



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL CHIMBORAZO

“AUTOMATIZACIÓN DE UNA UNIDAD DE BOMBEO DE 600HP Y DISEÑO DE UN CONTROLADOR ENTRENADO CON SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSA BASADO EN REDES ADAPTATIVAS”

WILLIAMS RAMIRO VILLALBA CASTILLO

Trabajo de titulación modalidad: Proyecto de Investigación y Desarrollo, presentado ante el Instituto de Posgrado y Educación Continua de la ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Riobamba - Ecuador

Octubre 2017



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El trabajo de titulación modalidad proyectos de Investigación y Desarrollo, denominado: “AUTOMATIZACIÓN DE UNA UNIDAD DE BOMBEO DE 600HP Y DISEÑO DE UN CONTROLADOR ENTRENADO CON SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSA BASADO EN REDES ADAPTATIVAS”, de responsabilidad del señor Williams Ramiro Villalba Castillo, ha sido prolijamente revisado y se autoriza su presentación.

Tribunal:

Ing. Freddy Proaño Ortiz; PhD

PRESIDENTE

Ing. Marcelo Vladimir Garcia Sanchez ;M.sc

DIRECTOR

Ing. Johnny Alexander Calderón Carrillo;M.sc

MIEMBRO

Ing. David Raimundo Rivas Lalaleo;M.sc

MIEMBRO

Riobamba, Octubre de 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, WILLIAMS RAMIRO VILLALBA CASTILLO, declaro que soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el presente Trabajo de Titulación modalidad Proyectos de investigación y Desarrollo, y que el patrimonio intelectual generado por el mismo pertenece, pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Williams Ramiro Villalba Castillo

C.I. 060304474-4

© 2017, Williams Ramiro Villalba Castillo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Williams Ramiro Villalba Castillo declaro que el presente proyecto de investigación es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Proyecto de Investigación de maestría.

Riobamba, Octubre de 2017

Williams Ramiro Villalba Castillo

C.I. 060304474-4

DEDICATORIA

En la existencia rigen caminos, caminos con destinos inseparables, caminos que flagelan el alma, caminos que alegran la vida.

Caminos que han convertido mi vida en dedicación y esfuerzo; en júbilo y nostalgia; en derrotas y victorias, pero en su interior, ha estado encriptado sus guías que han sustentado mis sueños y han hecho posible materializar mis aspiraciones.

A mi Madre: tú eres mi camino de templanza, coraje y espero; de voluntad infinita, de vigor interminable, tú eres quien me llevo en el vientre, tú eres quien me dio la vida, tú eres mi ejemplo y mi faro guía.

A mi Esposa: tú eres mi camino de amor; mi senda de ternura, y mi núcleo de alegría; tú eres mi pasión ardiente, mi razón de esmero y mi adoración perpetua.

A mis mimadas: ustedes son mi felicidad latente, mi amor viviente, mi esperanza inagotable; todo lo que amalgama mi vida, mi razón, mi fortaleza y mi orgullo.

A mi hermana y mis Panchos: Ya han paso tantos años, años que no puedo saber que es lo que piensas o quieres solo sé que nuestro Dios te alberga a su lado y aunque yo no lo entienda ni acepte, he intentado aplacar tu partida con la alegría de tus hijos recorriendo cada sendero de nuestros recuerdos.

Les dedico mi esfuerzo, mi pasión y este sueño plasmado en realidad.

Gracias mis grandes amores.

Williams.

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme nuevamente la oportunidad de perfeccionar mis conocimientos y compartir experiencias de vida y profesionales dentro de las aulas de clase. A todos mis profesores quienes de una u otra forma fueron partícipes en el desarrollo de este programa de Maestría. Por otro lado, a mis compañeros y amigos quienes tuve la oportunidad de disfrutar momentos amenos dentro y fuera de la academia. Así mismo al Ing. Marcelo Vladimir García Sánchez;M.sc tutor de este trabajo de tesis y quien fue parte esencial dentro del proceso; finalmente, un agradecimiento sincero a los Ingenieros Johnny Alexander Calderón Carrillo;M.sc y David Raimundo Rivas Lalaleo;M.sc como miembros de tribunal y facilitadores de diferentes guías para el desarrollo del presente trabajo; finalmente, un agradecimiento muy sincero al Ing. Raúl Díaz, Ing.Javier Melena e Ing. Alexis Lucero ya que sin su apoyo tampoco habría sido posible alcanzar esta meta.

Gracias a todos los que desde donde se encontraban me proporcionaron las palabras de alientos y el ánimo para continuar en este arduo trabajo y que fueron piezas imprescindibles para culminar con éxito esta tarea.

Williams.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	xix
SUMMARY	xx

CAPÍTULO I

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Problema de Investigación	1
1.1.1	<i>Planteamiento del problema</i>	1
1.2	Formulación del problema	3
1.3	Preguntas Directrices	3
1.4	Objetivos de la investigación	4
1.4.1	<i>Objetivo General:</i>	4
1.4.2	<i>Objetivos Específicos:</i>	4
1.5	Justificación de la investigación	4
1.6	Hipótesis General	5

CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO	6
2.1	Aspectos Hidráulicos de un ducto de gran distancia	6
2.1.1	<i>Filosofía del funcionamiento de un poliducto</i>	6
2.1.2	<i>Perfil Altimétrico</i>	8
2.1.3	<i>Curvas características de un sistema de bombeo</i>	8
2.2	Aspectos de automatización de procesos industriales	9
2.2.1	<i>Identificación del tipo de proceso de producción</i>	9
2.2.2	<i>Pirámide de automatización CIM</i>	9

2.2.3	<i>Instrumentación de una unidad de bombeo</i>	10
2.2.4	<i>Autómatas programables industriales</i>	11
2.2.5	<i>El Grafcet</i>	11
2.2.6	<i>Interfaz Hombre Máquina</i>	11
2.2.7	<i>Sistemas SCADA</i>	12
2.3	Aspectos de Control Inteligente	12
2.3.1	<i>La aplicabilidad del control Inteligente a los sistemas de bombeo</i>	12
2.3.2	<i>Aspectos Básicos de los sistemas Neuro-Difusos</i>	13
2.3.2.1	<i>Sistemas de inferencia Difusa</i>	13
2.3.2.2	<i>Fuzzificación</i>	14
2.3.2.3	<i>Inferencia Difusa</i>	15
2.3.2.4	<i>Modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK)</i>	15
2.3.3	Redes Neuronales Artificiales -RNA	16
2.3.3.1	<i>Funciones de activación de RNA</i>	18
2.3.3.2	<i>Redes neuronales Perceptrón Multicapa – MLP</i>	18
2.3.3.3	<i>Entrenamiento de una RNA con Regulación bayesiana</i>	19
2.3.3.4	<i>Arquitectura Adaptive Network based Fuzzy Inference System – ANFIS</i>	20

CAPÍTULO III

3	AUTOMATIZACIÓN DE LA UNIDAD DE BOMBEO DE 600HP	23
3.1	Capa de proceso	23
3.1.1	<i>Instrumentación para medición de presión de la unidad G-802</i>	24
3.1.2	<i>Instrumentación para medición de Temperatura de la unidad G-802</i>	26
3.1.3	<i>Instrumentación para medición de vibración de la unidad G-802</i>	26
3.1.4	<i>Instrumentación para medición de flujo y densidad de la unidad G-802</i>	27
3.2	Capa de Control	28

3.2.1	Generalidades	28
3.2.2	Señales del proceso	29
3.2.3	Sistema de control	30
3.2.4	Selección de componentes	31
3.2.5	Cableado del sistema de control básico de proceso – BPCS	36
3.2.6	Programación de la lógica de control del BPCS	36
3.2.6.1	<i>Flujograma del proceso de bombeo</i>	37
3.2.7	Software de programación	40
3.2.7.1	<i>Configuración del Hardware en Unity Pro XL</i>	42
3.2.7.2	<i>Declaración de variables alocadas</i>	45
3.2.7.3	<i>Declaración de variables No-alocadas</i>	52
3.2.7.4	<i>Programación de las tareas</i>	52
3.3	Capa de supervisión	59
3.3.1	Convenios de visualización con el área operativa	59
3.3.2	Vision general de Wonderware-Intouch	61
3.4	Capa MES	68

CAPÍTULO IV

4	DISEÑO DE CONTROLADORES -ANFIS	70
4.1	Diagrama de bloques para flujo de datos	70
4.2	Adquisición de datos	71
4.3	Identificación de la dinámica de la planta	74
4.3.1	Modelo neuronal de la unidad G-802	74
4.3.1.1	<i>No-lineales Auto-Regresivas con entradas externas - NARX</i>	77
4.3.1.2	<i>Modelo NARX de la presión de descarga unidad G-802</i>	79
4.3.1.3	<i>Modelo NARX de la presión de succión de unidad G-802</i>	84

4.4	Diseño de controladores ANFIS	87
4.5	Control neurodifuso con estructura override	97

CAPÍTULO V

5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	101
5.1	Metodologías de investigación utilizadas	101
5.1.1	<i>Método Heurístico</i>	101
5.1.2	<i>Método Documental</i>	101
5.2	Análisis de resultados	102
5.2.1	<i>Análisis de resultados de la automatización del G-802</i>	102
5.2.2	<i>Análisis de resultados del entrenamiento de planta</i>	103
5.2.3	<i>Análisis de resultados del diseño de controladores</i>	104

CAPÍTULO VI

6	PROPUESTA	107
6.1	Conclusiones	107
6.1.1	<i>Respecto a la fase de implementación de la automatización</i>	107
6.1.2	<i>Respecto a la fase de diseño de controladores neurodifusos</i>	108
6.2	Recomendaciones	109

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Características del motor	2
Tabla 2-1: Características de la bomba	2
Tabla 1-3: Ubicación física de los elementos principales de la unidad.	23
Tabla 2-3: Condiciones de presión del proceso en la succión de la bomba G-802.....	25
Tabla 3-3: Condiciones de presión del proceso en la descarga de la bomba G-802	25
Tabla 4-3: Características técnicas del PIT de succión del G-802	25
Tabla 5-3: Características técnicas del PIT de descarga del G-802	26
Tabla 6-3: Características técnicas de los transmisores de vibración de la unidad G-802.....	26
Tabla 7-3: Características técnicas de los medidores máxicos	27
Tabla 8-3: Señales analógicas de la instrumentación para el control del G-802.....	29
Tabla 9-3: Señales discretas de la instrumentación para el control del G-802	29
Tabla 10-3: Señales Analógicas y setpoint del G-802	30
Tabla 11-3: Cantidades y tipo de señal para el controlador.	32
Tabla 12-3: Lista de materiales para la G-802	33
Tabla 13-3: Procesador 140-CPU-434-12A/U	34
Tabla 14-3: Características de tarjeta de red Modbus sobre ethernet	35
Tabla 15-3: Direccionamiento físico de entradas y salidas en Unity Pro XL	41
Tabla 16-3: Variables alcatadas de temperaturas - 140-ARI-03010	46
Tabla 17-3: Variables alcatadas de entrada de 4-20mA para la 140-ACI-04000	48
Tabla 18-3: Variables alcatadas de salida de 4-20mA para la 140-ACO-13000	49
Tabla 19-3: Variables alcatadas de entrada discretas de hardware	49
Tabla 20-3: Variables alcatadas de Salidas discretas de hardware	50
Tabla 21-3: Variables alcatadas para la comunicación con el computador - Floboss-S600 ...	50
Tabla 22-3: Variables alcatadas de memoria para Pre-alarmas	51
Tabla 23-3: Variables alcatadas de memoria para Alarmas	51

Tabla 24-3: Variables No-alocadas.....	52
Tabla 25-3: Convenio de colores a ser usados en los HMI.....	60
Tabla 26-3: Características de las PC's de los HMI.	62
Tabla 1-4: Mapeo de Rangos entre los dominios real y normalizado.....	76
Tabla 2-4: Setpoints de presiones en operación normal.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2: Esquema de funcionamiento de un Poliducto de montaña.....	6
Figura 2-2: Punto de operación de un sistema de bombeo	9
Figura 3-2: Pirámide de automatización CIM	10
Figura 4-2: Generalidades de un sistema de inferencia difuso “Temperatura”	13
Figura 5-2: Operaciones lógicas de conjuntos difusos	14
Figura 6-2: Sistema Difuso tipo TSK de primer orden.....	16
Figura 7-2: Estructura básica de una neurona artificial.	17
Figura 8-2: Funciones de activación de RNA.....	18
Figura 9-2: Red neuronal Perceptron Multicapa.....	19
Figura 10-2: Comparación del modelo TKS y la Estructura ANFIS de 5 capas	21
Figura 1-3: Localización de los elementos del G-802	24
Figura 2-3: Diagrama de configuración típica de una computadora de flujo.	27
Figura 3-3: Diagrama de partes de la estación.....	28
Figura 4-3: Diagrama general de señales de Entrada/Salida de la unidad G-802.....	32
Figura 5-3: Memoria calculada de un PLC-Quantum.....	34
Figura 6-3: Distribución física de tableros eléctricos de los controladores BPCS Y RIO-DROPS	36
Figura 7-3: Bloques de funcionamiento de la estación de bombeo y reductora	37
Figura 8-3: Flujograma de funcionamiento de la G-802	39
Figura 9-3: Ejemplo de variable física alocata	41
Figura 10-3: Estructuración dell software Unity Pro XL v10.0.....	42
Figura 11-3: Configuración del Bus Local en el software Unity Pro XL de Schneider-Electric43	
Figura 12-3: Configuración de la dirección IP de la 140-NOE-77111	43
Figura 13-3: Configuración del RIO-Bus usando Unity Pro XL de Schneider-Electric.....	44
Figura 14-3: Estructura básica del mapeo modbus para variables alocatadas	45

Figura 15-3: Configuración de inicio del PLC-Quantum, Drops y Tarjetas análogas de I/O....	46
Figura 16-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ARI-03010 del Slot-3.....	47
Figura 17-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ARI-03010 del Slot-3.....	47
Figura 18-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ACI-04000 del Slot-5.....	48
Figura 19-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ACO-13000 del Slot-6	49
Figura 20-3: Lógica para flanquear la transición TR1.....	53
Figura 21-3: Lógica SFC del proceso secuencial de la unidad G-802.....	54
Figura 22-3: Etapa de operación normal de la unidad G-802.....	55
Figura 23-3: DFB para pre-alarma, alarma y operación normal de Temperatura de Carcaza ...	56
Figura 24-3: DFB de operación normal.....	57
Figura 25-3: DFB de pre-larmas.....	57
Figura 26-3: DFB de alarmas.....	57
Figura 27-3: Alarma General de la unidad G-802	58
Figura 28-3: Ciclo de vida de un HMI.....	60
Figura 29-3: Directrices para selección de hardware.....	61
Figura 30-3: SMC- Configuración del DASMBTCP.3 – Parámetros.	62
Figura 31-3: SMC- Configuración del DASMBTCP.3 – Device Groups.	63
Figura 32-3: SMC- Configuración del DASMBTCP.3 – Device Items.	63
Figura 33-3: HMI-Pantalla de acceso.....	64
Figura 34-3: HMI-Pantalla de operación del G-802.....	65
Figura 35-3: HMI-Pantalla de Setpoints del G-802.....	66
Figura 36-3: HMI-Pantalla de tendencias del G-802.....	67
Figura 37-3: HMI-Pantalla de alarmas del G-802	68
Figura 1-4: Diagrama de bloques de flujo de datos	71
Figura 2-4: Modbus-Eth en Labview myRIO-2016.....	72
Figura 3-4: Almacenamiento de datos en Labview myRIO-2016	72
Figura 4-4: Relación de presiones de la unidad G-802.....	73
Figura 5-4: Relación entre RPM, Hz y mA de la G-802	74

Figura 6-4: Relación entre la entrada de 4-20mA al VFD y la presión de descarga de la unidad	75
Figura 7-4: Mapeo lineal entre el dominio X de la variable física y el dominio normalizado Y.	75
Figura 8-4: Dominio normalizado de las variables.....	77
Figura 9-4: Modelo NARX.....	78
Figura 10-4: Pasos de identificación con NARX.....	79
Figura 11-4: Diagrama de flujo para NARX	80
Figura 12-4: MSE de entrenamiento de la NARX para Presión de descarga	81
Figura 13-4: Regresiones lineales del entrenamiento de la NARX de Presión de descarga.	82
Figura 14-4: Comparación de salida de red Narx vs Presión de descarga normalizada.	83
Figura 15-4: Narx de la Presión de descarga.	84
Figura 16-4: MSE de entrenamiento de la NARX para Presión de succión	84
Figura 17-4: Regresiones lineales de entrenamiento de la NARX de Presión de succión.....	85
Figura 18-4: Comparación de salida de la Narx vs Presión de succión normalizada.	86
Figura 19-4: Narx de la Presión de succión.....	86
Figura 20-4: Estructura propuesta para control override de la G802.....	87
Figura 21-4: Planta G802 y su equivalente.....	87
Figura 22-4: Clonación base de un PI para presión de descarga.	88
Figura 23-4: Respuesta del PI a un escalón desde 0.625(17.9mA) a 0.8(18.8mA)	89
Figura 24-4: Estructura ANFIS de 5 capas	90
Figura 25-4: Diagrama de flujo para entrenamiento ANFIS de los controladores difusos.....	91
Figura 26-4: Estructura del sistema neurodifuso para la Presión-descarga.	91
Figura 27-4: Entrenamiento Anfis para Presión-descarga.	92
Figura 28-4: Curva de control de la Presión-descarga.....	93
Figura 29-4: Diagrama de bloques de la Presión-descarga.....	93
Figura 30-4: Simulación del controlador neurodifuso para presión de descarga.....	94
Figura 31-4: Curva de control de la Presión-succión.....	95
Figura 32-4: Entrenamiento Anfis para Presión-Succión.	95

