras obtenidas para el Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.

TEST DE WILCOXON PARA DATOS PAREADOS, EN EL PROCESO DE CONTROL DE PRESIÓN									
HIPÓTESIS		Principal (H₀): IAE_{GA} = IAE_{PSO}					Media(IAE_{GA})=Media(IAE_{PSO})		
		Alternativa (H_a): IAE_{GA} > IAE_{PSO}					Media(IAE_{GA})>Media(IAE_{PSO})		
n	IAE_{GA}	IAE_{PSO}	DIFERENCIAS	RANGOS ASIGNADOS	T+	T-	LIGADURA	DIFERENCIAS ORDENADAS	RANGOS DE ORDEN
19	11,344	11,290	0,054	24	24			0,041	18
20	11,306	11,252	0,054	24	24			0,043	19
21	11,214	11,247	-0,033	11		11		0,045	20
22	11,285	11,277	0,008	4	4			0,049	21
23	11,309	11,278	0,031	10	10			0,053	22
24	11,240	11,233	0,007	3	3		24	0,054	23
25	11,313	11,269	0,043	19	19		24	0,054	24
26	11,285	11,251	0,034	13	13		24	0,054	25
27	11,238	11,277	-0,039	16		16		0,055	26
28	11,286	11,226	0,060	27	27			0,060	27
29	11,255	11,234	0,021	8	8			0,070	28
30	11,324	11,271	0,053	22	22		30	0,080	29
31	11,218	11,266	-0,049	21		21	30	0,080	30
32	11,345	11,235	0,110	33	33			0,090	31
33	11,246	11,244	0,001	1	1			0,100	32
34	11,263	11,236	0,028	9	9			0,110	33
35	11,326	11,236	0,090	31	31			0,130	34

Análisis estadístico: Siguiendo el procedimiento de Wilcoxon, las muestras son analizadas, arrojando los siguientes valores:

Tabla 4-12. Análisis del Test de Wilcoxon GA Vs PSO, en el Proceso de Control de Presión.

Total T+		464	
Total T-		133	
T=min(T+,T-)		133	
$Z = \frac{T - n \frac{(n+1)}{4}}{\sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}}}$		-2,981004022	
Nivel de Confianza del 95 % (Za)		1,96	
Decisión	Z ≤ Za	Se acepta la Ho	ok
	Z > Za	Se acepta la Ha	
Interpretación		Los dos PID sintonizados por GA y por PSO permiten tener aproximadamente la misma disminución de energía en el Proceso de Control de Presión.	

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las siguientes conclusiones y recomendaciones son producto de la experimentación y de la experiencia adquirida en el desarrollo del presente proyecto y por ende son enfocadas a los resultados obtenidos en el mismo.

5.1. CONCLUSIONES

5.1.1. MODELADO DE SISTEMAS

- El modelo de un sistema puede ser utilizado en algoritmos de control moderno, para disminuir la velocidad de convergencia de los mismos.
- Los modelos ARX conducen a simples y robustos esquemas, evitando la parsimonia (que es el no hacer uso de una gran cantidad de parámetros en forma innecesaria).
- Para la obtención del modelo de un proceso, se necesita conocer el comportamiento de la planta y de las situaciones en que trabaja el mismo, pues el abrir o cerrar una simple válvula afectara toda su dinámica.
- En la práctica el utilizar equipos electrónicos que atenúen problemas de adquisición (por ejemplo como el ruido o el escalamiento), permiten tener datos lo más valederos posibles, ahí se justifica en parte el uso de equipos modernos como el modulo A/D del Controlador de Automatización Programable – PAC.

- En los experimentos realizados todos los procesos fueron representados con sistemas de primer orden, esto justifica el por qué en muchos de los algoritmos de los controladores industriales (como el Easy Tune de ABB [27], el Accutune III de Honeywell [28], o el Melsec Q de Mitsubishi [29]) que utilizan este método trabajan con este tipo de modelo.

5.1.2. SINTONIZACIÓN POR ZIEGLER Y NICHOLS

- Los valores obtenidos de las ganancias PID, tienden a ser buenos para distintos procesos. Sin embargo, el valor derivativo será un parámetro que en la mayoría de los casos perjudicara la estabilidad del sistema en el arranque, lo cual justifica porque en la generalidad de los procesos se trabaja solo con controladores PI.
- Es preciso realizar secuencialmente los pasos de sintonización, pues de ello depende la calidad de los valores obtenidos en el método.

5.1.3. SINTONIZACIÓN POR ALGORITMOS GENÉTICOS – GA

- Para su buen funcionamiento es preciso trabajar en un rango de valores idóneo o candidatos “interesantes”.
- Este método está contemplado como un tipo especial de control óptimo, pues los parámetros del PID son obtenidos para tal propósito usando un método de optimización para un solo objetivo compuesto o para múltiples objetivos.
- La cantidad de generaciones afecta notablemente no solo en la velocidad de convergencia del algoritmo, sino, que si son demasiadas, el método puede entregar valores no idóneos (problema de homogenización)

- La velocidad de convergencia del algoritmo, no solo dependerá de sus parámetros, si no, de la velocidad del procesador del computador con el que se esté trabajando.
- Un Algoritmo Genético – GA, no garantiza la determinación del mejor valor, pero si proporciona una solución razonablemente aplicable.

5.1.4. SINTONIZACIÓN POR CÚMULO DE PARTÍCULAS – PSO

- Para su buen funcionamiento es preciso trabajar en un universo de búsqueda delimitado por partículas “interesantes”.
- Sus limitados parámetros en su estructura, permiten tener ventaja en velocidad de convergencia.
- La velocidad de convergencia del algoritmo, no solo dependerá de sus parámetros, si no, de la velocidad del procesador del computador con el que se esté trabajando.
- Métodos de optimización como el PSO, es favorablemente aplicable con el modelo de la planta (pudiendo ser implementado sin el mismo, pero lo que no es tan viable en forma práctica).
- Se puede utilizar cualquier función “fitness” para el puntaje que requiere el algoritmo, su selección depende del tipo de respuesta que se requiera en el sistema.
- Al igual de los GA, al trabajar con valores aleatorios un Algoritmo de Optimización por Cúmulo de Partículas –PSO, no garantiza la determinación del mejor valor, pero si proporciona una solución razonable.

- Utilizando como referencia el IAE, se demostró que para el caso de la optimización de los valores PID de los controladores, el PSO es una excelente alternativa y método práctico que conlleva a la mejora de los procesos industriales, perfectamente aplicable en el Ecuador.

5.2. RECOMENDACIONES

5.2.1. MODELADO DE SISTEMAS

- Solo se debe adoptar estructuras sofisticadas en casos que las estructuras más sencillas no pasen los test de validación.
- Seleccionar el número de muestras en base al comportamiento del sistema (si el mismo es lento o rápido) y en base a la capacidad de almacenamiento de los datos.
- Considerar no solo el problema del ruido electromagnético sino el ruido que se induce en el mismo proceso (por ejemplo las “olas” en un tanque dan errores de medición), para la adquisición de datos.
- Utilizar en la medida posible dos dispositivos o programas informáticos de registro de datos, tanto para la validación de los mismos, como para respaldo de la información.
- Considerar que el modelado puede llevar tiempo (según el proceso), por ende no se debe sobrecargar los equipos en el ensayo.