Figura 33-4: Diagrama de bloques de la Presión-Succión.....	96
Figura 34-4: Simulación del controlador neurodifuso para presión de succión.....	97
Figura 35-4: Estructura override con controladores neurodifusos.....	97
Figura 36-4: Modificación del setpoint de Presión de descarga y traslape a controlador de succión	98
Figura 37-4: Control por succión ante una modificación del setpoint de Presión de descarga sin correlación con la succión.....	99
Figura 38-4: Disturbio en la Presión de descarga.	100
Figura 39-4: Valores reales a un escalón de 1200psig a 1300psig en descarga.....	100
Figura 1-5: Entrenamiento supervisado con redes Feed-Forward	103
Figura 2-5: Entrenamiento supervisado con redes NARX	104
Figura 3-5: Comparación de presiones de los controladores P+I y Anfis,	105

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo la implementación de la automatización de una unidad de bombeo de 600HP para derivados de petróleo y el diseño de un controlador entrenado con un sistema de inferencia difusa basado en redes adaptativas – ANFIS; el desarrollo, se centró en dos fases; la primera, la etapa de implementación de la automatización, donde se desarrolló P&ID, la selección de equipos en cada nivel del modelo CIM, la programación de los autómatas y el interfaz hombre maquina (HMI) con Wonderware System Platform, tomando como referencia el ciclo de vida ANSI/ISA-101.01,2015. Por su parte, la fase de diseño del controlador ANFIS mostró la metodología de diseño, iniciando con la captura de datos mediante LabView-MyRio; con esta información, se elaboró un modelo a través redes neuronales No-lineal auto-regresivas con entradas exógenas y por último el diseño del sistema de inferencia difusa basado en redes adaptativas sustentado en la clonación de controladores PI y estructurados en un control override a fin de mantener la unidad de bomba dentro de las presiones entrada-salida óptimos evitando el fenómeno “Slug-Flow” en el punto más alto del perfil altimétrico. Para probar la hipótesis se simuló la estructura override-neurodifusa considerando siempre el control por presión de descarga de la bomba; sin embargo, a la presencia de errores del setpoint por descarga toma el control por presión de succión; adicionalmente, fue capaz de soportar disturbios a la salida de la bomba de hasta -30psig considerando alguna falla en la instrumentación o algún fenómeno hidráulico que lo produzca, más allá de este valor se puede avistar como una rotura real en la trayectoria del ducto y por lo tanto se pierde el control. Finalmente se recomienda una investigación para el diseño de controladores neurodifusos tomando como referencia los puntos críticos del ducto a fin de mitigar sus fenómenos perjudiciales.

Palabra clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CONTROL AUTOMÁTICO>, <AUTOMATIZACIÓN DE PLANTAS INDUSTRIALES>, <MODELADO DE PLANTA CON REDES NEURONALES - NARX>, <DISEÑO DE CONTROLADORES NEURODIFUSOS - ANFIS>, <ESTRUCTURA AVANZADA DE CONTROLADORES - OVERRIDE>, <PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE DUCTOS>

SUMMARY

The present work had as objective the implementation of the automation of a 600HP pumping unit for oil derivatives and the controller design trained by Adaptive neuro fuzzy inference system- ANFIS; the development was focused on two phases; The first one, was the implementation of the automation, where the P & ID was development, the equipment selection by each level of the CIM model, the PLCs and the human machine interface (HMI) programming with Wonderware System Platform, took as reference the cycle of life ANSI / ISA-101.01.2015. Inasmuch as, the ANFIS controller design phase showed the design methodology, initiated with the data capture with Lab View-My Rio, with this data a plant model by neuronal network Non-Linear auto-regressive exogenous -NARX and ultimately was created, the adaptive neuro fuzzy inference system design was based on PI controllers cloning and arranged in an advance override structure with the aim of keeping the optimum inlet-outlet pressures of the pump avoiding the “Slug-Flow” hydraulic phenomenon in the higher point of altimetric profile. For testing the hypothesis, the override neuro-fuzzy structure was always simulated considering the control by outlet pressure of the pump; nevertheless, when there were errors in pump outlet pressure setpoint takes the control by pump inlet pressure; in addition to that, was able to soften the disturbance on the pump outlet up to -30psig considering them with a little instrumentation fault or hydraulic phenomenon, a greater reduction of pressure could be considered as a real ruptured pipeline; therefore the automatic control was lost . Finally, an investigation is recommended for the design of neuro-fuzzy controllers, taking as reference the critical points of the pipeline in order to mitigate their harmful phenomena.

Keywords: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <AUTOMATIC CONTROL>, <AUTOMATION OF INDUSTRIAL PLANTS>, <MODELING OF PLANTS WITH NEURONAL NETWORK- NARX>, <CONTROLLERS DESIGN NEURO-FUZZY - ANFIS>, <ADVANCE OVERRIDE CONTROL STRUCTURE>, <HYDRAULIC PARAMETERS OF PIPELINE>

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Planteamiento del problema

Las operaciones petroleras en el Ecuador iniciaron en junio de 1972 con un presupuesto de 27 millones de sucres y con el claro objetivo de preservar los recursos hidrocarburíferos, sin dejar de lado el desarrollo sustentable y sostenible del aspecto socioeconómico de la población ecuatoriana; hoy en día, los Oleoductos, Gaseoductos, Poliductos, Terminales y Refinerías constituyen la columna vertebral del dinamismo de la matriz productiva del país. (EP Petroecuador, 2012)

Según el Informe de Rendición de Cuentas de EPPETROECUADOR (2015), ha exportado 131,4 millones barriles de crudo dando una cifra de 5.477 millones de dólares americanos, una venta interna de derivados de 92.7 millones de barriles por un valor de 3.440 millones de dólares, 5,6 millones de barriles en exportación de derivados con una cifra de 256 millones de dólares y 56,3 millones de barriles de importación de derivados a un costo de 3.698 millones de dólares; según estas cifras observamos la gran importancia del petróleo y sus derivados dentro de la economía ecuatoriana.

Los oleoductos y poliductos constituyen el medio de transporte del producto dentro de un país, los mismos que cuentan con estaciones de bombeo y re-bombeo de tal manera que se puedan superar las condiciones hidráulicas del perfil altimétrico que presenta la tubería de gran distancia, como consecuencia se observa un problema de adaptabilidad de planta al cambio de bache de producto debido a su gravedad específica, temperatura climática, seguridad a causa de la MAOP

(máxima presión de operación) y SLUG FLOW y al empaquetamiento de baches que avanza dentro del ducto de gran distancia; para lo cual las unidades de bombeo deben cambiar continuamente su parametrización de tal manera que se adapten a las condiciones hidráulicas operativas del ducto.(Arias,L. & Zabala, 2006)

Tabla 1-1: Características del motor

Marca:	US-Motors	Modelo:	80BC03J3
Potencia:	600-HP	RMP:	3580
Voltaje:	460 VAC	PF:	93.5
Amperios:	627-A	SF:	1
Fases:	3	HZ:	60

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Debido a la necesidad de adaptabilidad de planta es prioritario que las unidades de bombeo al menos cuenten con la instrumentación de campo adecuada, capa de célula y capa de supervisión como parte de la pirámide de automatización que será implementado como paso previo al diseño de un control inteligente, de una unidad de bombeo con las características expresadas en la Tabla 1-1 y Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Características de la bomba

Tipo:		DMX	SIZE:	3X10-14 STG
MAWP:		2400 PSI	YEAR:	2010
MAWT:		55 °F	CAPACITY:	350 GPM
Hydr. Test Press:		3600 PSI	HEAD:	4195 FT
WEIGHT:		2087 KG	RPM:	3560

Realizado por: Villalba, Williams,2017

1.2 Formulación del problema

¿Permitirá un controlador sustentado en la estructura de un sistema de inferencia difusa basado en redes adaptativas – ANFIS, la adaptabilidad de la unidad de bombeo a los cambios del comportamiento hidráulico del ducto de larga distancia producto del cambio de baches?

1.3 Preguntas Directrices

¿Cómo una selección de la instrumentación adecuada permitirá incrementar seguridad en una unidad de bombeo a más de monitorear los parámetros hidráulicos de un ducto de gran distancia?

¿Cómo un controlador Quantum de la gama alta de Shneider-Electric dentro de una arquitectura RIO facilitará la adquisición de datos de campo y el control de actuadores de una Unidad de Bombeo?

¿Permitirá el software de Intouch-Archestra 2014R2 de Wonderware desarrollar una interface hombre máquina capaz de monitoreo los parámetros hidráulicos del ducto de gran distancia y el control de la unidad de bombeo?

¿A través de los datos adquiridos de los históricos de la automatización previa se logrará el entrenamiento adecuado del controlador ANFIS para la adaptabilidad de planta deseada?

¿Permitirá el diseño de un controlador ANFIS la adaptabilidad deseada a los cambios constantes de los parámetros hidráulicos de la tubería de gran distancia como efectos de cambios de baches y de temperatura que afectan a la gravedad específica del producto con el fin de preservar la seguridad del ducto a lo largo de su perfil altimétrico?

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo General:

Implementar la automatización en una unidad de bombeo de 600Hp y diseñar un controlador entrenado con un sistema de inferencia difusa basado en redes adaptativas – ANFIS para transporte de derivados de petróleo por poliducto de montaña.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Evaluar la instrumentación para el sistema de control básico de proceso – BPCS
- Implementar la automatización a través de un controlador programable Quantum dentro de una RIO en la capa de célula.
- Implementar un HMI para el control y monitoreo dentro de la capa de supervisión.
- Entrenar la red Neuronal de tal manera que se pueda adquirir un modelo de planta en base al comportamiento hidráulico del ducto.
- Diseñar y Simular un controlador entrenado con ANFIS mediante Matlab y evaluar los resultados.

1.5 Justificación de la investigación

El presente estudio tiene el objetivo de optimizar los procesos de bombeo en tuberías de gran distancia para el transporte de derivados de petróleo ya que se toman en consideración los parámetros dinámicos-hidráulicos del ducto y de la unidad de bombeo, esperando así obtener un control que se acople a las condiciones muy diversas de planta en relación a las variaciones de la gravedad específica del producto a causa de los cambios de baches y las condiciones de la influencia de la temperatura ambiental sobre el producto.

El proceso de la investigación está encaminado al cumplimiento de la siguiente lógica para el que se evaluará la instrumentación existente en la unidad de bombeo, luego se seleccionará el

controlador del BPCS para tener el dispositivo donde se desarrollará la lógica secuencial del proceso en la capa de célula, al mismo tiempo se desarrollará la reingeniería como el ruteo de cable desde la instrumentación hacia el BPCS para luego proseguir con el creación del HMI en capa de supervisión y finalmente estos datos se guardarán en los servidores de históricos (Wonderware historial server) con lo que se desea conseguir un modelo matemático del proceso para cada uno de los tipos de producto existentes (gasolina super, gasolina extra y diésel Premium). La variable fundamental del proceso hablando de seguridad es la presión la cual es dinámica y dependiente del perfil altimétrico del ducto y ésta se considerará como variable de salida que está estrechamente ligada a las revoluciones que entregue la unidad de bombeo y al bacheo existente aguas abajo del ducto.

Los beneficiarios serán todas aquellas empresas que se dediquen al transporte de derivados de petróleo.

Para la consecución de esta investigación se cuentan con todos los conocimientos académicos teóricos y prácticos, así como el recurso humano y económico para conseguir el objetivo propuesto al inicio de la misma.

1.6 Hipótesis General

El diseño de un controlador ANFIS permitirá la adaptabilidad de la unidad de bombeo, a las modificaciones de parámetros dinámicos hidráulicos del poliducto de montaña producto del cambio de baches y empaquetamiento de diferentes derivados de petróleo.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Aspectos Hidráulicos de un ducto de gran distancia

2.1.1 Filosofía del funcionamiento de un poliducto

Un Poliducto de Montaña está conformado por una estación cabecera, estaciones de re-bombear que incrementan presión mediante unidades de bombeo a fin de compensar la pérdida de energía a causa de la fricción del líquido en las paredes de la tubería y una estación reductora de presión de llegada; el envío de los productos lo hacen dependiendo de la demanda programada y viajan entre las estaciones por baches o lotes separados entre ellos por lo general con jet-fuel a lo cual se lo llama interfaz, la secuencia de los baches dependen de su compatibilidad de densidad como se observa en la Figura 1-2. (Arias,L. & Zabala, 2006)

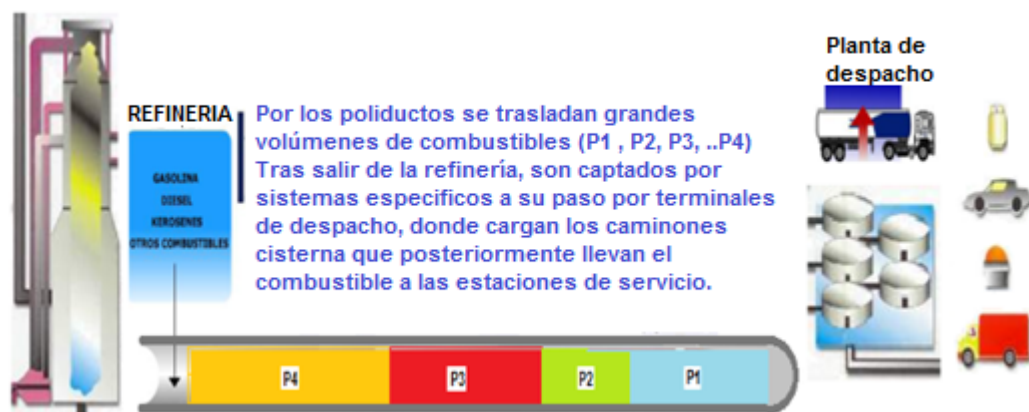


Figura 1-2: Esquema de funcionamiento de un Poliducto de montaña.
Fuente: (Gonzalez, 2008)

Para el caso de estudio, la zona de influencia es el Poliducto Ambato Riobamba, el cual fue diseñado con el propósito de suministrar productos limpios a la ciudad de Riobamba y su zona de influencia a través de un ducto de 6" de diámetro y una longitud de 49,64 km.

La Estación de Bombeo de Ambato, rebombea los productos limpios provenientes del Poliducto Quito – Ambato hacia el Terminal de Productos Limpios de Riobamba cuyas operaciones son supervisadas, monitoreadas y controladas por personal de la EPPETROECUADOR con la ayuda del sistemas SCADA de cada estación.

Las condiciones de presión de la G802 requiere de un valor de presión superior a 5.77 PSIG que es el NPSH requerido por la bomba para lo cual es necesario disponer de un rango de presión entre 50 y 300 PSI para diesel y gasolinas para también superar el NPSH del sistema de 16.52PSIG, bajo estas condiciones es posible alinear las válvulas motorizadas a fin de disponer las condiciones operativas de la bomba; cabe recalcar que la estación de bombeo Ambato solo opera con una unidad de bombeo a la vez, cuya condición dinámica de presión de succión mínima es de 50 PSI y la presión de descarga óptimo de 1520 PSI con un caudal promedio de 516.71-Bph [21702GPH] para cada producto.

La unidad de bombeo G-802 consta de un Motor + bomba centrífuga cuya velocidad de rotación es controlada por un variador de frecuencia VFD-802, el mismo que se controla de manera Remota desde el HMI hacia el controlador Quantum y por una de sus salidas análogas de 4-20MA hacia VFD-802 para su set-point de la velocidad de operación.

Los elementos de protección de la unidad de bombeo está provisto de las siguientes alarmas:

Detectores de vibración VS-190107-A, VS-190107-B, con sus correspondientes prealarmas-H y sus alarmas HH (High-High).

Cuatro sensores de temperatura de la bomba con sus correspondientes pre-alarmas y alarmas de temperatura: TE-190107-A, TE-190107-B, TE-190107-C y TE-190107-D.

Cinco sensores de temperatura del motor con sus correspondientes pre-alarmas y alarmas TE-191107-A, TE-191107-B, TE-191107-C, TE-191107-D, TE-191107-E

Dos interruptores de nivel, LSH-190107-A; LSH-190107-B; con sus correspondientes alarmas de nivel LL.(Low-Low).

Dos interruptores para nivel de refrigerante de las torres de refrigeración A/B , LSH-190107-A y LSH-190107-B, con sus correspondientes alarmas de nivel LL.(Low-Low)

Dos switches de las torres de enfriamiento PS-190107-A y PS-190107-B.