5.2.2. SINTONIZACIÓN POR ZIEGLER - NICHOLS

- Se debe estabilizar el sistema (mínimo error u oscilación sostenida) antes de realizar la sintonización.
- Verificar las unidades de medida de las ganancias integral y derivativa de los controladores.

5.2.3. SINTONIZACIÓN POR ALGORITMOS GENÉTICOS

- Colocar inicialmente pocas generaciones en el algoritmo y dependiendo de las pruebas realizadas escoger el valor adecuado.
- Utilizar como criterio de velocidad de convergencia la cantidad de generaciones del algoritmo.
- Archivar la mejor solución de todas las interacciones anteriores del algoritmo y al final de las pruebas quedarse con la mejor de todas las obtenidas.

5.2.4. SINTONIZACIÓN POR CÚMULO DE PARTICULAS

- El código del algoritmo PSO, no genera un gran peso en el procesamiento de sus datos, sin embargo se prefiere utilizar un computador de doble núcleo para no tener problemas en la velocidad de convergencia.
- Utilizar como criterio de velocidad de convergencia la cantidad de interacciones del algoritmo.
- Utilizar los pesos de inercia en los rangos recomendados por Perez y Behdinan [26].

- Archivar la mejor solución de todas las interacciones anteriores del algoritmo y al final de las pruebas quedarse con la mejor de todas las obtenidas

5.3. TRABAJOS FUTUROS

A partir del presente proyecto se plantea la posibilidad de realizar un estudio comparativo de sintonización de controladores PID mediante el Algoritmo de Optimización por Cúmulo de Partículas –PSO y el algoritmo de optimización por Colonia de Hormigas - OCH.

5.4. PUBLICACIONES RESULTANTES DE LA INVESTIGACIÓN

Revista de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR PID AUTO - SINTONIZABLE MEDIANTE INTELIGENCIA DE ENJAMBRES PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO COLECTIVO DE LOS SISTEMAS PERTENECIENTES A PROCESOS ESTUDIADOS EN EL CERFIN-SECAP”.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] J. Kennedy and R. C. Eberhart. "Particle swarm optimization", Proceedings of IEEE International.
- [2] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol. IV, Perth, Australia, 1995, pp.1942–1948.
- [3] P. J. Angeline, "Using selection to improve particle swarm optimization," in Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput., Anchorage, AK, May 1998, pp. 84–89.
- [4] R. C. Eberhart and Y. Shi, "Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization," in Proc. IEEE Int. Conf. Evol. Comput., Anchorage, AK, May 1998, pp. 611–616.
- [5] H. Yoshida, K. Kawata, and Y. Fukuyama, "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment," IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, pp. 1232–1239, Nov. 2000
- [6] S. Naka, T. Genji, T. Yura, and Y. Fukuyama, "Practical distribution state estimation using hybrid particle swarm optimization," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Winter Meeting, vol. 2, 2001, pp. 815–820.
- [7] Zwe – Lee Gaing, "A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System", IEE Transactions of energy conversion, Vol. 19, No2, June 2004 (<http://www.kyu.edu.tw/93/epaperv6/93-028.pdf>).
- [8] K., Asrom y T., Hagglund., "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", ISA Press, 1995.

- [9] J.B., Ziegler y N.B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controls", ASME Transactions (EUA), Vol. 64, pages 739 to 768, 1942.
- [10] L., Ljung, "The System Identification Toolbox: The Manual", The MathWorks Inc., 1986.
- [11] L., Ljung, "System Identification: Theory for the user", 2 edition, Prentice Hall, Eglewood Cliffs, N.J., 2009
- [12] National Instruments, "The System Identification Toolbox: The Manual", 2012. (<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/209045>).
- [13] National Instruments, "LabVIEW FPGA and CompactRIO Getting Started Tutorial", 2012. (http://www.ni.com/pdf/labview/us/fpga_compactrio_getting_started.pdf)
- [14] Panchi M., "Optimización de Controladores Digitales PID en sistemas dinámicos usando Algoritmos Genéticos", tesis EPN, Quito – Ecuador, Enero 2012.
- [15] Goldberg E, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachussets, 1989
- [16] B. Kuo, "Sistemas de Control Automático", 7ma Edición, Prentice Hall, Mexico.
- [17] K. Ogata, "Sistemas de Control en Tiempo Discreto", 2da Edición, Prentice Hall, Mexico 1972, pag. 1
- [18] R. King, "Computational Intelligence in Control Engineering", Marcel Dekker, Inc. 1999.
- [19] T. Söderström y P. Stoica, "System Identification", Prentice Hall. 1989.

- [20] K. J. Astrom, "Ziegler-Nichos Auto Tuners", Rep: LUTFD2 / (TFRT-3167) / 01-125. Department of Automatic Control, Lund Inst. of Technology, Mayo de 1982.
- [21] K. J. Astrom, T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitud Margine" Automatica, vol 20 N 5, pp. 645-651, 1984.
- [22] National Instruments , "PID Control Toolkit User Manual", August 2006.
- [23] Geetha. M, Balajee. K. A y Jovitha Jerome, "Optimal Tuning of Virtual Feedback PID Controller for a Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) using Particle Swarm Optimization (PSO) Algorithm", IEEE-International Conference On Advances In Engineering, Science And Management (ICAESM -2012) March 30, 31, 2012.
- [24] Shi Y. and Eberhart R. C., "Parameter selection in particle swarm optimization", Proceedings of the Seventh Annual Conf. on Evolutionary Programming, pp. 591-601, 1998
- [25] Van Den Bergh, F., "Particle Swarm Weight Initialization In Multi-Layer Perceptron Artificial Neural Networks, In Development and Practice of Artificial Intelligence Techniques", Durban, South Africa, pp. 41-45, Sept. 1999.
- [26] Perez RE. and Behdinan K., "Particle swarm approach for structural design optimization", Computers and Structures, Vol. 85:1579-88, 2007.
- [27] ABB, Manual de instrucciones del controlador MicroDCI 53SL6000, 2001.
- [28] Honeywell, Manual del producto del UDC3500, 2007.
- [29] Mitsubishi Electric, Instrucciones de Controlador Melsec Q, 2002.

- [30] Omron, Manual de programación de la unidad CPU CP1H/CP1L, 2007.
- [31] Omron, Manual de operación del E5CK, 2005.
- [32] Turnbull Control Systems, Manual de operación del Controlador 6355, 2002
- [33] K. Ogata, “ Ingeniería de Control Moderna”, 4ta Edición, Prentice Hall, Mexico, ISBN: 84-205-3678-4, página 289, 2005

ANEXOS

ANEXO1: Especificaciones técnicas de montaje del NI CompactRIO-9073, Instalación de Módulos C Series I/O en el Chasis.