Dos válvulas pertenecientes a la unidad de bombeo: MOV-190107-A y MOV-190107-B con sus respectivos estados de posición.

2.1.2 Perfil Altimétrico

Es la ruta de la tubería a lo largo de su trayectoria referencia con respecto al nivel del mar (MSNM), estos datos son localizados mediante GPS en unidades UTM (Universal Transverse Mercator).(Arias,L. & Zabala, 2006)

2.1.3 Curvas características de un sistema de bombeo

Los poliductos de montaña en el Ecuador atraviesan la geografía Andina para lo cual es preponderante incrementar presión desde las estaciones más bajas para poder sobrepasar los puntos más elevados del perfil altimétrico ganando así energía potencial, en el descenso de la cordillera esta se transforma en energía cinética, viendo la necesidad de disponer una estación reductora de presión antes del almacenamiento en tanques, es por ello que la hidráulica de ductos se combinan las curvas características del sistema de bombeo con las curvas de las bombas a fin de obtener el punto de operación de un sistema de bombeo como se detalla en la Figura 2-2 .

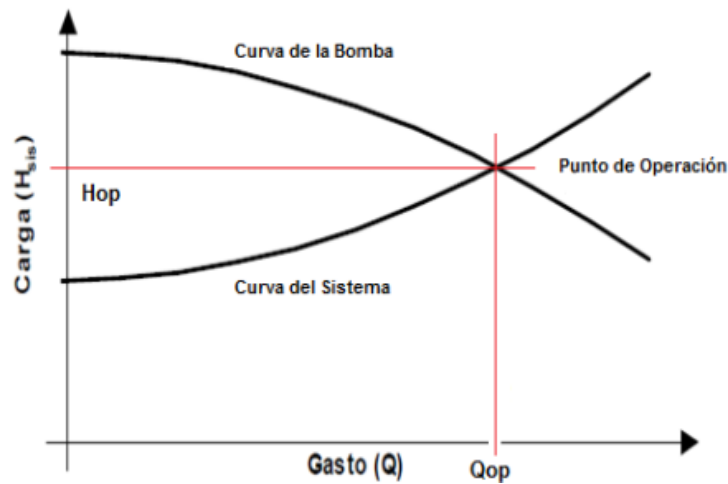


Figura 2-2: Punto de operación de un sistema de bombeo
Fuente: (Arias,L. & Zabala, 2006)

2.2 Aspectos de automatización de procesos industriales

2.2.1 Identificación del tipo de proceso de producción

Dentro de los tipos de procesos industriales y operación de plantas se puede diferenciar tres grandes configuraciones de operación de planta como son los procesos continuos, procesos discretos o lotes y procesos mixtos, para el caso de procesos de bombeo de derivados de petróleo se podría considerar como un procesos mixto debido que su flujo es continuo monitoreado por variables análogas pero a la vez tiene un componente discreto ya que se separa el producto dependiendo de su compatibilidad de densidad en baches o lotes de transporte .

2.2.2 Pirámide de automatización CIM

La pirámide CIM (Computer Integrated Manufacturing) está conformada por cuatro niveles de gestión (Campo, Control, MES y ERP) , cuyas redes de comunicación, permiten la escalabilidad de nueva tecnología, integración completa del proceso productivo desde la instrumentación de campo hasta la gerenciamiento de planta, reducción del tiempo muertos, reducción de tiempos de mantenimiento, reducción de costos por mantenimiento mejorativo y mayor robustez y control del sistema.

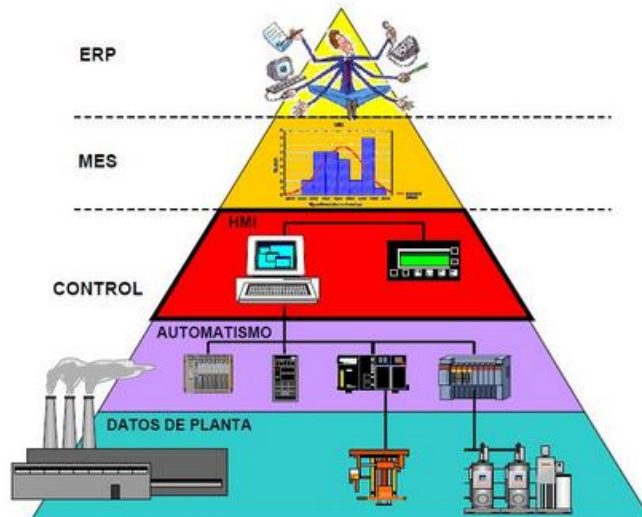


Figura 3-2: Pirámide de automatización CIM
Fuente: (Wilson Capote,2010)

2.2.3 Instrumentación de una unidad de bombeo

Los principales parámetros de una unidad de bombeo y un poliducto de montaña es la temperatura, presión, caudal, velocidad, nivel, densidad de producto derivado de petróleo en gados API o la gravedad específica cuya selección de la instrumentación adecuada dependerá del proceso en el cual se definirá parámetros de selección como: Precisión, Exactitud, Repetitividad, Turndown, Sensibilidad, Histéresis, Rango, Resolución, Linealidad, Clasificación y División de zonas según la NPFA-70_Artículo 500 y NPFA-30 con certificación UL, FM o equivalentes, criterios de selección de resistencia a choques y vibración, ajuste de amortiguamiento (Damping) , tipos de conexionado mecánico al proceso, estructura de soporte, material del instrumento resistente a la abrasión, corrosión y erosión en concordancia a la posición geográfica de su instalación, Tipo de certificación IP, criterios de selección para humedad relativa, número de dígitos en los display en caso de transmisores indicadores, criterios de filtrado que debe cumplir la instrumentación para evitar interferencias por señales de radiofrecuencia y electromagnéticas, el rango de temperatura de operación del instrumento y más criterios que faciliten la selección de la instrumentación acorde al proceso y lazo de control.

Por otra parte, el sistema instrumentado de seguridad SIS a más de los parámetros anteriores detallara el nivel de integridad y seguridad SIL del proceso en concatenación con los estudios pertinentes al proceso de análisis de riesgos -PHA.

2.2.4 *Autómatas programables industriales*

El concepto de autómatas programables aparece con la finalidad de solucionar problemas de adaptabilidad y flexibilidad a los cambios de modelos de automóviles que la empresa General Motors pretendía lanzar al mercado en la década de los 60, de ahí en adelante el impulso tecnológico a los autómatas programables ha venido incrementando y unos de las nuevas bondades que ofrecen en la actualidad es una gama de lenguajes de programación bajo norma IEC 61131-3 , Lenguaje escalera (LD - Ladder Diagram), Diagrama de bloque de funciones (FBD - Function Block Diagram), Texto estructurado (ST - Structured Text), Lista de instrucciones (IL - Instruction List) y Bloques de función secuenciales (SFC - Sequential Function Chart); también disponen de modularidad, capacidad de adaptabilidad a diferentes protocolos de comunicación, estampas de tiempo y más versatilidades que facilitan su selección de acuerdo al proceso.(Villagomez, 2005)

2.2.5 *El Grafcet*

Esta herramienta de estructura de proceso, tiene la finalidad de organizar el mismo de forma secuencial si el proceso en estudio lo permite , considerando etapas, transiciones, acciones, arcos, saltos, divergencias en OR/AND, convergencias en OR/AND y macro etapas cuya aplicación en procesos de bombeo es idónea ya que las etapas de marcha y paro, permiten una estructura secuencial.

2.2.6 *Interfaz Hombre Máquina*

Se lo puede conceptualizar como una ventana de visualización del proceso, en el cual se detallan señales del mismo, las mismas que pueden ser monitoreadas y controladas por el operador; Los HMI comúnmente conocidos en el ámbito de los automatismos adquieren señales desde los PLC`s(Controladores Lógicos Programables), desde RTU (Unidades Remotas I/O), VFD (Variadores de frecuencia) y más dispositivos que sean parte del proceso y dispongan de un protocolo de comunicación compatible con el HMI.

2.2.7 *Sistemas SCADA*

Un SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), hace hincapié en la supervisión y el control de la planta a través de un control central denominada estación Maestra y varias unidades remotas que adquieren datos de campo.

2.3 Aspectos de Control Inteligente

2.3.1 *La aplicabilidad del control Inteligente a los sistemas de bombeo*

Los PID`s si bien es cierto son controladores robustos y de gran aplicabilidad en la industrial estos solamente son aplicables a plantas lineales si se los realiza de manera individual, razón por la cual, al tener el precepto de que la plata en los cambio de bache se producen no linealidades, se enfoca en un estudio de optimización del control de velocidad de motores de inducción que es la parte fundamental para dicha meta; es así que (Jadhav,S. & Jaladi, 2016) proponen es su investigación, la comparación de métodos de control inteligente para un Space Vector Modulated Direct Torque Control – SVM_DTC, estos métodos de control a través de técnicas de Inteligencia Artificial (AI) Difuso, Difuso hibrido y redes Neuronames(ANN) han podido diezmar los efectos de las no linealidades de las plantas y sobre todo los efectos de disturbios; otra investigación preponderante para este caso de estudio tiene que ver con la optimización del transporte de Gas usando métodos combinados de control como son la evolución diferencial integrada(DE), los algoritmos genéticos(GA) y las redes híbridas de Petri (HPN) el cual fue desarrollado por (Malamura,E. & Murata, 2016) cuya principal ventaja de su propuesta es reducir la complejidad de la formulación por causa de un sistema con restricciones no-lineales , parámetros híbridos continuos-discretos y el impacto de las discontinuidades por la conmutación automática de la red de componentes. Estas investigaciones son la premisa del planteamiento del problema en la búsqueda de un controlador Neuro-Difuso que se adapte a las complejidades del proceso de transporte de productos limpios por ducto de montaña.

2.3.2 Aspectos Básicos de los sistemas Neuro-Difusos

Los sistemas Neuro-Difusos se podría definir como la concatenación de los sistemas neuronales artificiales y los sistemas difusos, con la finalidad de compensar la debilidad del uno con las fortalezas del otro, ya que su estructura permite la aplicación de métodos cualitativos y cuantitativos en la elaboración de modelos en el aprendizaje, en la fase de funcionamiento y en la realimentación de conocimiento; todo esto hace que se almacene una serie de ventajas como la interpretación lingüística, el autoaprendizaje, la interpolación entre otras; pero también existe limitaciones que serán analizados posteriormente en la profundización de estos sistemas; por ahora daremos una vista general de los sistemas difusos y neuronales como ingrediente primordial de un control Neuro-Difuso.

2.3.2.1 Sistemas de inferencia Difusa

Los sistemas de inferencia difusa aparecen con el planteamiento del Dr. Zadeh en 1965 sobre la teoría de conjuntos difusos, lógica difusa e inferencia difusa entre otros; esto a su vez ha encontrado aplicabilidad de manera multidisciplinaria, ya que una de sus principales ventajas, es poder tratar de manera efectiva con las no-lineales y las ambigüedades de los sistemas, basándose en el conocimiento y la experiencia de un operador humano, esto soporta el diseño de un controlador que emula el comportamiento humano a la hora de controlar una planta sin necesidad de conocer el modelo matemático de la misma; para ello es esencial discernir la temática de los conjuntos difusos que podría entenderse como una extensión de los conjuntos clásicos o conjuntos claros.

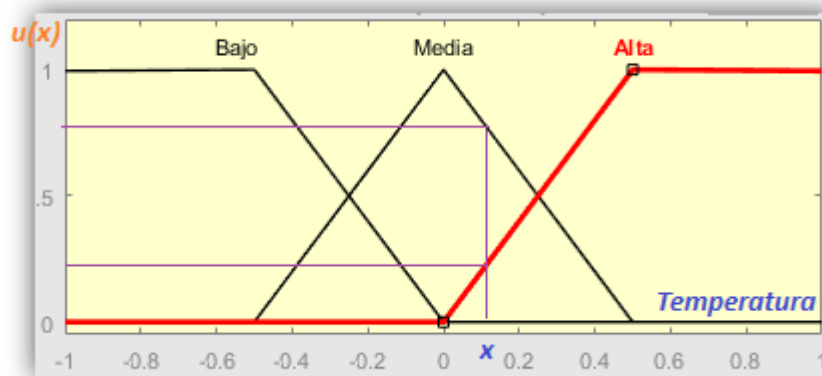


Figura 4-2: Generalidades de un sistema de inferencia difuso “Temperatura” .
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

La Figura 4-2 se muestra un ejemplo con el cual se describe el *Universo de Discurso* “Temperatura” cuyos *Conjuntos Difusos* baja, media y alta, disponen de una *Variable Lingüística* (x) que extrae su grado de pertenencia (entre 0 y 1) dentro del conjunto difuso Media, caracterizado por la etiqueta A en las *Función de Membresía* $u_A(x)$, el mismo que puede ser expresado matemáticamente como lo manifiesta la ecuación 2.1

$$A = \{(x, u_A(x)) | x \in X\} \quad (2.1)$$

Las funciones de membresía disponen de una variedad de formas (trapezoidal, triangular, singleton, S) cuyo uso dependerá del análisis de la variable en mención; por otra parte, a igual que los conjuntos claros, los difusos también requiere de operadores para su tratamiento, que entre las principales se encuentran:

El complemento $u_{\bar{A}} = 1 - u_A(x) \quad (2.2)$

El operador lógico OR de Lukasiewicz $u_{A \cup B} = \max[u_A(x), u_B(x)] \quad (2.3)$

El operador lógico AND $u_{A \cap B} = \min[u_A(x), u_B(x)] \quad (2.4)$

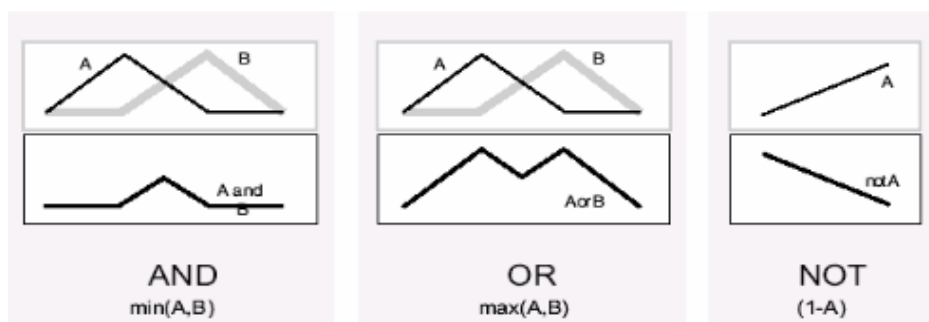


Figura 5-2: Operaciones lógicas de conjuntos difusos
Fuente: (Samuel Oporto Díaz, 2008)

2.3.2.2 Fuzzificación

Es el proceso en el que se convierte la variable medida del proceso ($x = 0.1$) en un valor de pertenencia, caracterizada por una función de membresía $u_A(x)$ dentro de un conjunto difuso; por ejemplo, en la Figura 4-2, la variable x tiene un grado de pertenencia de $u_{Alta}(0.1) = 0.25$ dentro del conjunto difuso 'Alta' y de $u_{Media}(0.1) = 0.75$ al conjunto 'Media'.

2.3.2.3 Inferencia Difusa

La inferencia difusa se sustenta en reglas difusas *Si ... Entonces* y en el razonamiento difuso con operadores AND/OR, por ejemplo al tener dos variables de entrada o del antecedente x_1 y x_2 que se vincula a los conjuntos difusos A y B respectivamente, entonces la variable de salida o consecuente es z_1 ; es decir que se obtiene un conjunto difuso de salida por cada regla, que finalmente se unifican con las demás salidas de reglas y la resultante sería la salida del sistema.

SI x_1 es A AND/OR x_2 es B ENTONCES z_1

Para ello la inferencia difusa dispone de varias metodologías de inferencia como proponen (Bravo, Y. & Garcia, 2006), que para nuestro estudio se da hincapié en el método Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

2.3.2.4 Modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

De manera típica el modelo TSK tiene la regla difusa estructurada de la siguiente manera:

SI x_1 es A AND/OR x_2 es B ENTONCES $z_1=f(x_1,x_2)$

Donde A y B son conjuntos difusos de la entrada y el polinomio $z1=f(x1,x2)$ es una combinación lineal de las entradas, dando a la salida o consecuentemente una función clara, el mismo que define el orden del modelo TKS.

Si el polinomio $z1=f(x1,x2)$ es una constante entonces el modelo TKS es de orden 0.

Si el polinomio $z1=f(x1,x2)$ es de primer grado entonces el modelo TKS es de primer orden.