- **Configuración DIP switchs del NI cRIO-9073.**

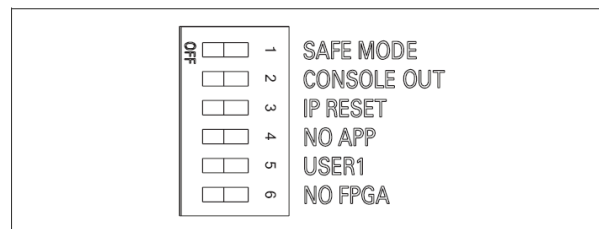


Figura A1. DIP switchs del NI-cRIO9073

Por defecto de fábrica los DIP switchs del NI cRIO-9073 se encuentran en posición OFF.

- **SAFE MODE switch.**

La posición del Switch SAFE MODE determina cuando el motor integrado de LabVIEW Real-time inicia en el arranque. Si el switch está en la posición OFF, el motor de LabVIEW Real-time se pone en operación, se debe mantener el switch en OFF durante la operación en condiciones normales. Si el switch está en la posición de ON a la inicialización, el cRIO-9073 inicia solo con los servicios esenciales requeridos para la actualización, configuración e instalación del software. El motor LabVIEW Real-Time no se pondrá en operación.

Coloque el SAFE MODE switch en ON si el software del chasis está dañado, si el switch no está en ON y si no está instalado ningún software el chasis automáticamente se reinicializa en modo seguro. El SAFE MODE switch debe estar en ON para formatear el driver del chasis.

- **CONSOLE OUT switch.**

Con el serial-port terminal program, se utiliza el CONSOLE OUT switch para leer la dirección IP y la versión de firmware del controlador. Usando un null-modem cable para conectar el puerto serial del chasis a la computadora. Poner el switch en la posición de ON. Asegurarse que en el serial-port terminal program sea configurado de con los siguientes parámetros:

- 9,600 bits por segundo
- Ocho bits de datos
- No paridad
- \Un bit de parada

Cuando el serial-port program muestra la dirección IP y la versión del firmware del chasis. Este switch debe permanecer en la posición de OFF durante la normal operación.

- **IP RESET switch.**

Coloca IP RESET switch en la posición de ON y reinicializa el controlador para resetearla dirección IP y otras configuraciones TCP/IP del controlador a por defecto de fábrica. También puede colocar este switch en la posición de ON para desbloquear el chasis si este fue previamente bloqueado en el MAX.

- **NO APP switch**

Coloca el NO APP switch en la posición ON para prevenir que la aplicación LabVIEW RT inicie desde que se ejecuta la inicialización del controlador. Si se quiere desactivar permanentemente la aplicación LabVIEW RT durante la inicialización, deberíamos desactivarlo en Lab VIEW. Para que la aplicación inicie a la inicialización

colocar el NO APP switch en posición OFF, creando una aplicación usando el Lab VIEW Application Builder, y configure la aplicación en Lab VIEW para lanzar los VIs a la inicialización.

- **USER1 switch**

Podemos definir el USER1 switch en nuestra aplicación. Se lo define con un propósito según la aplicación embebida.

- **NO FPGA switch**

Colocando el NO FPGA switch en la posición ON es para prevenir que la aplicación Lab VIEW FPGA sea cargada cuando se inicializa, el NO FPGA switch reemplaza las opciones de reset del Compact RÍO, luego de la iniciación se puede descargar a el FPGA desde el software si tener en cuenta la posición del switch.

- **Leds indicadores del NI cRIO-9073**

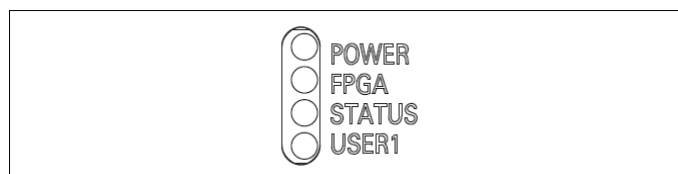


Figura A2. Leds indicadores del cRIO-9073

- **POWER LED**

El led de POWER se enciende mientras el cRIO-9073 está energizado indica que la fuente de alimentación del chasis es la adecuada.

- **FPGA LED**

Se puede usar el FPGA LED para que al ejecutar la aplicación sea fácilmente obtener el estado de la aplicación. Usa el módulo LabVIEW FPGA y el software NI-RIO para definir el FPGA LED para cumplir lo que necesita la aplicación.

- **STATUS LED**

El STATUS LED está apagado durante la normal operación, el cRIO-9073 indica un error específico por las condiciones de un cierto número de veces de parpadeo del STATUS LED que están en la Tabla A-1.