Como se observa en la Figura 6-2 la salida integral es el promedio ponderado y este a su vez es un valor claro, consecuentemente ya no existe la necesidad de la etapa de Defuzzificación como en el método de Mandani.(Bravo,Y. & Garcia, 2006)

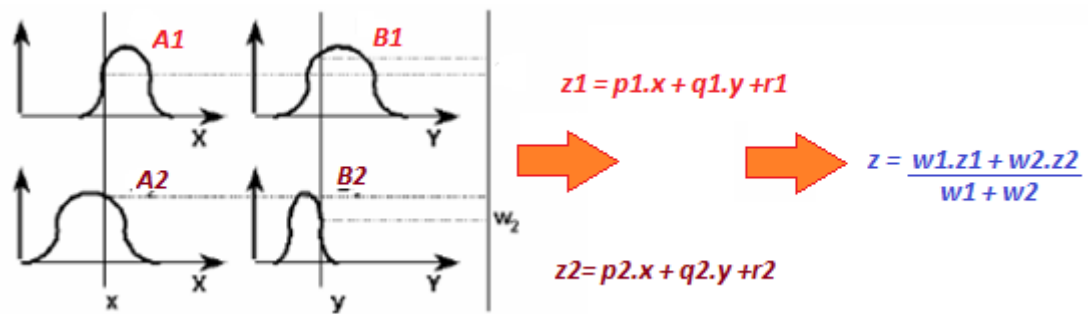


Figura 6-2: Sistema Difuso tipo TSK de primer orden.
 Fuente: (Bravo,Y. & Garcia, 2006)

2.3.3 Redes Neuronales Artificiales -RNA

Las redes neuronales artificiales es un medio computacional que emula el funcionamiento de una red neuronal biológica, las mismas que se interconectan de forma masiva en paralelo y se organizan de manera jerárquica para tratar de interactuar con elementos externos.

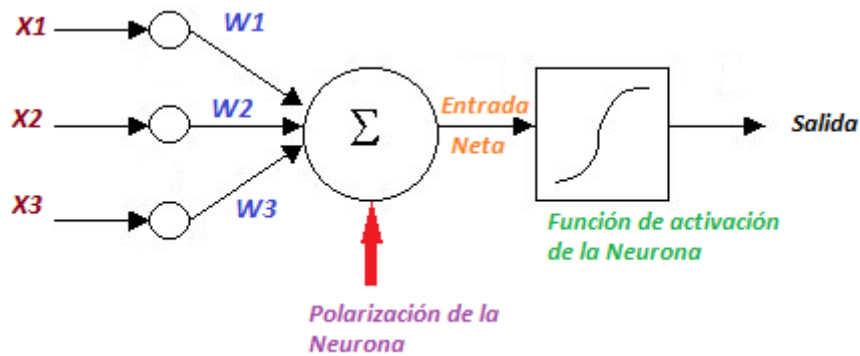


Figura 7-2: Estructura básica de una neurona artificial.
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

La estructura básica del funcionamiento (Figura 7-2) de una neurona es la sumatoria del producto de sus Entradas (x_i) con su peso sináptico (w_j), si este supera la Polarización de la Neurona entonces se obtendrá la Entrada Neta que será evaluada en la Función de Activación de la Neurona para emitir la Salida que a su vez será la entrada de otra neurona; de esta manera se da origen a la estructura de las redes neuronales por capas y que el estudio de las mismas no se pormenorizara en esta tesis, más bien se enfocara en una de sus ventajas, como es la capacidad del aprendizaje adaptativo, que es el fundamento del conocimiento de redes adaptativas, debido a que su comportamiento está en relación a los algoritmos de aprendizaje ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*); cuyo funcionamiento global de entrada/salida depende de los parámetros modificables y de la configuración de sus nodos conectados por enlace; adicionalmente la regla de aprendizaje es empleada con pares ordenados de datos de entrada /salida, es decir que para cada dato de entrada se establece su respuesta de salida, a esto se le denomina regla de aprendizaje supervisada, consecuentemente la red será de aprendizaje supervisado; contrariamente, si solamente se utiliza un vector de entrada estaremos en presencia de un método de aprendizaje sin supervisión a lo que se le califica como una red de aprendizaje no supervisada.

La metodología del Gradiente Decreciente y el Estimador de Mínimos Cuadrados – LSE (Bravo, Y. & Garcia, 2006), son las técnicas más frecuentes de aprendizaje para redes adaptativas, que son la raíz del aprendizaje híbrido y consecuentemente, el procedimiento para ajustar la parametrización de la arquitectura ANFIS, que es el enfoque neurálgico de la presente investigación..

2.3.3.1 Funciones de activación de RNA

Las funciones de activación más usadas conjuntamente con su sustento matemático para redes neuronales artificiales se resumen en la Figura 8-2.

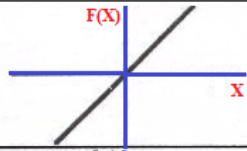
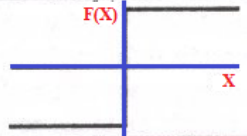
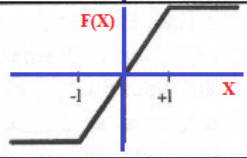
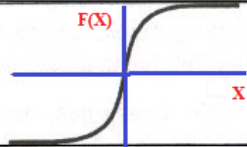
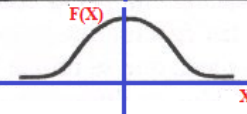
	Formula de la Función	Rango	Gráfica de la Función
Lineal "Purelin"	$y = x$	$[-\infty, +\infty]$	
Escalon	$y = \text{sing}(x)$ $y = H(x)$	$\{-1, +1\}$ $\{0, +1\}$	
Lineal a tramos	$y = \begin{cases} -1; & \text{si } x < -1 \\ x, & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ +1; & \text{si } x > 1 \end{cases}$	$[-1, +1]$	
Sigmoide "Tansig"	$y = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ $y = \text{tgh}(x)$	$[0, +1]$ $[-1, +1]$	
Gaussiana	$y = Ae^{-Bx^2}$	$[0, +1]$	

Figura 8-2: Funciones de activación de RNA.
Fuente: (Ponce, 2010)

2.3.3.2 Redes neuronales Perceptrón Multicapa – MLP

Las redes neuronales MLP más conocidas como feed-forward son la generalización de la red perceptrón simple cuya utilización es para casos con problemas de separabilidad lineal, donde la agrupación de las neuronas se lo hace en tres tipos de capas: la capa de entrada quien recibe las señales patrón, las capas ocultas donde las neuronas realizan un procesamiento no lineal de los patrones recibidos de la capa anterior y la capa de salida que es la salida de la red; las funciones de activación en las capas ocultas pueden ser sigmoide "tansig" o tangente hiperbólica "logsig", mientras que la capa de salida es lineal "purelin".

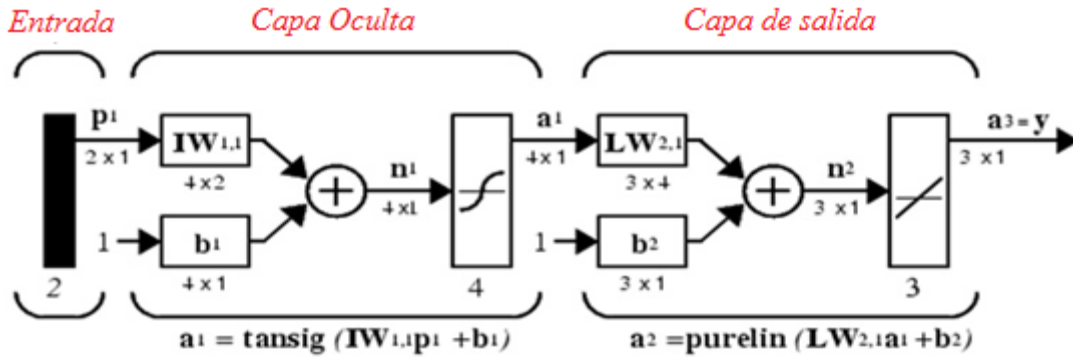


Figura 9-2: Red neuronal Perceptron Multicapa.
Fuente: (Ponce, 2010)

2.3.3.3 Entrenamiento de una RNA con Regulación bayesiana

Es un criterio de parada del entrenamiento por redes neuronales que modifica la función de costo que normalmente es el MSE_d de la ecuación 2.5 que hace referencia al conjunto de errores de los datos patrón de prueba.

$$Mse_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (2.5)$$

La modificación propone la adición de un MSE_w que incluye el efecto de la suma de los cuadrados de los pesos de la red como lo detalla la ecuación 2.6

$$Mse_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_w^2 \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la función de costo modificada que emplea el método de regulación bayesiana se expresa en la ecuación 2.7 cuyo propósito es mejorar la capacidad de generalización del modelo.

$$Mse = \beta \cdot Mse_d + \alpha \cdot Mse_w \quad (2.7)$$

Donde β y α son parámetros a ser ajustados según la metodología de MacKay donde los pesos y las polarizaciones son variables aleatorias que siguen generalmente una distribución Gaussiana y relacionados con las varianzas desconocidas asociadas a estas distribuciones. (Pérez, 2013)

2.3.3.4 *Arquitectura Adaptive Network based Fuzzy Inference System – ANFIS*

La estructura ANFIS puede entender como un modelo híbrido, donde las reglas se aplican siguiendo una configuración de tipo neuronal, a lo cual se podría puntualizar como una red neuronal con parámetros difusos. Para facilitar la interpretación de la estructura ANFIS (Figura 24-4), se presenta un modelo simplificado de 2 entradas cuyo propósito es diseñar y determinar los parámetros del sistema difuso basado en pares ordenados de Entradas/Salidas de una planta mediante un algoritmo de retro propagación, consecuentemente se puede esquematizar el auto aprendizaje del sistema difuso mediante las cinco capas de la estructura ANFIS según (Kusagur, A. , Kodad, 2010), donde cada capa representa una operación del mecanismo de inferencia difusa.

Capa 1: En esta capa las variables de entrada se fuzzifican, determinado el grado de membresía con el cual las variables de entrada satisfacen el termino lingüístico asociado a cada nodo adaptativo.

$$O_i^1 = A_i(x) \quad (2.8)$$

Modelo Takagi , Sugeno , Kang

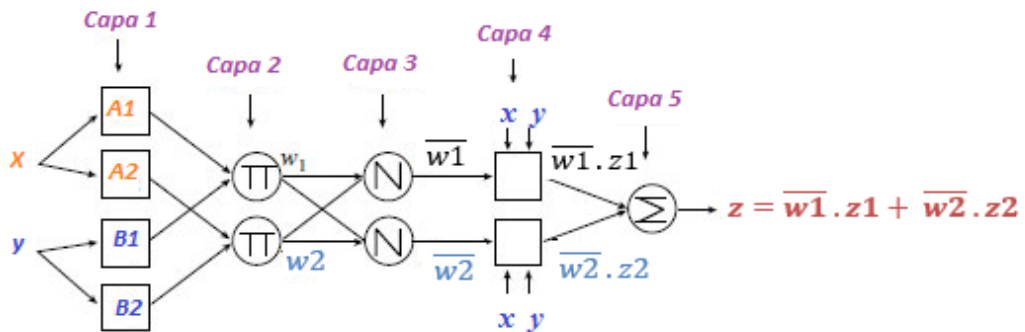
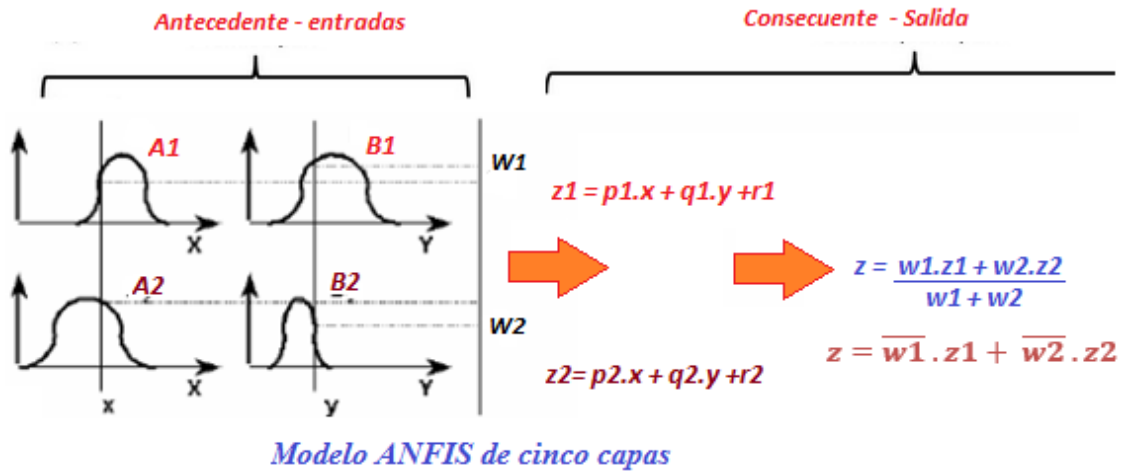


Figura 10-2: Comparación del modelo TKS y la Estructura ANFIS de 5 capas
 Fuente : (Saedi, A. , Wu, H & Handroos, 2013)

Capa 2: En esta capa se lleva a cabo el proceso de operación de la Norma T $u_{A_i \cap B_i} = \min[u_{A_i}(x), u_{B_i}(y)]$, donde cada nodo fijo calcula el grado de activación de la regla asociada a dicho nodo

$$O_i^2 = w_i(x) = A_i(x).B_i(x), \text{ donde } i = 1,2, \dots \quad (2.9)$$

Capa 3: Los nodos fijos de esta capa se representa con una letra N cuyo significado es la normalización de los grados de activación, obteniendo en la salida el grado de activación normalizado.

$$O_i^3 = \bar{w}_i(x) = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \text{ donde } i = 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

Capa 4: La salida de los nodos adaptables de la capa 4, compete al producto entre el grado de intensidad normalizado $\bar{w}_i(x)$ de la capa 3 y la parametrización $[p_i; q_i; r_i]$ del polinomio de salida Z_i .

$$O_i^4 = \bar{w}_i \cdot z_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i) \quad (2.11)$$

Capa 5: Esta capa solo dispone de un solo nodo fijo cuya funcionalidad es entregar a la salida la sumatoria todas sus entradas.

$$O_i^5 = \sum_i \bar{w}_i \cdot z_i = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i} \quad (2.12)$$

De esta manera se dispone de una red adaptativa para la optimización del modelo neurodifuso.

CAPÍTULO III

3 AUTOMATIZACIÓN DE LA UNIDAD DE BOMBEO DE 600HP

Dentro del planteamiento está el analizar la infraestructura existente, para lo cual se ha desarrollado una arquitectura de control (*Anexo A*) que será analizada por capas tomando como base una arquitectura CIM.

La razón por la que se lleva a cabo este proceso es por la cantidad de suscitados eventos de falla con los equipos durante la operación de planta, donde la pérdida continua de las comunicaciones entre controladores de la capa de célula y el interface con el operador ha puesto en riesgo la continuidad operativa del poliducto a más de las vidas y carreras profesionales de quienes tenemos responsabilidad sobre el mismo. Otro factor importante, es la falta de asistencia técnica en el país sobre la marca Foxboro y la gran diferencia de sus lenguajes de programación quienes no se rigen al estándar IEC-61131-3.

3.1 Capa de proceso

Dentro de la capa de proceso detallada en el Anexo B, se encuentra toda la instrumentación que gobierna el G-802, sus señales de proceso, pre-alarmas, alarmas y shutdown, la mismas que se analizan por cada capa de proceso; adicionalmente la Figura 1-3 localiza los equipos mayores que son la base de la instrumentación requerida dentro de la automatización de la unidad objeto de estudio.

Tabla 1-3: Ubicación física de los elementos principales de la unidad.

ITEM	DESCRIPCIÓN
1	Motor eléctrico de 600HP/480VAC/3fases/60Hz
2	Bomba centrífuga multi-etapa
3	PIT de succión de la bomba
4	PIT de descargada
5	MOV de succión de la bomba
6	MOV de descarga de la bomba
7	Rodamiento interior del motor
8	Rodamiento exterior del motor

9	Cojinete interior de la Bomba
10	Cojinete exterior de la Bomba
11	Cojinete de empuje de la Bomba
12	Torre de enfriamiento A
13	Torre de enfriamiento B

Realizado por: Villalba, Williams,2017

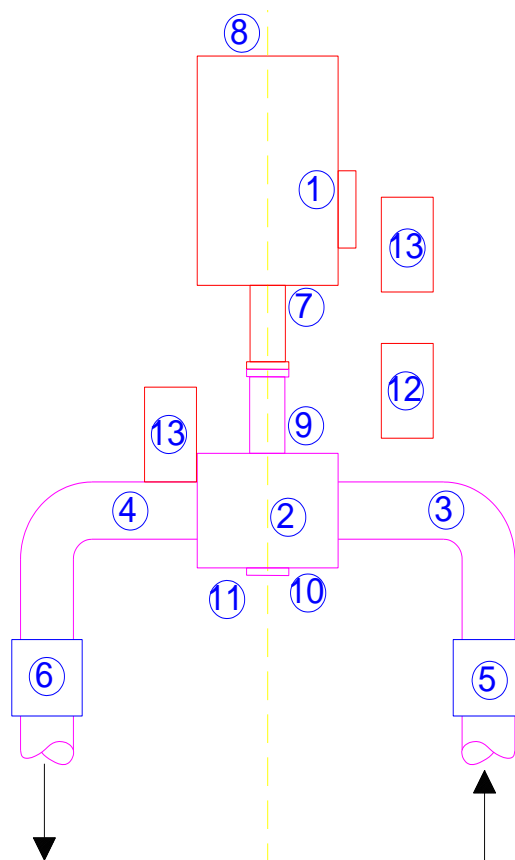


Figura 1-3: Localización de los elementos del G-802

Realizado por: Villalba, Williams,2017

3.1.1 Instrumentación para medición de presión de la unidad G-802

El principal parámetro hidráulico a tomar en consideración es la presión tanto a la succión de la bomba (PIT_190107_A) como a la descarga de la misma (PIT_190107_B); los transmisores de

presión fueron seleccionados en la etapa de ingeniería de detalle en relación a las condiciones del proceso de la Tabla 2-3 y Tabla 3-3 para la succión y la para la presión de descarga.

Tabla 2-3: Condiciones de presión del proceso en la succión de la bomba G-802

CONDICIONES DEL PROCESO		Mínimo	Normal	Máximo	Unidad
	Presión	0	300	900	psig
	Temperatura del proceso	15	17	18.3	C
	Temperatura Ambiente	14	20	34	C

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Tabla 3-3: Condiciones de presión del proceso en la descarga de la bomba G-802

CONDICIONES DEL PROCESO		Mínimo	Normal	Máximo	Unidad
	Presión	0	1520	2200	psig
	Temperatura del proceso	15	17	18.3	C
	Temperatura Ambiente	14	20	34	C

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Tabla 4-3: Características técnicas del PIT de succión del G-802

TRANSMISOR DE PRESIÓN DE SUCCIÓN	Tag No.	PIT_190107_A				
	Servicio	Transmisor de Presión, Succión bomba G-802, Ambato				
	Fabricante	Rosemount, Inc.				
	Modelo No.	3051TG4A2B21AE5D4M5T1Q4S5QTHR5				
	Tipo de transmisor	Medición de Presión				
	Span Calibrado	0	a	900	psig	
	Rango de ajuste	0	a	4000	psi	
	Señal de salida	4-20 mA + HART				

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Basado en las condiciones del proceso la ingeniería de detalle selecciono la instrumentación de presión (Tabla 4-3 y Tabla 5-3), los cuales fueron calibradas en fabrica su rango de span y verificadas en planta mediante el calibrador de procesos Fluke-754; otro de los parámetros

importantes a considerar es la clasificación y división de zonas según la NEC-500 que para el caso de estudio se lo ha definido en Clase I – División II de los Grupos B,C,D; a lo cual la instrumentación seleccionado cumple con este requerimiento.

Tabla 5-3: Características técnicas del PIT de descarga del G-802

TRANSMISOR DE PRESIÓN DE DESCARGA	Tag No.	PIT_190107_B				
	Servicio	Transmisor de Presión, descarga bomba G-802, Ambato				
	Fabricante	Rosemount, Inc.				
	Modelo No.	3051TG4A2B21AE5D4M5T1Q4S5QTHR5				
	Tipo de transmisor	Medición de Presión				
	Span Calibrado	0	a	2200	psig	
	Rango de ajuste	0	a	4000	psi	
	Señal de salida	4-20 mA + HART				

Realizado por: Villalba, Williams,2017

3.1.2 Instrumentación para medición de Temperatura de la unidad G-802

La medición de temperatura se lo realiza a través de PT-100 (100Ω a 0°C), de diferentes dimensiones acorde al termowell; estas PT-100 son ruteadas con cable armado desde sus cajas de conexión hacia el tablero de I/O del grupo, la compensación se lo hace con tres cables.

3.1.3 Instrumentación para medición de vibración de la unidad G-802

Tabla 6-3: Características técnicas de los transmisores de vibración de la unidad G-802

TRANSMISORES DE VIBRACIÓN	Tag No.	VT_190107_A VT_190107_B				
	Servicio	Transmisor de vibración, lado motor y lado bomba				
	Fabricante	Metrix Instruments CO.				
	Modelo No.	ST5484E-121-132-00				
	Tipo de transmisor	Medición de Vibración				
	Span Calibrado	0	a	1	IPS PK or 25.4mm/s	
	Frecuencia de respuesta	2	a	1500	HZ -3db	
	Señal de salida	4-20 mA				

Realizado por: Villalba, Williams,2017

La unidad G-802 dispone de instrumentación para la medición de vibraciones presente en el acople motor-bomba , estas señales se adquieren a través del equipo ST5484E, que es un transmisor de velocidad sísmico auto contenido, el mismo que se compone de un acelerómetro piezoeléctrico, un integrador de señales, un detector de picos RMS, y una señal de salida de 4-20mA proporcional a la amplitud de la aceleración integrada. (Metrixvibration, 2013)

3.1.4 Instrumentación para medición de flujo y densidad de la unidad G-802

Tabla 7-3: Características técnicas de los medidores máscicos

MEDICIÓN DE FLUJO	Tag No.				
	Servicio	Medición de flujo máscico			
	Fabricante	Emerson / MicroMotion,INC			
	Modelo No.	CMF300M356N2BASZZZ			
	Tipo de transmisor	Sensor de flujo máscico			
	D10	K1	10489.7		
	D21	K2	12484.35		
	Señal de salida	Hz			

Realizado por: Villalba, Williams,2017

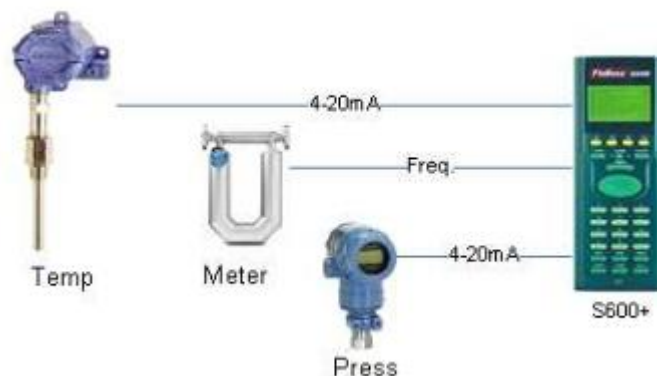


Figura 2-3: Diagrama de configuración típica de una computadora de flujo.
Fuente: (Emerson, 2015)

La estación de bombeo cuenta con una unidad de medición dinámica al ingreso de la estación, está a su vez comprende de filtros de entrada, válvulas más actuadores, elementos de medición de presión y temperatura; pero el principal elemento se basa en la medición de flujo másico y densidad API a través del principio de Coriolis como se detalla en el apartado de medición de flujo del capítulo 2; las señales de la unidad de medición se envían a computador de flujo S600 (Figura 2-3), donde se realizan todos los cálculos concernientes a flujos y volúmenes, esto a su vez a través de la red Modbus-ETH puede tener acceso a las siguientes etapas de la pirámide de automatización como visualización mas no como elementos de control según API-MPMS.

3.2 Capa de Control

3.2.1 Generalidades

La estación de bombeo EBA cuenta con dos unidades de bombeo de 600HP para transportar productos derivados de petróleo a la estación reductora Riobamba; la EBA dispone de un shelter de máquinas, de una sala de equipos de potencia, una sala de equipos de tableros de control y un control room desde donde se opera dichas unidades de bombeo como se detalla en la Figura 3-3

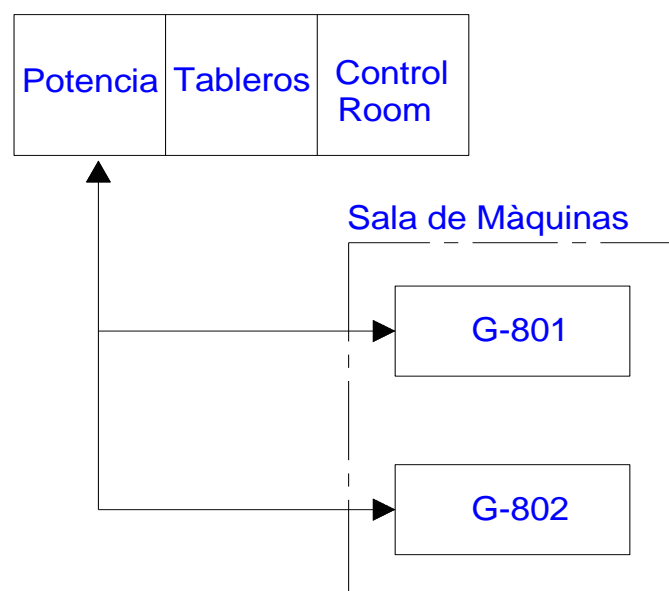


Figura 3-3: Diagrama de partes de la estación
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

3.2.2 Señales del proceso

Tabla 8-3: Señales analógicas de la instrumentación para el control del G-802.

SEÑALES ANALÓGICAS-INPUT DE LA UNIDAD G802				
Item	Tag. Instrumento	Señal	Span	DESCRIPCIÓN
1	PIT_190107_A	4-20mA	0-900 Psi	Presión de Succión
2	PIT_190107_B	4-20mA	0-2300 Psi	Presión de Descarga
3	TE_190107_A	PT100		Temperatura del Cojinete radial Interior
4	TE_190107_B	PT100		Temperatura de la carcasa de la bomba
5	TE_190107_C	PT100		Temperatura del Cojinete radial exterior
6	TE_190107_D	PT100		Temperatura del rodamiento exterior
7	TE_191007_A	PT100		Temperatura del rodamiento exterior del motor
8	TE_191007_B	PT100		Temperatura del rodamiento interior del motor
9	TE_191007_C	PT100		Temperatura del devanado de la fase-A
10	TE_191007_D	PT100		Temperatura del devanado de la fase-B
11	TE_191007_E	PT100		Temperatura del devanado de la fase-C
12	VT_190107_A	4-20mA	0-25.4	Vibraciones interior mm/s
13	VT_190107_B	4-20mA	0-25.4	Vibraciones exterior mm/s
15	PUMP_190107_SP	4-20mA	0-60 Hz	Setpoint de RPM
16	FIT_190404_FVE			Flujo en GPH
17	FIT_190404_FVE		0-100 API	Densidad API
SEÑAL ANALÓGICA-OUTPUT DE LA UNIDAD G802				
14	MOTR_191007_S	4-20mA	0-60 Hz	Feedback de RPM

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Las señales de un proceso de bombeo son analógicas y discretas dando lugar a un proceso tipo batch; en la Tabla 8-3 se enlistan las señales analógicas del proceso, las cuales precisan toda la instrumentación de campo, señales del variador de frecuencia VFD-802, señales de flujo y densidad de la unidad de medición dinámica LACT.

Tabla 9-3: Señales discretas de la instrumentación para el control del G-802

SEÑALES DISCRETAS-INPUT DE LA UNIDAD G802		
Item	Tag. Instrumento	DESCRIPCION
1	PUMP_190707_STR	Start de la bomba de refrigeración del 802
2	PUMP_190107_RDY	Ready: VFD-802
3	PUMP_190107_R	RUN: VFD-802
4	PS_190107_A	Pressure Switch de torre A
5	PS_190107_B	Pressure Switch de torre B
6	LSH_190107_A	Level Switch exterior A

7	LSH_190107_B	Level Switch interior B
8	ESD_190107	Paro de emergencia de la G802
SEÑALES DISCRETAS-OUTPUT DE LA UNIDAD G802		
1	STR_190107	Start del VFD-802
2	STP_190107	Stop VFD-802
3	FNXR_190707	Start / Stop de la bomba de refrigeración de agua
4	HTR_191007_STR	Calentamiento de bobinado del motor
5	ALV_190107	Alarma Baliza de color verde_estado normal
6	ALR_190107	Alarma Baliza de color rojo_Alarma para shutdown
7	ALA_190107	Alarma Baliza de color amarillo_Pre-Alarma
8	AS_190107	Señal de sonora de alarmas

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Por otra parte, las señales discretas de la instrumentación de campo de la unidad G-802 se resume en la Tabla 9-3, considerando señales puntuales que serán llevadas a través de cableado duro, directamente desde los instrumentos a los diferentes canales que se asignen en las tarjetas del controlador RIO/DROP-2, adicionalmente que es menester las señales de salidas discretas de visualización y sonido de emergencia estarán localizadas en el control room a la facilidad del operador de campo.

3.2.3 Sistema de control

Tabla 10-3: Señales Analógicas y setpoint del G-802

<i>Item</i>	<i>Tag. Instrumento</i>	<i>Setpoint preAlarma</i>	<i>Setpoint Alarma</i>	<i>DESCRIPCIÓN</i>
1	PIT_190107_A	60-psi	50-psi	Presión de Succión
2	PIT_190107_B	1500-psi	1600-psi	Presión de Descarga
3	TE_190107_A	65°C	70°C	Temperatura del Cojinete radial Interior
4	TE_190107_B	35°C	40°C	Temperatura de la carcasa de la bomba
5	TE_190107_C	62°C	67°C	Temperatura del Cojinete radial exterior
6	TE_190107_D	55°C	60°C	Temperatura del rodamiento exterior
7	TE_191007_A	60°C	65°C	Temperatura del rodamiento exterior del motor
8	TE_191007_B	65°C	70°C	Temperatura del rodamiento interior del motor
9	TE_191007_C	100°C	105°C	Temperatura del devanado de la fase-A
10	TE_191007_D	100°C	105°C	Temperatura del devanado de la fase-B

11	TE_191007_E	100°C	105°C	Temperatura del devanado de la fase-C
12	VT_190107_A	1.7mm/s	3,5mm/s	Detector de vibraciones interior
13	VT_190107_B	1.7mm/s	3,5mm/s	Detector de vibraciones exterior

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

El sistema de control de acuerdo a la filosofía de operación hidráulica de la bomba tiene las siguientes necesidades expresadas a continuación:

- Controlar que la presión de succión sea mayor a 50-psi para evitar cavitación en la bomba.
- Controlar que la presión de descarga no sobrepase los 1600psi.
- Controlar que las temperaturas no sobrepasen los setpoints restablecidas en la Tabla 10-3
- Controlar que los niveles de vibración no supere los 3 setpoints.
- Monitorear que los niveles de líquido refrigerante de las torres A y B se encuentren dentro de los límites establecidos.
- Monitorear que los niveles de presión de las torres A y B se encuentren en cero, caso contrario empieza a ingresar productos de la bomba a causa de fallas en los sellos de los cojinetes.
- Monitorear que los estatus de las válvulas se encuentren alineadas a fin de dirección la salida del producto hacia el poliducto.
- Monitorear valores de presión en los diferentes puntos instrumentados de la tubería.

3.2.4 Selección de componentes

Debido a la localización del shelter de máquinas (Figura 3-3) y la sala de tableros se ha establecido una arquitectura Remota Input/Output, con ello se adquiere todas las señales de campo en una unidad remota y a través del bus RIO se transmite información de campo a la CPU que se encuentra en los tableros de control; esta arquitectura reduce costos a causa de disminución de cableado duro, bandejas portacables y más accesorios de interconexión de tubería con la instrumentación EX; pero al ubicarse en una zona I, división II y pertenecer a los Grupos B,C,D según NEC-500, es necesario que el tablero de conexión del controlador RIO/DROP-03 disponga de capacidades específicas a prueba de explosión. (NFPA-70, 2012) como ATEX-KEMA, IECEx o ATEX-PTB en otros.

En relación a las Tabla 8-3 y Tabla 9-3 se extrae que se dispone de la siguiente cantidad de señales tanto discretas I/O y análogas I/O, a más de ello es necesario concatenar los requerimientos de comunicaciones con los dispositivos de buses de campo y los de capa de supervisión, para lo cual se resume en la Tabla 11-3.

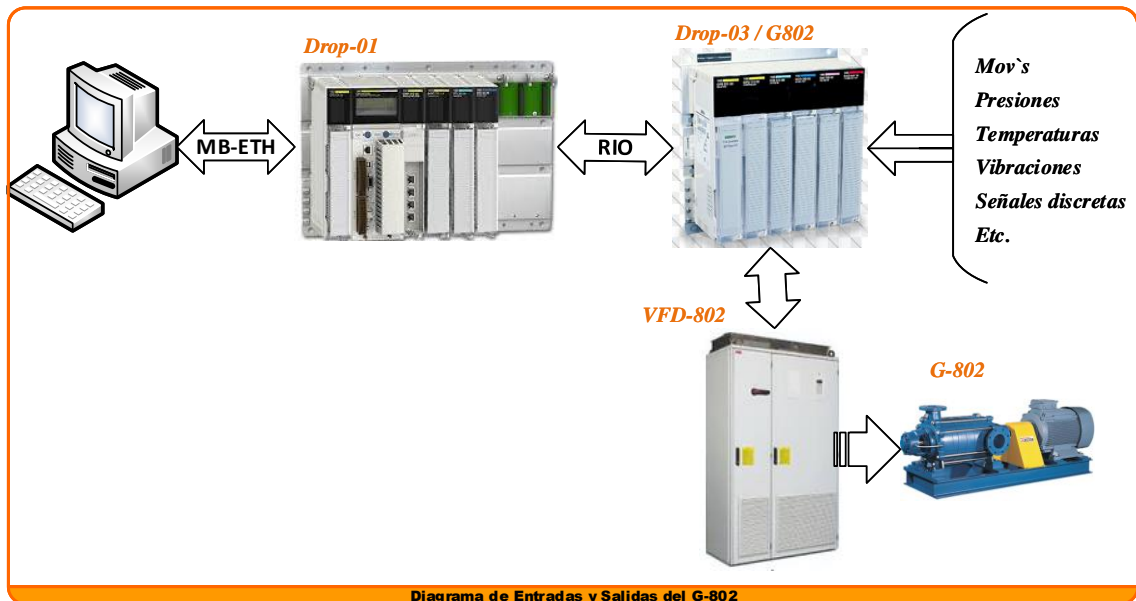


Figura 4-3: Diagrama general de señales de Entrada/Salida de la unidad G-802
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Tabla 11-3: Cantidades y tipo de señal para el controlador.