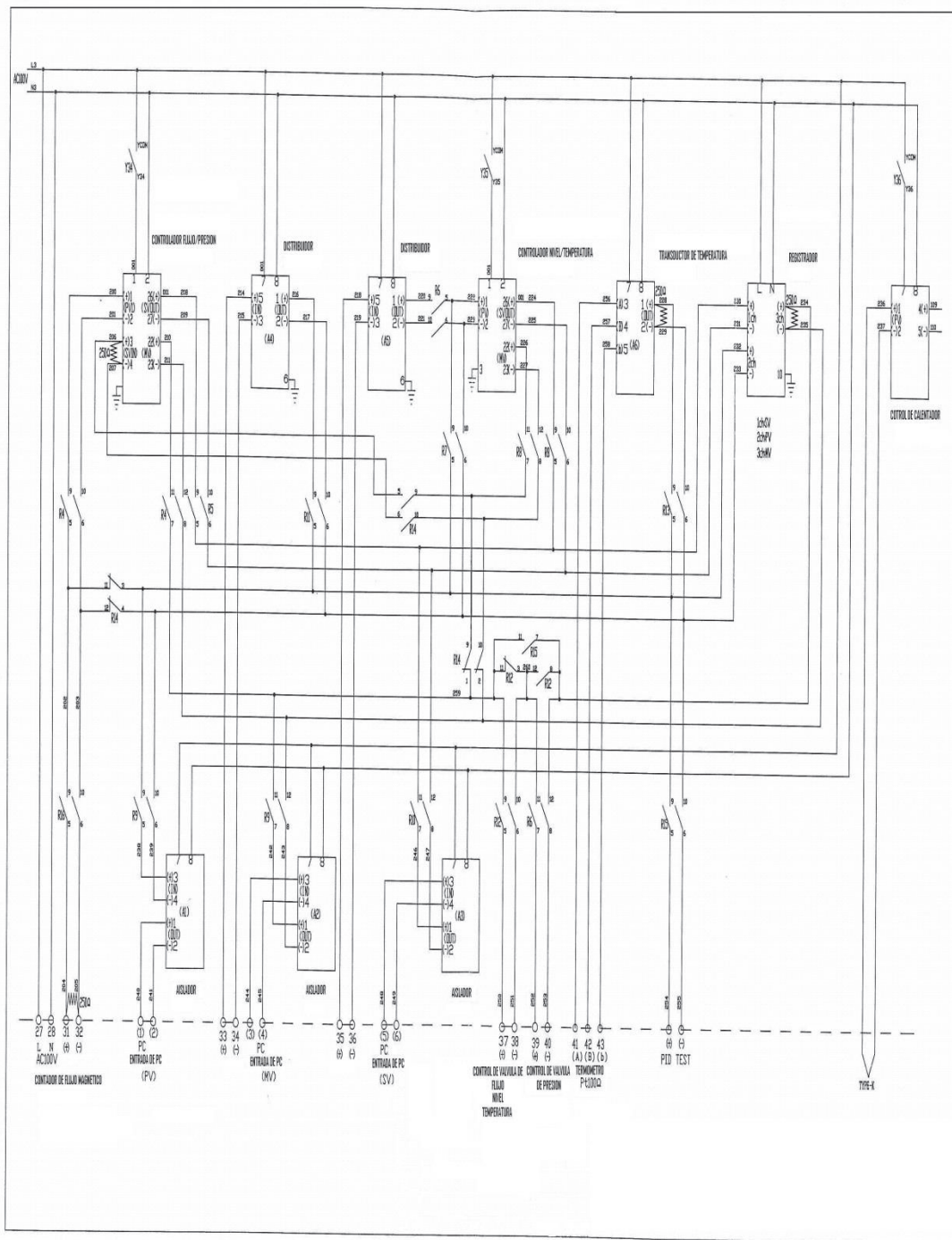
Numero de destellos	Indicación
1	El chasis esta des configurado, usar el MAX para configurar el chasis.
2	El chasis ha detectado un error en el software. Esto usualmente sucede cuando el intento de actualizar es interrumpido. Reinstala el software en el chasis.
3	El chasis se encuentra en safe mode porque el switch SAFE MODE está en posición ON.
4	Ocurre cuando el chasis se encuentra trabajando fuera de la memoria.
Continuo	El equipo debe ser configurado por DHCP por no permitir obtener una dirección de IP.

Tabla A-1. Indicaciones del STATUS LED

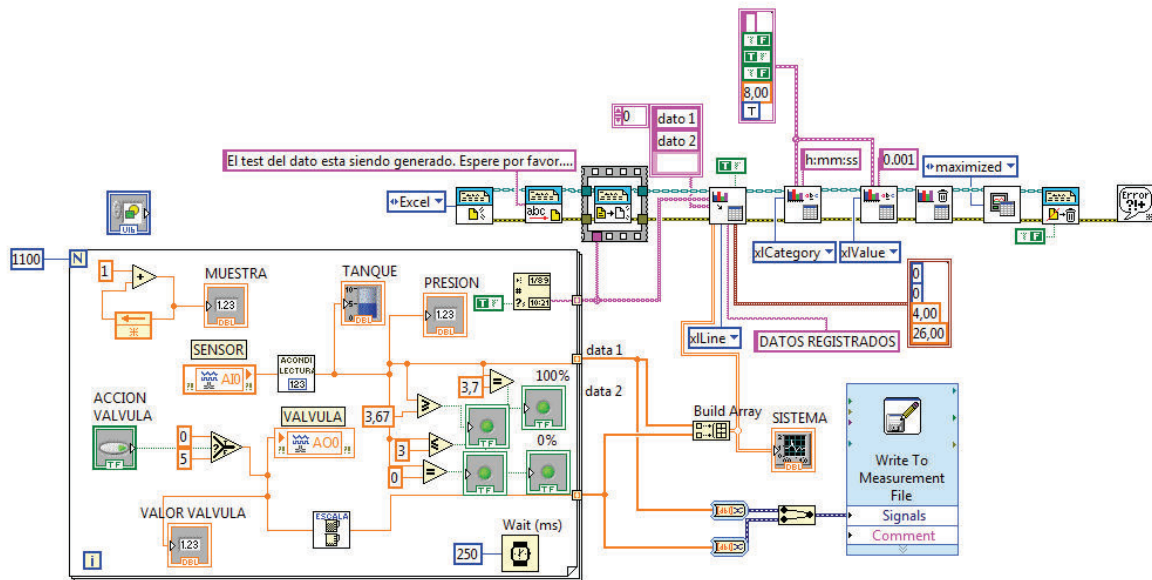
- **USER 1 LED**

Podemos definir el USER1 LED para que cumpla con las necesidades de nuestra aplicación, podemos definir al LED, usando RT LEDs VI in Lab VIEW

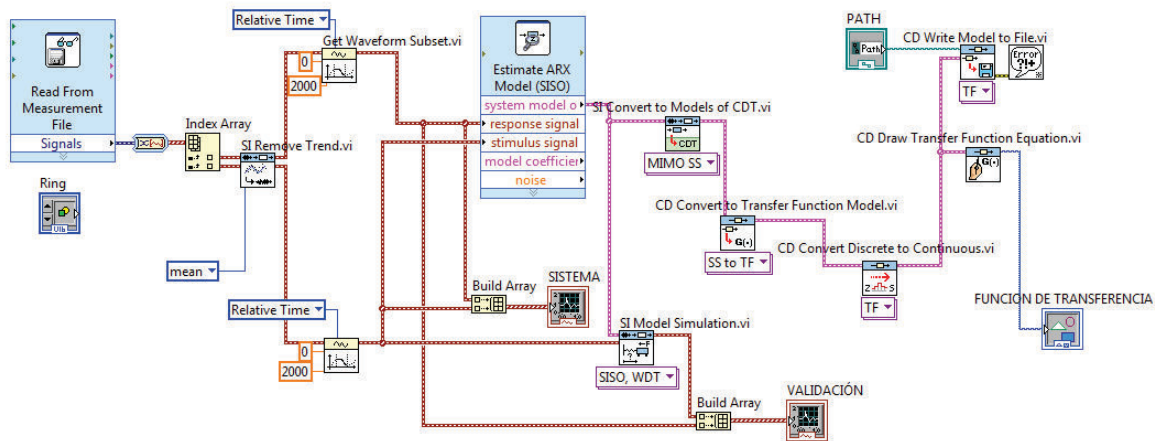
ANEXO2: Diagrama eléctrico de sensores y actuadores Modulo Didáctico



ANEXO 3: Programa para el registro de datos de entrada y salida del sistema a ser identificado, mediante el Toolkit de Generación de Reportes de LabVIEW.



ANEXO 4: Programa para la Identificación de los Procesos mediante SI Model Estimation Express VI del Toolkit de Identificación de sistemas de LabVIEW.