<i>Ubicación</i>	<i>Tipo Señal</i>	<i>Señales</i>	<i>Cantidad</i>
DROP:02	AN_Inputs:	4-20mA a 24vdc	5
		RTD`s	9
	AN_Outputs:	4-20mA	1
	DI: Inputs	Entradas discretas de 24Vdc	8
		DO:Outputs	Salidas discretas de 24Vdc
		Salida de 110VAC	1
DROP:01	MB-RS-485	Actuadores Limitorque RS-485	7
	MB-ETH	HMIs de sala de control	4
	MB-ETH	Computadores de Flujo S-600	2
	MB-ETH	Data Storage	1
	DO:Outputs	Salidas discretas de 24Vdc	4

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

De la Tabla 11-3 se selecciona un controlador con las prestaciones para controlar y monitorear las señales mencionadas a más de una proyección de crecimiento por señales provenientes de tanques y bombas proyectadas para el 2018.

Tabla 12-3: Lista de materiales para la G-802

Item	Descripción	Unidades	Cantidad
1	Backplane 140-XBP-01000	EA	2
2	Fuente 140-CPS-11420	EA	2
3	140-CPU-43412-A/U	EA	1
4	Entradas Digitales 140-DDI-35300	EA	3
5	Salida Digitales 140-DDO-35300	EA	1
6	Salida Digitales 140-DRA-84000	EA	1
7	4-20ma IN/ 140-ACI-04000	EA	2
8	4-20ma OUT/ 140-ACO-13000	EA	2
9	RTD`s IN / 140-ARI-03010	EA	2
10	Rio-Head / 140-CRP-93200	EA	1
11	Rio-Drop / 140-CRA-93202	EA	1
12	Red Ethernet / 140-NOE-77111	EA	1
12	Cable Coaxial RIO RG-6	m	100
13	Cable Armado para RTD`s 18AWGx12pares	m	50
14	Cable Armado 18AWGx 2 pares	m	300
15	Runtime Intouch 2014R2 - 3K	EA	1

Realizado por: Villalba, Williams,2017

El controlador lógico programable es de tipo modular, con la capacidad de maniobrar con todos los datos de manera rápida y segura, de tipo industrial y que soporte los polling de las redes de comunicación modbus con los dispositivos adyacentes.

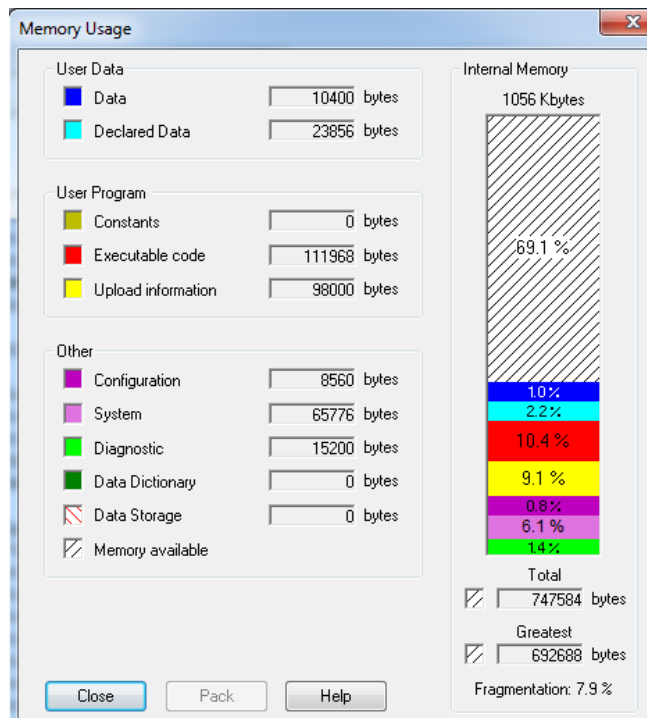


Figura 5-3: Memoria calculada de un PLC-Quantum
Fuente: Unity Pro XL, (Schneider-Electric, 2009)

En base a estas especificaciones se selecciona un equipo de alta gama de Schneider-Modicon Tabla 12-3 para el proceso de bombeo de las unidades G-801 y G-802, cuyos procesadores Quantum dispone de altas prestaciones, son modulares y facilitan las interconexiones con diferentes redes industriales a la vez; adicionalmente otro factor preponderante es la escalabilidad en el tiempo, que para el caso de estudio se ha enfocado que cierto porcentaje de memoria interna deba estar libre, para ello la memoria interna debe ser superior a la memoria del programa y la memoria de datos como se puede observar en la Figura 5-3.

En este caso particular se dispone del software de programación Unity Pro XL.V10 como parte de la estandarización de marca de la empresa; entonces, dentro de este contexto se tiene la facilidad de modelar el espacio de memoria como se detalla en la Figura 5-3 y conjuntamente con un análisis del costo y el servicio técnico que la marca Schneider dispone en el país se decide adquirir el procesador 140CPU434-12A/U con las características expresas en la Tabla 13-3.

Tabla 13-3: Procesador 140-CPU-434-12A/U

<i>140CPU434-12AU</i>	<i>ESPECIFICACIONES</i>
Puertos de comunicación	2 Modbus (RS-232)
	1 Modbus (RS-485)
Procesador	Intel 486

Clock Speed	66MHZ
Procesador matemático	si
Watchdog timer	250ms, ajustable
Memoria Interna(máx)	896 Kbytes
Registros	64K
Local I/O:	
Máx I/O Words	Ilimitado I/O
Máx I/O racks	2
S908 Remote I/O:	
Máx I/O por Drop	64-in / 64-Out
Máx I/O número de Drops remotos	31
Batería y Reloj:	
Tipo	3v Litio
Service Life	1200 mAh
Shelf life	10 años con una pérdida de 0.5% por cada año.

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Como la arquitectura seleccionada es Remote I/O entonces es necesario disponer de tarjetas que puedan desarrollar esta extensión; para lo cual se ha seleccionado la RIO-HEAD / 140-CRP-93200 que será colocada en el backplane de la CPU y la RIO-DROP / 140-CRA-93202 alojada en cada uno de los backplanes satélites que recolectara información de campo; se ha seleccionada estos dispositivos ya que disponen la capacidad de redundancia en cableado (Tabla 12-3).

Tabla 14-3: Características de tarjeta de red Modbus sobre ethernet

<i>140NOE-771-11</i>	<i>ESPECIFICACIONES</i>
Puertos de comunicación	1 10/100BaseT, conector RJ-45
	1 100Base-FX , conector MT-RJ
Potencia de disipación	3.8 w
Corriente del bus requerido	750 mA
Indicadores visuales	Run, Falla, Colisiones, Listo, activo..... etc.

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Los interfaces con el operador estarán alojados en servidores virtuales cuyo enlace físico es a través de Ethernet, para lo cual es menester la disponibilidad de un dispositivo de interconexión Modbus sobre Ethernet que interactúe entre la capa de proceso y la de visualización, cuyas características se presentan en la Tabla 14-3.

Las tarjetas de I/O discretas y analógicas presentadas en la Tabla 12-3 están concatenadas a la necesidad de las cantidades y tipos expuestas en la Tabla 11-3 , cuyas configuraciones por cada canal en el caso de la analógicas pueden ser personalizadas acorde a los requerimientos del proyecto.

3.2.5 Cableado del sistema de control básico de proceso – BPCS

La arquitectura de control reflejada en el Anexo A y congruentemente con la localización física de la Figura 3-3 y el detalle de acopio de señales de la Figura 4-3, viabilizan la necesidad de los siguientes tableros:

- Tablero EBA-BPCS-01
- Tablero EBA-RIO-01-801
- Tablero EBA-RIO-02-802

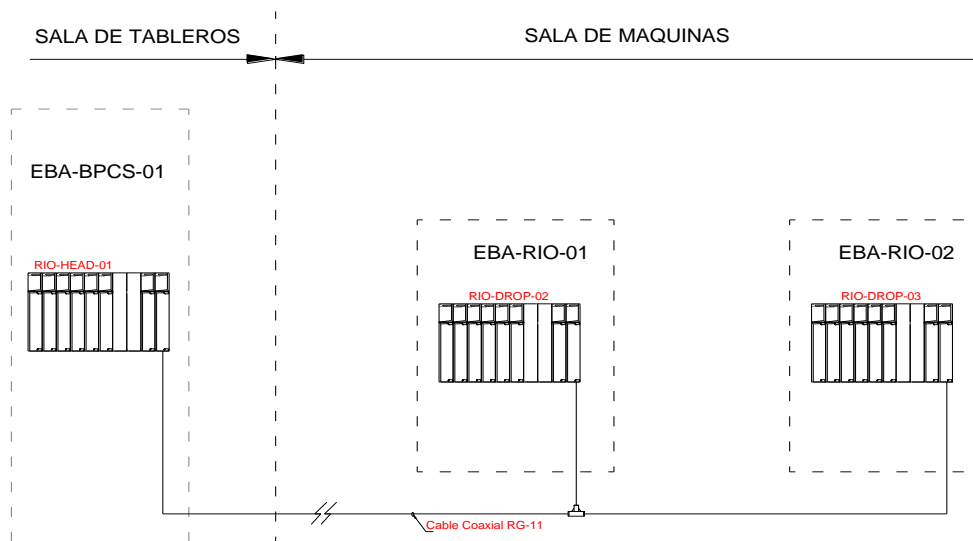


Figura 6-3: Distribución física de tableros eléctricos de los controladores BPCS Y RIO-DROPS

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

3.2.6 Programación de la lógica de control del BPCS

Al ser una arquitectura Remote-I/O, la 140-CPU-43412-A/U alojará la programación de las dos unidades de bombeo; para el caso de estudio en mención, nos centraremos en la unidad G-802 y de manera análoga será para la unidad G-801.

3.2.6.1 Flujograma del proceso de bombeo

La estación de bombeo entra en operación cuando la estación reductora alinea las válvulas para direccionar el flujo proveniente del Poliducto Quito-Ambato hacia el shelter de medición de flujo y este a su vez alcance una presión de operación de trabajo entre 30 PSI y 300 PSI como se atisba en la Figura 7-3.

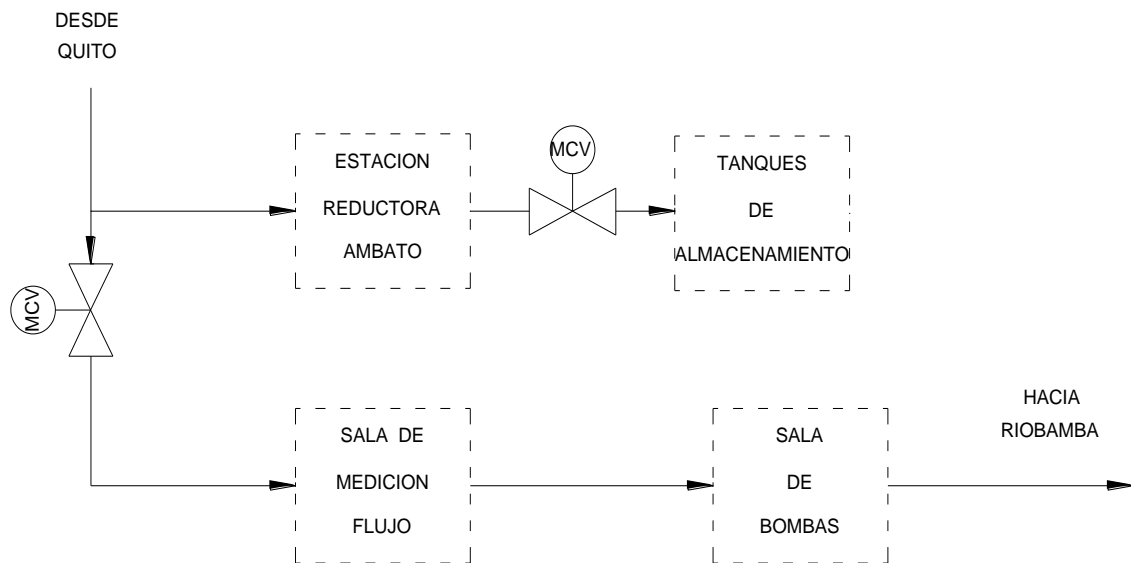


Figura 7-3: Bloques de funcionamiento de la estación de bombeo y reductora
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Habiendo alcanzado las condiciones de operación hidráulica, se verifica señales de alarmas, Emergency Shutdown (ESD), válvulas en estado cerrado, que la unidad de bombeo G-801 este fuera de línea y más señales de I/O del Plc; al disponer de estas condiciones normales de operación se debe escoger la fuente de ingreso del producto a ser bombeado, en la actualidad la fuente es el

poliducto de alimentación de la estación , pero para el 2018 se tendrá la alternativa de bombear desde los tanques de almacenamiento del terminal .

Habiendo seleccionado la fuente se deberá alinear las válvulas de la secuencia-01 que lo hace la terminal reductora con otro sistema de control en este momento, pero que será parte de la secuencia al término de la automatización del G-801 y el enlace de fibra en anillo de las dos plantas y finalmente el tren de medición de flujo y apertura de las válvulas de la unidad G-802 como detalla la Figura 8-3.

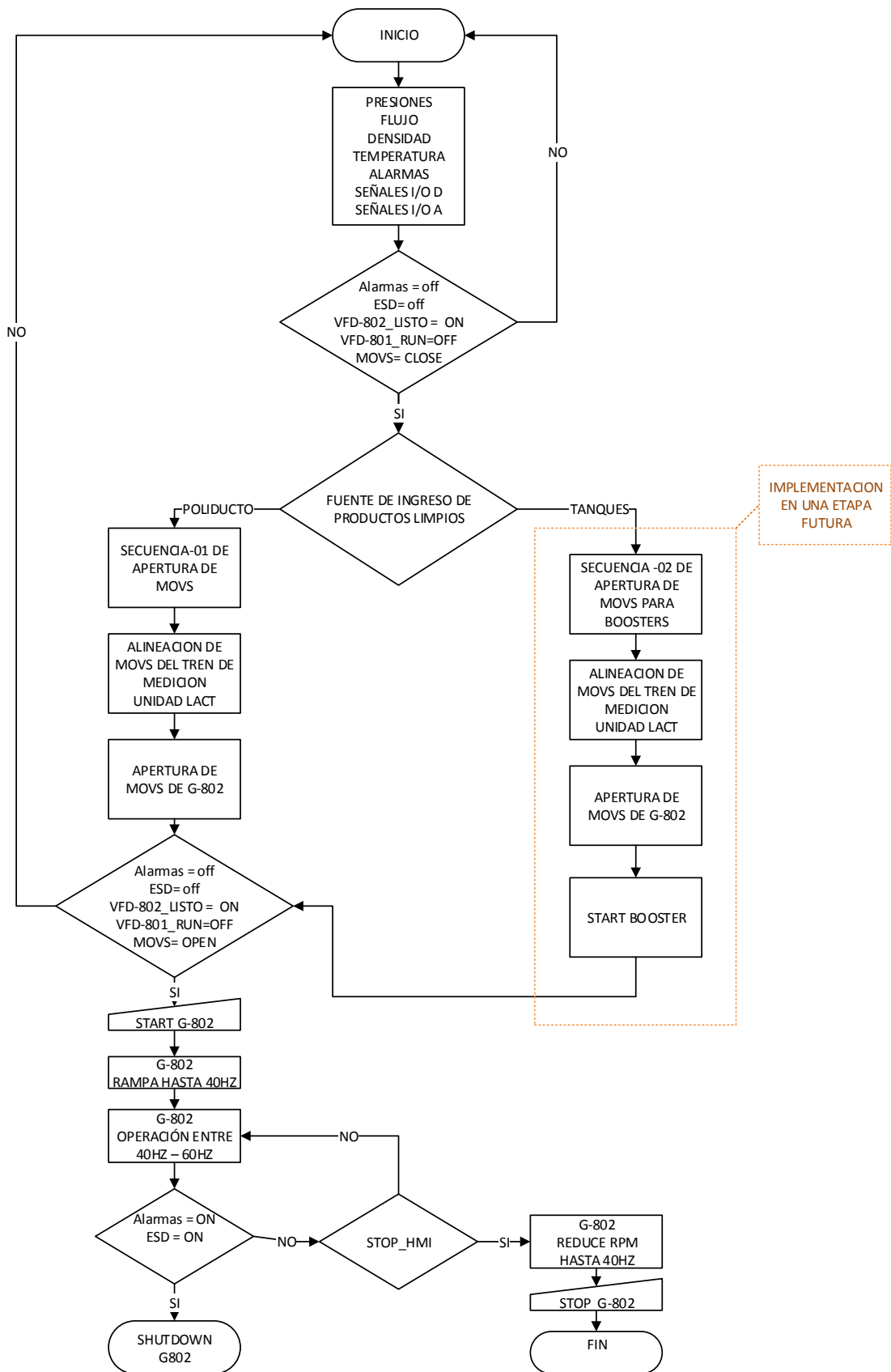


Figura 8-3: Flujo de funcionamiento de la G-802
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Al disponer de todas las señales operativas-hidráulicas y alineación de válvulas, el operador podrá tomar la decisión de encender la unidad de bombeo a través de los HMI localizados en la sala de control; la G-802 a través de su variador de frecuencia VFD-802 realiza una rampa de arranque hasta alcanzar los 40Hz con lo cual adquiere la velocidad de ralentí , posteriormente, se debe vencer la columna hidrostática a lo largo de la trayectoria del ducto y alcanzar el punto de operación del sistema, para ello se incrementa las RPM de la unidad entre 40Hz-60Hz cuyo objetivo es obtener un gradiente hidráulico que supere el punto más alto del perfil altimétrico cuidando también no sobrepasar la MAOP.