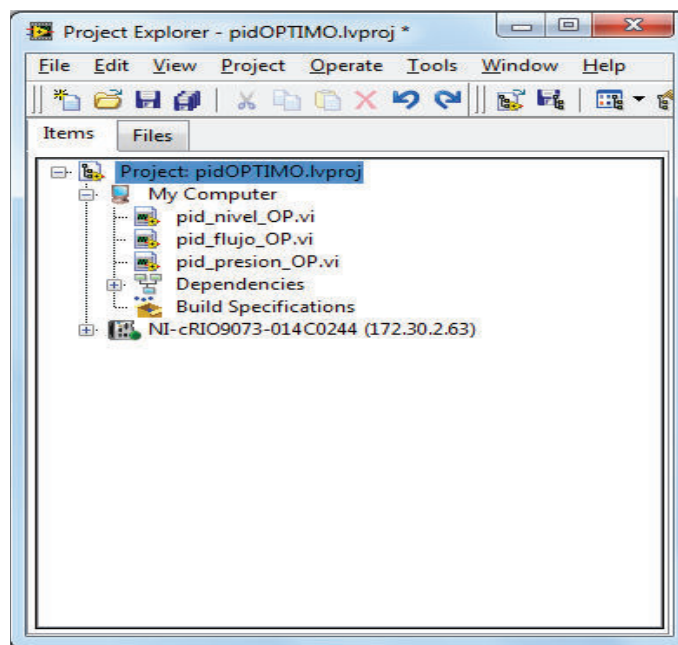
ANEXO 5: Manual de Uso para el Programa del PID Auto-sintonizable mediante Inteligencia de Enjambres y Algoritmos Genéticos.

Requerimientos:

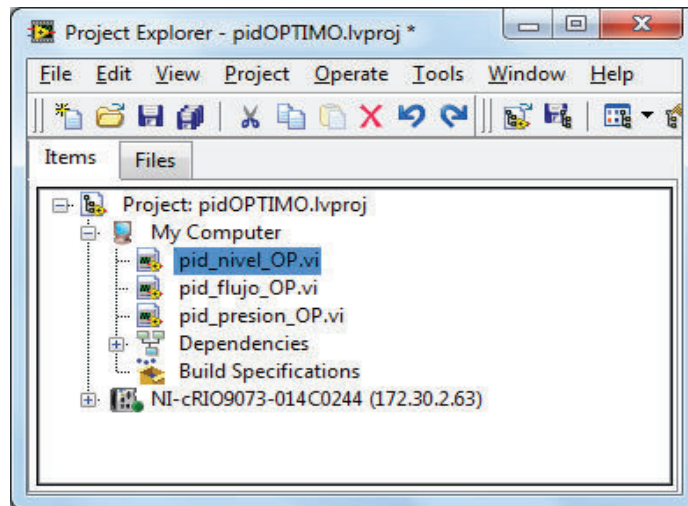
- Un computador Intel Core i7 CPU @ 2.40 GHz, 8 gb de RAM, S.O. 32 bits.
- Matlab R2010a, con el toolbox de Optimización.
- LabVIEW 2009 con los toolkit de Control e Identificación de Sistemas.
- Explorador de Medición y Automatización MAX versión 5.0
- Driver PAC - CompactRIO-9073.

A continuación se presenta los pasos para poner en marcha el Controlador Auto sintonizable mediante inteligencia de Enjambres y Algoritmos Genéticos:

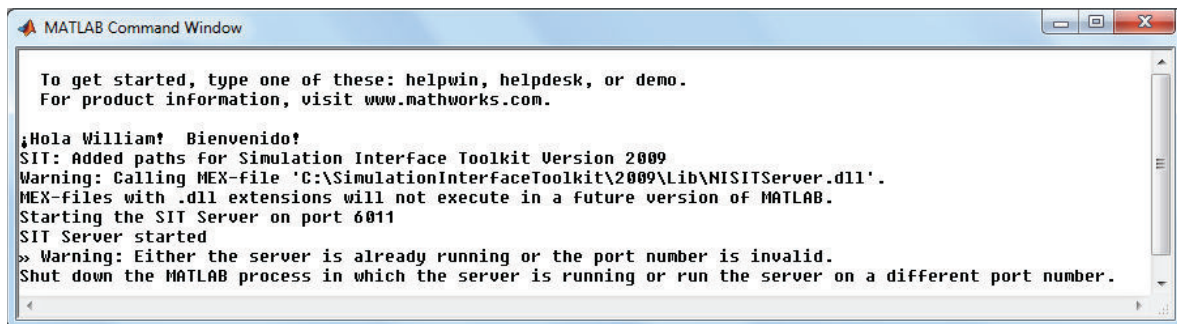
a.- Abrir el proyecto “pidOPTIMO.lvproj”.



b.- Seleccionar y abrir el proceso controlar:



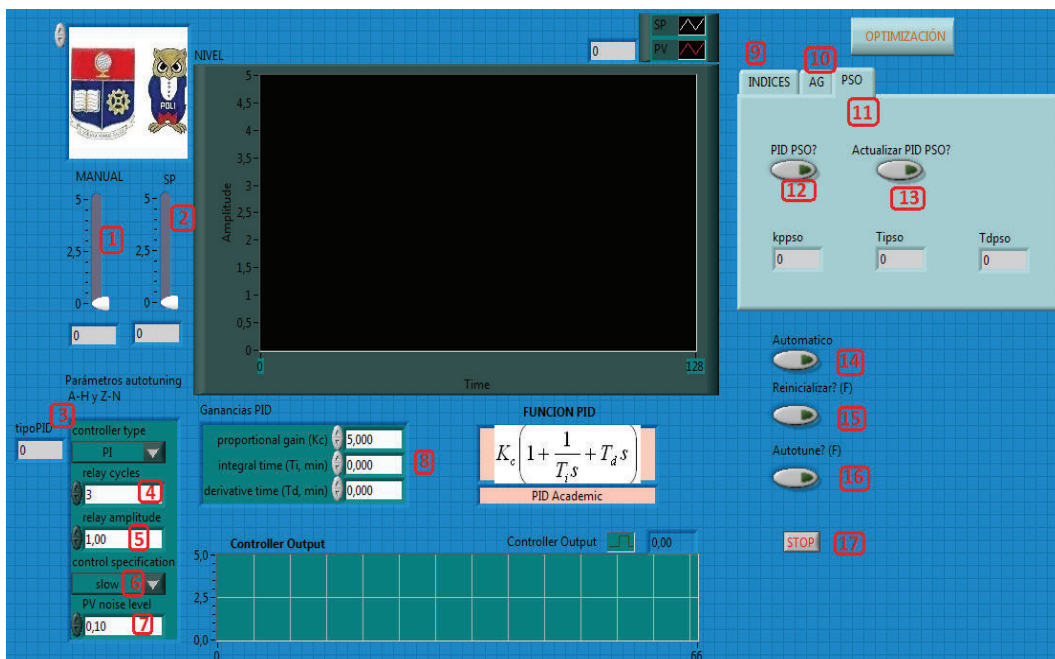
c.- Aperturar el servidor de Matlab R2010 (ojo: no lo cierre, solo minimícelo).



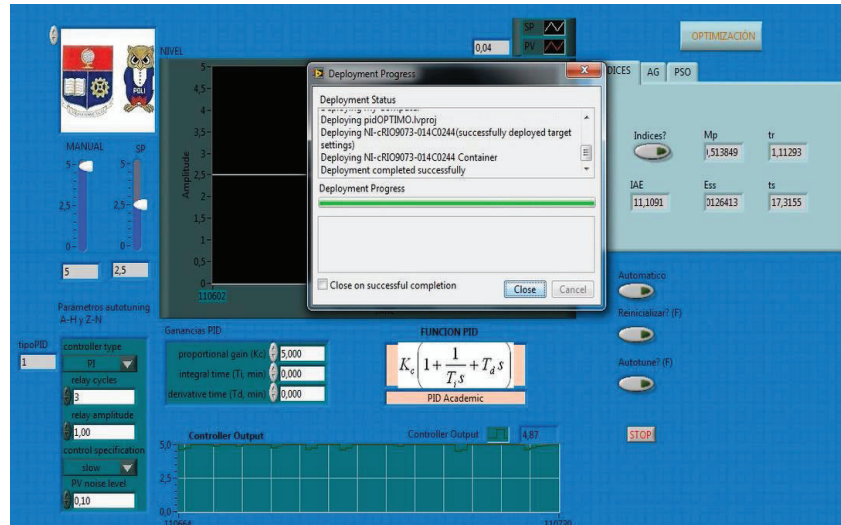
d.- En la pantalla del panel frontal reconocerá los siguientes controles, a continuación su descripción:

1. Control manual del sistema.
2. Set point.
3. Tipo de Controlador (PID, PI o P).
4. Ciclos del relé.
5. Amplitud del relé.
6. Especificación del control.

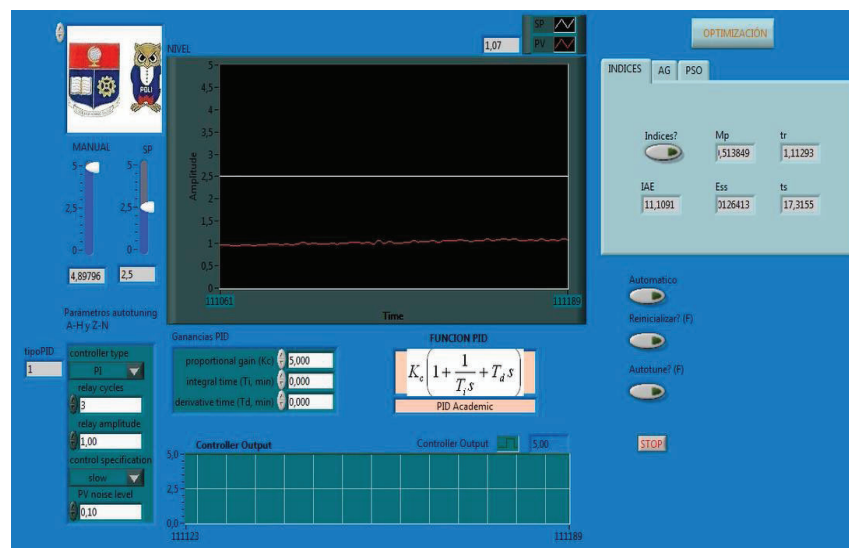
7. Ruido del sistema.
8. Ganancias PID.
9. Índices de desempeño.
10. Algoritmo Genético -AG.
11. Optimización por cúmulo de Partículas – PSO.
12. Interruptor de Auto sintonización PSO.
13. Botón de Actualización de Ganancias PID – PSO.
14. Control Automático del sistema.
15. Reinicializar pre sintonización.
16. Comenzar pre sintonización.
17. Detener el control.



e.- Poner en run en programa y cerrar la ventana de dialogo “Deployment Status” al cabo de la compilación.

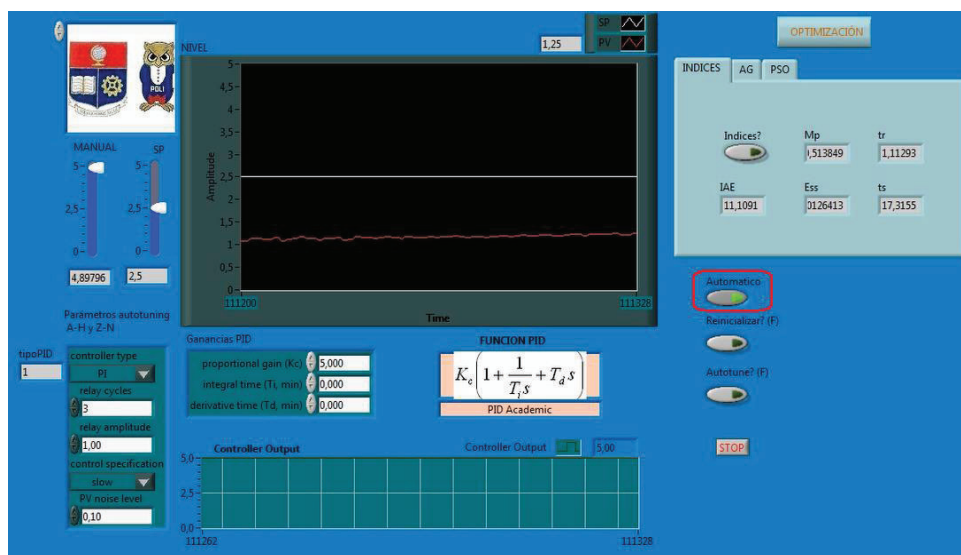


f.- Operar en modo manual, setear el valor de consigna y esperar a que la variable del proceso este próxima al set point.

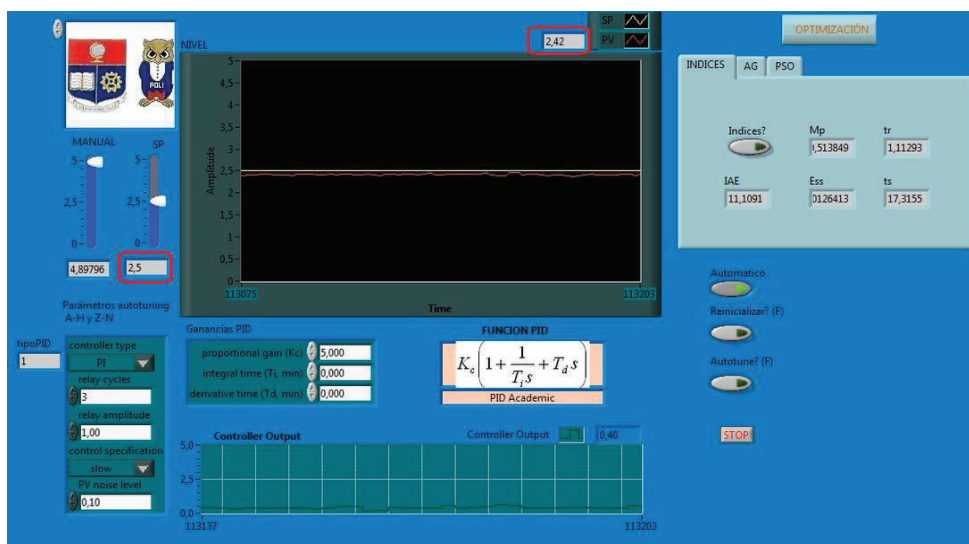


Importante: Los valores del controlador (tipo, topología, valores PID), están seteados por defecto al inicio, no los toque a menos que lo creyera conveniente.