En operación normal el controlador monitoreara constantemente los parámetros de alarmas y paradas de emergencia (ESD); si hubiere alguna anomalía ya sea en el proceso hidráulico de la bomba, fallos del VFD-802 o motor -bomba de forma inmediata la unidad pasara a shutdown, caso contrario si el apagado es de manera normal entonces las RPM deben reducirse hasta los 40Hz, solo bajo esta circunstancia el operador puede proceder con la secuencia de apagado de la unidad de bombeo desde el HMI.

3.2.7 Software de programación

En esta sección, se hace una pequeña introducción del software Unity Pro XL V10.0 de la empresa Schneider-Electric topando temas significativos que hace referencia el capítulo en párrafos posteriores; entre estos puntos están:

- El hardware aconsejable para que Unity Pro XL trabaje de manera confiable es: Sistema operativo Windows 7 en ingles, PC 1.2Ghz, 512 M Ram, 4 Gb de espacio de disco. (Schneider-Electric, 2009)

- Los lenguajes de programación están bajo el estándar IEC 61131-3 los cuales son: Lenguaje escalera (LD - Ladder Diagram), Diagrama de bloque de funciones (FBD - Function Block Diagram), Texto estructurado (ST - Structured Text) , Lista de instrucciones (IL - Instruction List) y Bloques de función secuenciales (SFC - Sequential Function Chart); que para este caso específico la programación fue desarrollada en lenguaje SFC y FBD debido a la facilidad de estructurar las secuencia del proceso de bombeo .

- Un término bastante particular en este software son los direccionamientos de las variables sobre todo las variables alcatadas que no es otra cosa que el direccionamiento físico de las I/O del

hardware o la referencia de un espacio de memoria y las no-alocadas que son variables que no están asociadas a ningún espacio de memoria o I/O física de hardware.

- El direccionamiento topológico de las I/O físicas de este software y específicamente para el PLC Quantum es el expuesto en la Tabla 15-3 y ejemplizada en la Figura 9-3.

Tabla 15-3: Direccionamiento físico de entradas y salidas en Unity Pro XL

<i>%</i>	<i>I/Q</i>	<i>X/W/D</i>	<i>RIO-Bus</i>	<i>RIO-Drop</i>	<i>Backplane</i>	<i>Nª Slot</i>	<i>c</i>
Símbolo	Tipo: I = Input Q= Output	Formato: X= boolean W=Palabra D= Doble Palabra	Número del Bus RIO	Número de RIO Drop	Número de Backplane	Número de Slot	Número de Canal

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Por Ejemplo: La variable alcatada %Q\2.2\1.9.1 que es una variable de tipo bool alojada en el 2: RIO Bus, 2: Remote IO Quantum Drop, 1:140 XBP 0 10 00, 9: Slot y 1:canal

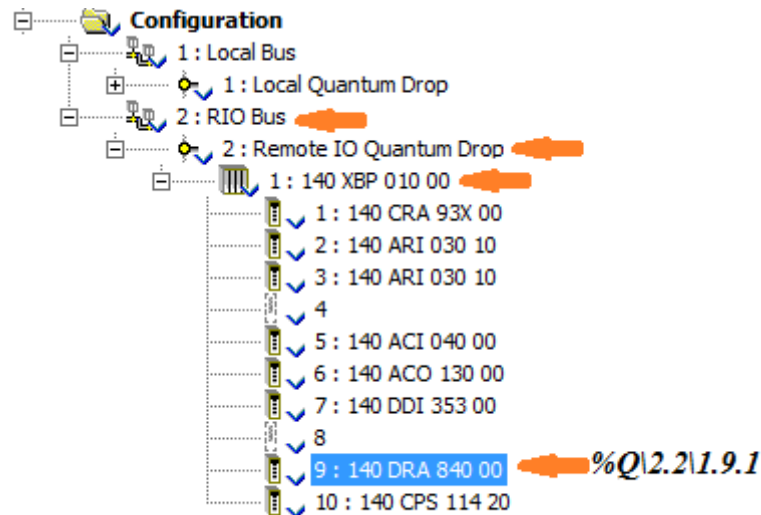


Figura 9-3: Ejemplo de variable física alcatada
Fuente: (Schneider-Electric, 2009)

Dentro de la estructuración del software (Figura 10-3)) se dispone de diferentes tareas definidas como tarea principal (MAST), multitarea que son la adición de MAST ,Tarea rápida (FAST),

tarea de evento (EVT) y las tareas auxiliares (AUX); adicionalmente se dispone de secciones de programa y subrutinas dentro de las tareas MAST y FAST.

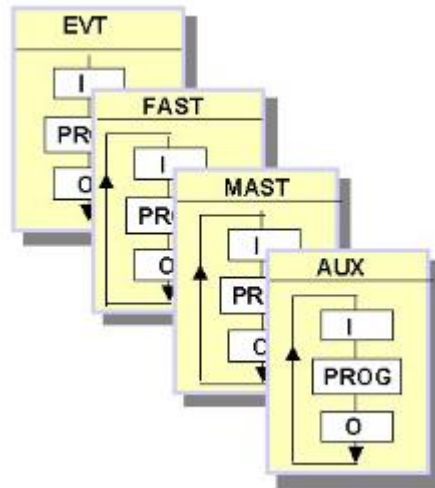


Figura 10-3: Estructuración del software Unity Pro XL v10.0
Fuente: (Schneider-Electric, 2009)

3.2.7.1 Configuración del Hardware en Unity Pro XL

La configuración del hardware de los controladores Quantum concatenados a la arquitectura RIO del proyecto ha sido configurado de la siguiente manera :

- 1 : Bus Local
- 2 : Remote Bus / Drop_G-802
- 3 : RIO Bus / Drop_G801

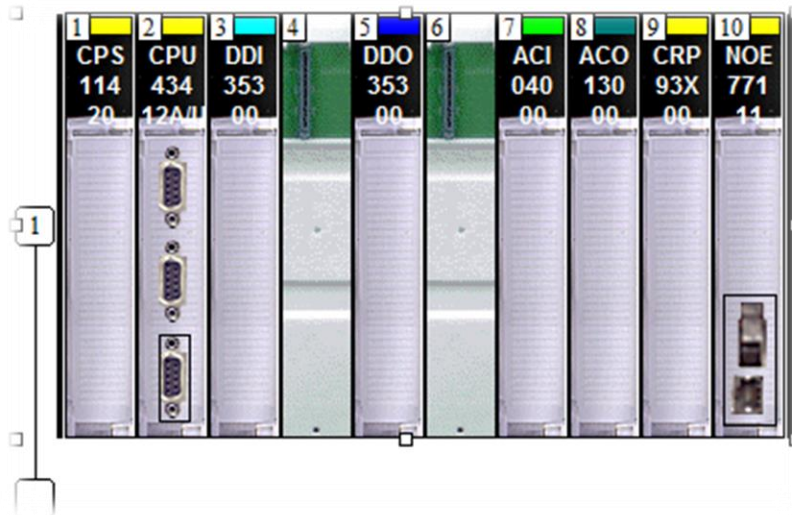


Figura 11-3: Configuración del Bus Local en el software Unity Pro XL de Schneider-Electric
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

La Figura 11-3, detalla la configuración del backplane 140-XBP-01000 en el que la 140-CPU-43412-A/U se encuentra alojada en el slot 3, la cabeza de la Remote I/O : 140-CRP-93200 está en el slot 9 y la red ethernet 140-NOE-77111 configurada con una dirección IP 192.168.100.10/24 (Figura 12-3), esta última servirá para la comunicación Modbus/Eth con la capa de supervisión; adicionalmente se encuentran tarjetas de I/O y una power supply para alimentar el Bus Local.



Figura 12-3: Configuración de la dirección IP de la 140-NOE-77111
 Fuente: Software Unity Pro XL v10.0

De manera análoga al Bus local es necesario configurar el RIO-Bus-2, donde el flujo bidireccional de datos provenientes de la instrumentación de campo pasan a través de la 140-CRA-93202

alojada en el slot 1 con dirección al bus-local específicamente a la 140-CRP-93200 mediante un cable coaxial RG-11 y de manera inversa todos la información proveniente del Bus-local es encaminada a través de este medio; complementariamente, la Figura 13-3 expone la configuración de I/O discretas y analógicas necesarias para recibir las señales de las tablas 8-3 y 9-3 localizadas en la sala de máquinas.

La configuración de la dirección de la RIO/DROP 140-CRA-93202 se lo realiza de manera física utilizando los Dir-Switches localizados en la parte posterior de la tarjeta.

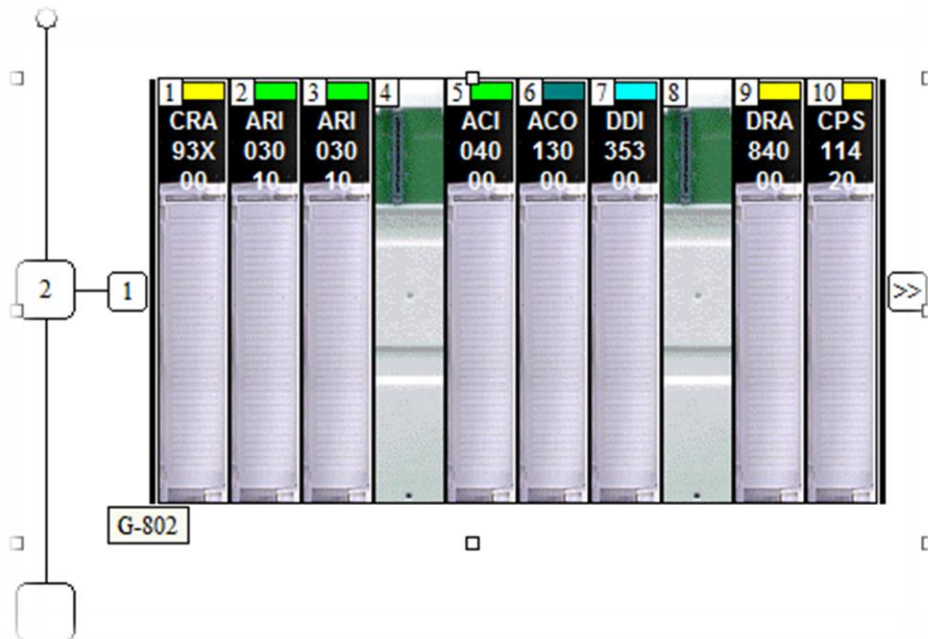


Figura 13-3: Configuración del RIO-Bus usando Unity Pro XL de Schneider-Electric
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Una de las tareas preponderantes a tomar en consideración es que la localización del hardware en los slots del backplane debe ser exactamente a lo configurado en el software Unity Pro XL.

3.2.7.2 Declaración de variables alocatadas

En las Tablas 8-3, Tabla9-3 y Tabla 10-3 se expone las variables físicas a monitorear y controlar provenientes de la instrumentación de campo, estas a su vez al ser cableadas a las tarjetas del DROP-2 se les denomina variables alocatadas por tener referencia de hardware y tipo de dato como lo recaba la teoría de este protocolo modbus; en este estudio no se adentrara en la teoría del protocolo, pero es menester encapsular de manera general la estructura básica del direccionamiento topológico del modbus para variables alocatadas como se expresada en la Figura 14-3.

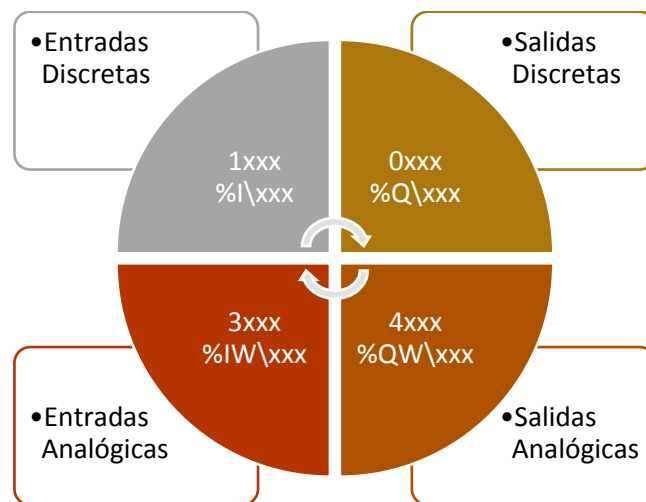


Figura 14-3: Estructura básica del mapeo modbus para variables alocatadas
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Por otra parte, las variables alocatadas también son variables de memoria y se define como %Mxxx para señales discretas (Bool, EBool) y %MWxxx para señales analógicas (Real, String, Time, Word, DWord ... Etc.); sustentado en esta teoría la Tabla 16-3 detalla las variables alocatadas de memoria de los registros de las temperaturas de la unidad de bombeo G-802.

Tabla 16-3: Variables alocatas de temperaturas - 140-ARI-03010

Variable	Modbus	Dato	Descripción
TE_190107_A	%MW612	REAL	Temperatura cojinete radial interior grupo 802
TE_190107_B	%MW614	REAL	Temperatura carcaza bomba grupo 802
TE_190107_C	%MW608	REAL	Temperatura cojinete radial exterior grupo 802
TE_190107_D	%MW610	REAL	Temperatura rodamiento axial grupo 802
TE_191007_A	%MW616	REAL	Temperatura rodamiento exterior motor grupo 802
TE_191007_B	%MW618	REAL	Temperatura rodamiento interior motor grupo 802
TE_191007_C	%MW632	REAL	Temperatura devanados grupo 802_fase A
TE_191007_D	%MW634	REAL	Temperatura devanados grupo 802_fase B
TE_191007_E	%MW636	REAL	Temperatura devanados grupo 802_fase C

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Estas variables son declaradas en el “Data Editor” de Unity Pro XL he insertos en la configuración inicial de la programación donde las tarjetas 140-ARI-03010 recibirán las señales de temperatura de la unidad de bombeo.

La Figura 15-3, engloba la configuración inicial de la arquitectura RIO, donde el bloque de función DROP-2 detalla todas las tarjetas analógicas en el slot correspondiente, que para el caso

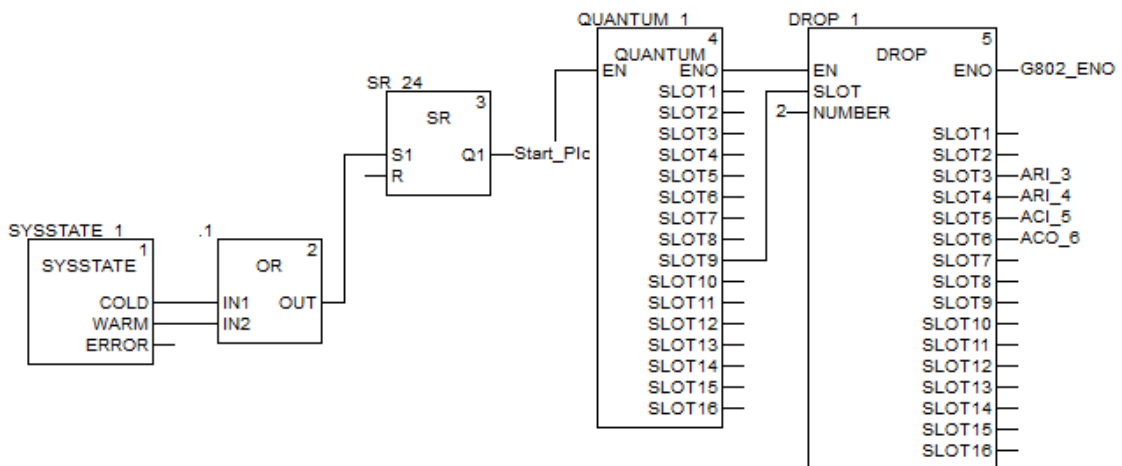


Figura 15-3: Configuración de inicio del PLC-Quantum, Drops y Tarjetas analógicas de I/O

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

de las temperaturas son configuradas en los Slot 3 y 4 debido a los 8 canales de RTD's que soporta la 140-ARI-03010 y que se puntualiza en las Figuras 15-3, 16-3 y 17-3.