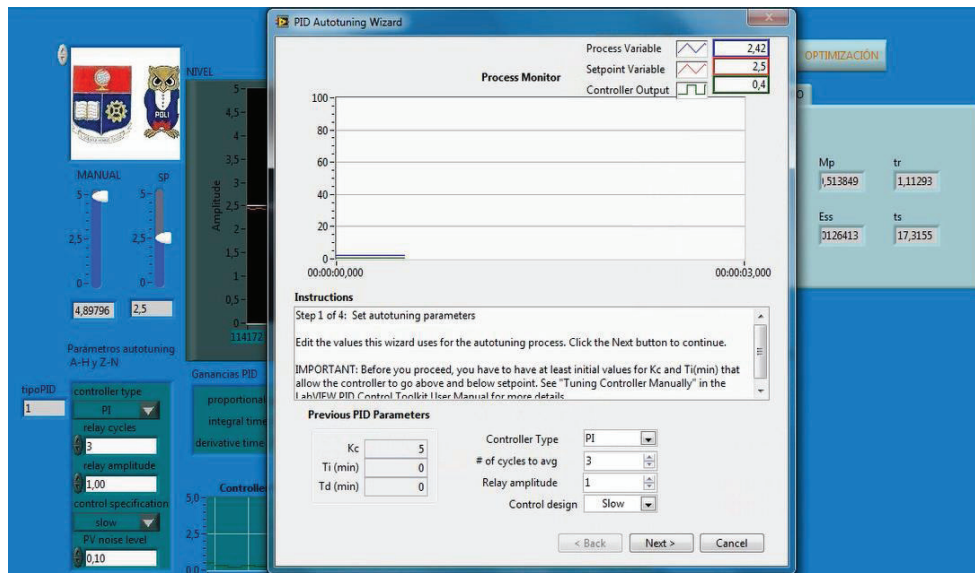
g. Operar en modo Automático.



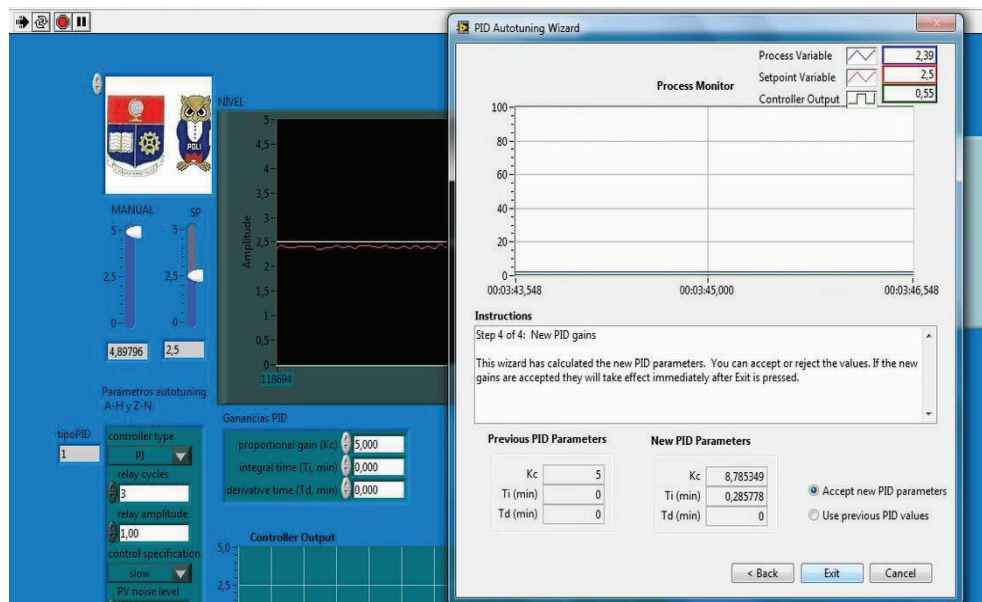
h. Esperar a que el sistema se estabilice o tenga una oscilación sostenida alrededor del set point.



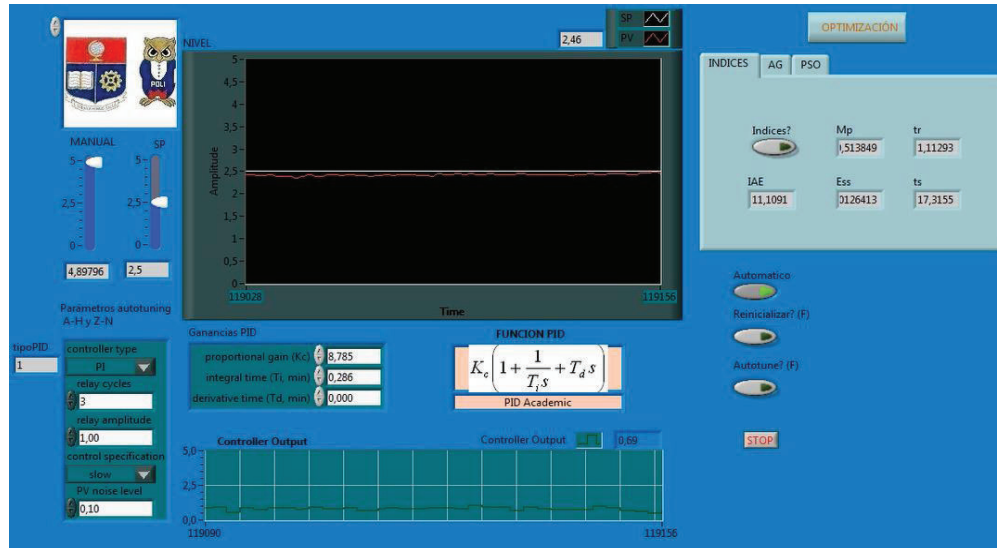
i. Accionar el botón “Autotune”, para empezar el proceso de pre sintonía PID.



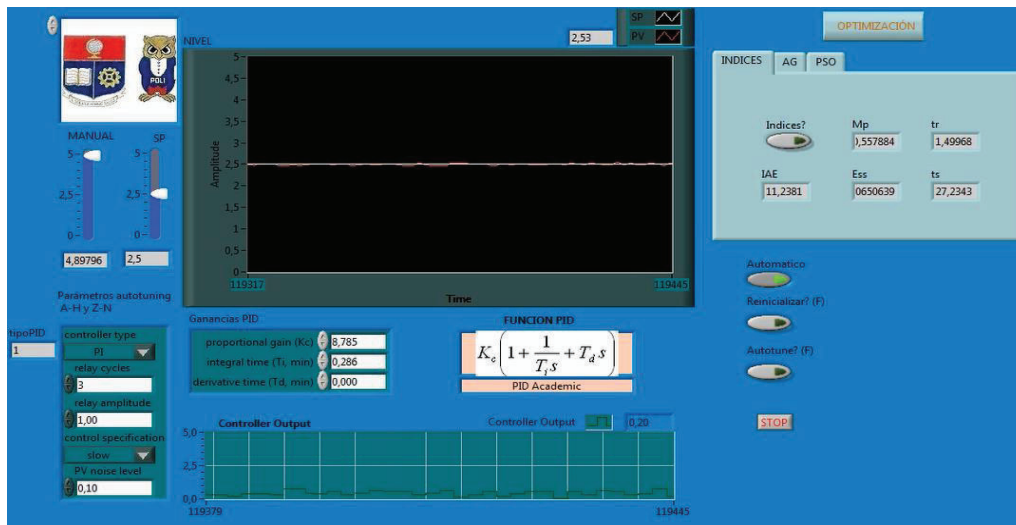
j. Seguir los pasos descritos en la pantallas del “PID Autotuning Wizard”, de tal manera de obtener los valores PID estimados.



k. Accione “Exit”, para salir del programa de pre sintonía (PID Autotuning Wizard), los nuevos valores serán cargados automáticamente en el controlador PID.

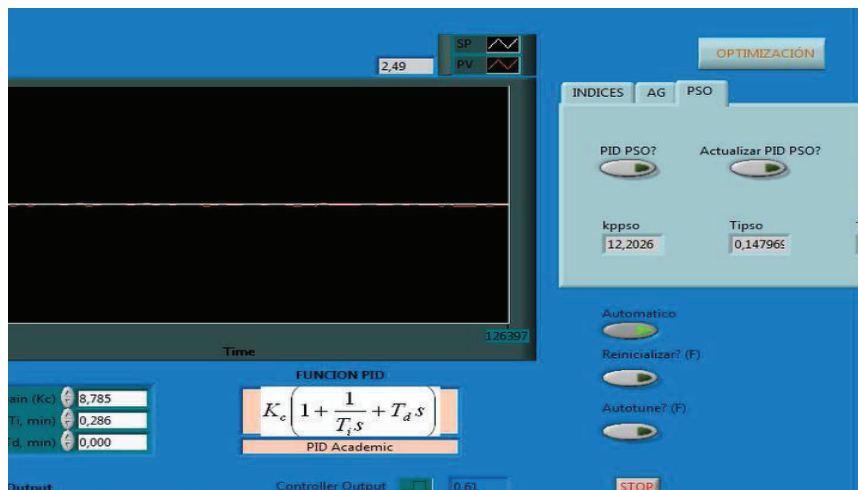


l. Calcule automáticamente los índices de desempeño, accionando el botón “índices?”

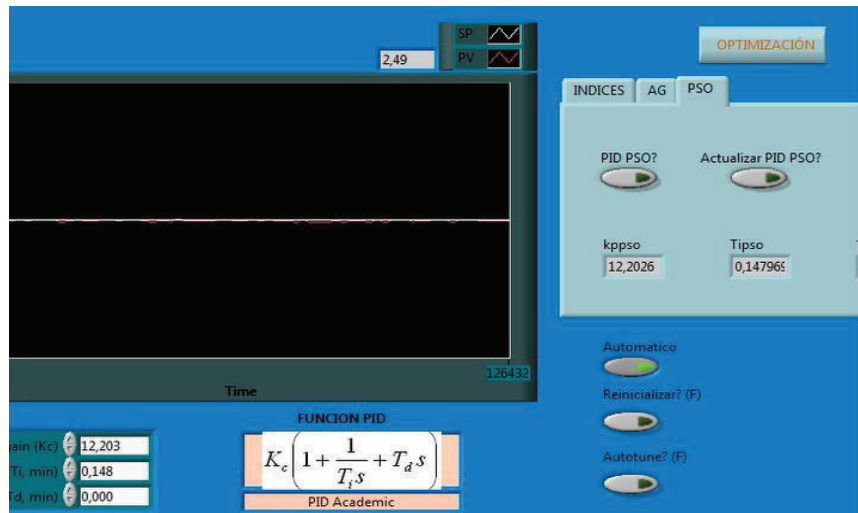


Considere que: Los índices son una referencia para saber si los valores de las ganancias PID, son los adecuados. Mientras más pequeños sus valores, mejor será el controlador.

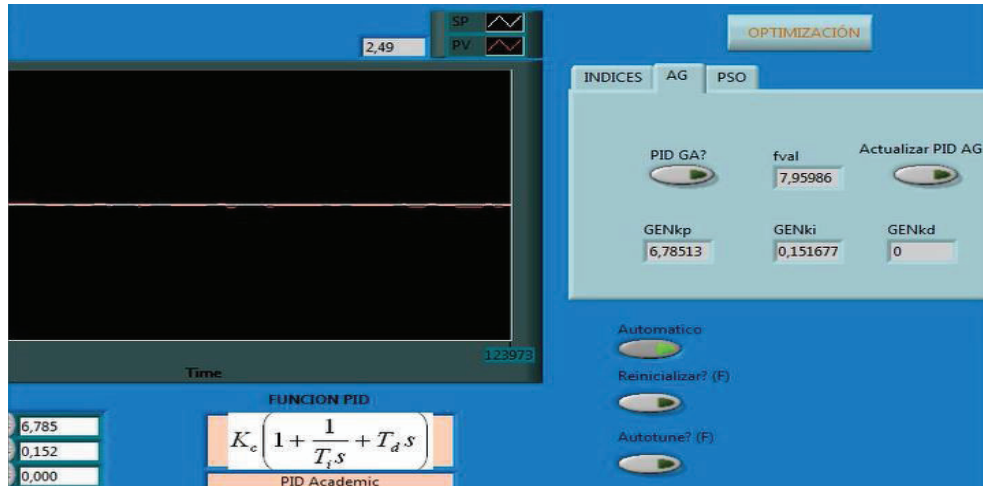
m. Sintonice automáticamente los valores PID del controlador accionando el interruptor PID PSO? Y luego actualícelos mediante el botón “Actualizar PID PSO?”



Note que el programa setea automáticamente los valores calculados.



n. El procedimiento para calcular mediante AG, es el mismo que para el PSO, como se muestra en la siguiente gráfica.



o. Pruebe con diferentes puntos de consigna valorando el comportamiento del controlador óptimo.