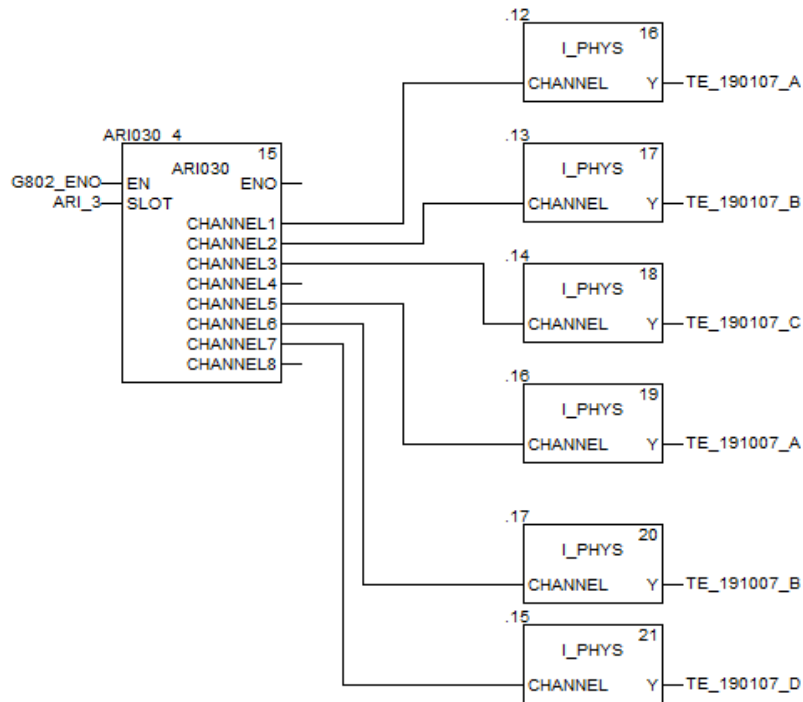


Figura 16-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ARI-03010 del Slot-3
Realizado por: Villalba, Williams,2017

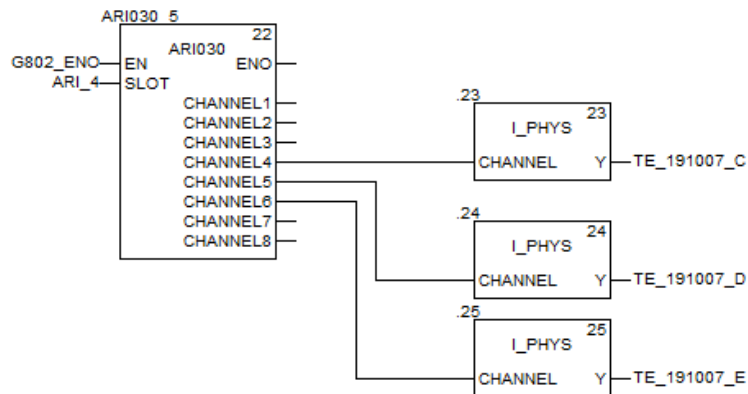


Figura 17-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ARI-03010 del Slot-3
Realizado por: Villalba, Williams,2017

De manera semejante, se procede con la configuración de los lazos de entrada de corriente de 4-20mA para la 140-ACI-04000, cuyos canales son atados a las variables de instrumentación de campo de vibración presión y lectura de las velocidad angular como se estipula en la Tabla 17-3.

Tabla 17-3: Variables alcatadas de entrada de 4-20mA para la 140-ACI-04000

Variable	Modbus	Dato	Descripción
VT_190107_A	%MW622	REAL	Detector de vibración interior grupo 802
VT_190107_B	%MW620	REAL	Detector de vibración exterior grupo 802
PIT_190107_A	%MW602	REAL	Presión succión del grupo G-802
PIT_190107_B	%MW624	REAL	Presión descarga del grupo G-802
MOTR_191007_S	%MW600	REAL	Lectura de RPM del grupo G-802

Realizado por: Villalba, Williams,2017

La 140-ACI-04000 se sitúa en el slot 5 del Drop-2 cuyos canales se configuran para recibir señales de 4-20mA con la finalidad de mantener el cero-vivo es decir si llegara a fallar el cable del lazo por rotura se activa una alarma denotando la falla del mismo y la unidad de bombeo hace un shutdown.

La Figura 18-3 enfatiza la configuración de la 140-ACI-04000 considerando los rangos de trabajo de la instrumentación de campo estipulada en la tabla 8-3, los bloques I_SCALE habilitan unos parámetros de mínimo (MN) y máximo (MX) cuyos valores son el cero y el span respetivamente.

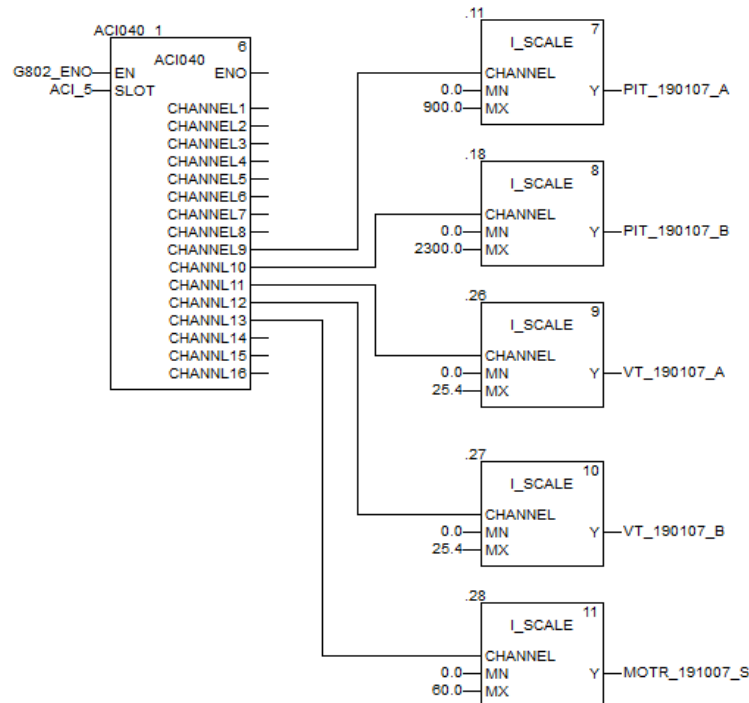


Figura 18-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ACI-04000 del Slot-5

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Finalmente, la 140-ACO-13000 del slot 6 del Drop-2 es configurada para la señal de salida de control de 4-20mA (Tabla 18-3) para el VFD-802 a través de la función O_SCALE; mediante esta señal se maniobra la frecuencia en Hz por lo tanto las rpm's de la unidad de bombeo; adicionalmente la Figura 19-3 también presenta un bloque de función LIMIT que tiene como objetivo limitar la frecuencia entre 0-59Hz debido a la limitante de 3560-rpm de la bomba.

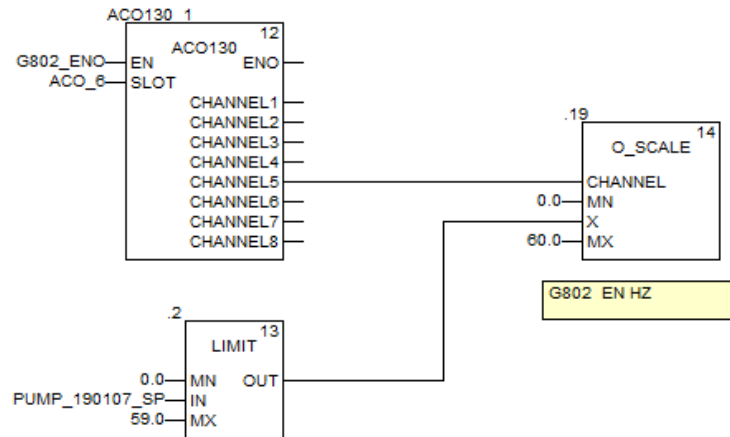


Figura 19-3: Configuración inicial de los canales de la 140-ACO-13000 del Slot-6
Realizado por: Villalba, Williams,2017

Tabla 18-3: Variables alocatadas de salida de 4-20mA para la 140-ACO-13000

Variable	Modbus	Dato	Descripción
PUMP_190107_SP	%MW1208	REAL	Ingreso de Setpoint G-802

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Tabla 19-3: Variables alocatadas de entrada discretas de hardware

Variable	Modbus	Dato	Descripción
G802_PS_190107_A	%I\2.2\1.7.1	EBOOL	Pressure Switch Torre_A Lubricación
G802_PS_190107_B	%I\2.2\1.7.2	EBOOL	Pressure Switch Torre_B lubricación
G802_LSH_190107_A	%I\2.2\1.7.3	EBOOL	Level Switch Torre_A Lubricación
G802_LSH_190107_B	%I\2.2\1.7.4	EBOOL	Level Switch Torre_B Lubricación
G802_PUMP_190107_RDY	%I\2.2\1.7.5	EBOOL	Ready_VFD-802
G802_PUMP_190107_R	%I\2.2\1.7.6	EBOOL	Run_VFD-802
PUMP_190107_F	%I\2.2\1.7.7	EBOOL	Fault_VFD-802
ESD_STATION	%I\2.2\1.7.8	EBOOL	Paro de emergencia de la estación

Realizado por: Villalba, Williams,2017

A diferencia de las señales analógicas alocatadas, Unity Pro XL no requiere configurar bloques de I/O para señales discretas, más bien estas variables alocatadas de hardware son descritas en el “Data Editor” bajo la topología enfocada en la Tabla 15-3 y Figura 9-3. .

Quizás para el lector, los datos Bool y Ebool no estén muy claros en su diferencia, por ello realizo la siguiente cita textual tomada del manual de Unity Pro XL el cual manifiesta:

“BOOL, contiene sólo el valor FALSE (=0) o TRUE (=1). EBOOL, contiene el valor FALSE (= 0) o TRUE (= 1), pero también información relativa a la gestión de bordes descendentes o ascendentes y forzamiento.” (Schneider-Electric, 2009)

Tabla 20-3: Variables alocatadas de Salidas discretas de hardware

Variable	Modbus	Dato	Descripción
START_VFD802	%Q\2.2\1.9.1	EBOOL	Start_VFD802
STOP_VFD802	%Q\2.2\1.9.2	EBOOL	Stop_VFD802
FNXR_190707	%Q\2.2\1.9.3	EBOOL	Start/Stop_del _FAN-802

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Por lo expresado en la cita anterior, se utiliza datos EBOOL ya que en partes de la programación se requiere información de sus flancos.

Tabla 21-3: Variables alocatadas para la comunicación con el computador - Floboss-S600

Variable	Modbus	Dato	Descripción
FIT_190404A_D	%MW784	REAL	I/O scanning _densidad API ramal A
FIT_190404A_DI	%MW1094	REAL	Densidad instantanea FIT 190404A
FIT_190404A_TOTV	%MW904	REAL	Totalizador volumétrico FIT 190404A
FIT_190404A_V	%MW1090	REAL	Flujo volumétrico FIT 190404A
FIT_190404B_D	%MW790	REAL	I/O scanning _densidad API ramal B
FIT_190404B_DI	%MW914	REAL	Densidad instantanea FIT 190404B
FIT_190404B_TOTV	%MW920	REAL	Totalizador volumétrico FIT 190404B
FIT_190404B_V	%MW910	REAL	Flujo volumétrico FIT 190404B

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Las unidades de medición dinámica disponen de un computador de flujo de la marca Emerson del modelo Floboss-S600 presentado en la Figura 2-3, su mapa modbus (Tabla 21-3) es adquirido para lectura de datos en el PLC-Quantum a fin de poder monitorear sus variables principales en los HMI.

Tabla 22-3: Variables alcatadas de memoria para Pre-alarmas

Variable	Modbus	Dato	Descripción
ALM_B2_PIT_EA221A_A	%M423	EBOOL	Pre-alarma presión de succión grupo 802
ALM_B2_PIT_EA221B_A	%M426	EBOOL	Pre-alarma presión descarga grupo 802
ALM_B2_TT_EA221A_A	%M390	EBOOL	Pre-alarma cojinete radial exterior de bomba
ALM_B2_TT_EA221B_A	%M393	EBOOL	Pre-alarma rodamiento exterior de bomba
ALM_B2_TT_EA221C_A	%M396	EBOOL	Pre-alarma cojinete radial interior de bomba
ALM_B2_TT_EA221D_A	%M399	EBOOL	Pre-alarma carcaza en bomba
ALM_B2_TT_EA221E_A	%M408	EBOOL	Pre-alarma cojinete exterior motor
ALM_B2_TT_EA221F_A	%M411	EBOOL	Pre-alarma cojinete interior de motor
ALM_B2_TT_EA221G_A	%M414	EBOOL	Pre-alarma temperatura devanado Fase A
ALM_B2_TT_EA221H_A	%M417	EBOOL	Pre-alarma temperatura devanado Fase B
ALM_B2_TT_EA221I_A	%M420	EBOOL	Pre-alarma temperatura devanado Fase C
ALM_B2_VT_EA221A_A	%M402	EBOOL	Pre-alarma vibración interior de bomba
ALM_B2_VT_EA221B_A	%M405	EBOOL	Pre-alarma vibración exterior de bomba

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Las Tablas 22-3 y 23-, resume las variables alcatadas de pre-alarmas y alarmas respectivamente que en la sección de desarrollo de programación de alarmas se detallara su acción.

Tabla 23-3: Variables alcatadas de memoria para Alarmas

Variable	Modbus	Dato	Descripción
G802_PIT_190107_A_ALM	%M424	EBOOL	Alarma presión de succión
G802_PIT_190107_B_ALM	%M427	EBOOL	Alarma presión de descarga
G802_TE_190107_A_ALM	%M397	EBOOL	Alarma cojinete radial interior de bomba
G802_TE_190107_B_ALM	%M400	EBOOL	Alarma carcaza en bomba
G802_TE_190107_C_ALM	%M391	EBOOL	Alarma cojinete radial exterior de bomba
G802_TE_190107_D_ALM	%M394	EBOOL	Alarma rodamiento exterior de bomba
G802_TE_191007_A_ALM	%M409	EBOOL	Alarma cojinete exterior motor
G802_TE_191007_C_ALM	%M415	EBOOL	Alarma temperatura devanado Fase A
G802_TE_191007_D_ALM	%M418	EBOOL	Alarma temperatura devanado Fase B
G802_TE_191007_E_ALM	%M421	EBOOL	Alarma temperatura devanado Fase C
G802_VT_190107_A_ALM	%M406	EBOOL	Alarma vibración exterior de bomba
G802_VT_190107_B_ALM	%M403	EBOOL	Alarma vibración interior de bomba
ALM_COM_FLOBOSS	%M462	EBOOL	Alarma comunicación Floboss S600
ALM_COM_GENERAL	%M460	EBOOL	Alarma general com-Quantum

Realizado por: Villalba, Williams,2017

3.2.7.3 Declaración de variables No-alocadas

Las variables no-alocadas son aquellas que no disponen de un espacio de memoria fijo y no se declara el mismo como se observa en la Tabla 24-3 ; su utilidad es debido a su mayor velocidad que las alocadas y en este caso particular se usa para la confirmación de las transiciones del SFC que observaremos en la programación de la secuencia de bombeo.

Tabla 24-3: Variables No-alocadas

Variable	Modbus	Dato	Descripción
Arranque_TR1	N/A	EBOOL	Transición_01 del SFC
Arranque_TR2	N/A	EBOOL	Transición_02 del SFC
Arranque_TR3	N/A	EBOOL	Transición_03 del SFC
Arranque_TR4	N/A	EBOOL	Transición_04 del SFC
Arranque_TR5	N/A	EBOOL	Transición_05 del SFC
Arranque_TR6	N/A	EBOOL	Transición_06 del SFC
Arranque_TR7	N/A	EBOOL	Transición_07 del SFC
G802_ENO	N/A	BOOL	Confirmación de activación del Drop-2

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

3.2.7.4 Programación de las tareas

Desde la Figura 15-3 a la Figura 19-3 se detallada la configuración inicial del PLC-Quantum y sus I/O analógicas, para este apartado se focalizará la estructura secuencial del proceso de bombeo, sus acciones por etapas y transiciones como lo requiere la programación de un grafcet o denominado también Secuencial Funtion Chart – SFC.

Secuencia:

La Figura 21-3 favorece la identificación del proceso por etapas basado en la secuencia de bombeo expresada en el flujograma de la Figura 8-3 cuya ciclo de elementos se describe a continuación.

- **Start_802:** Es la etapa de inicio de la secuencia donde la unidad G-802 está apagada, las MOV's están cerradas, no hay flujo por el ducto de transporte es decir está en estado estacionario.
- **TR1:** La activación de la transición TR1 depende de botón de Start desde el HMI, siempre y cuando las señales de los permisivos e interlocks se encuentren en posición inicial.

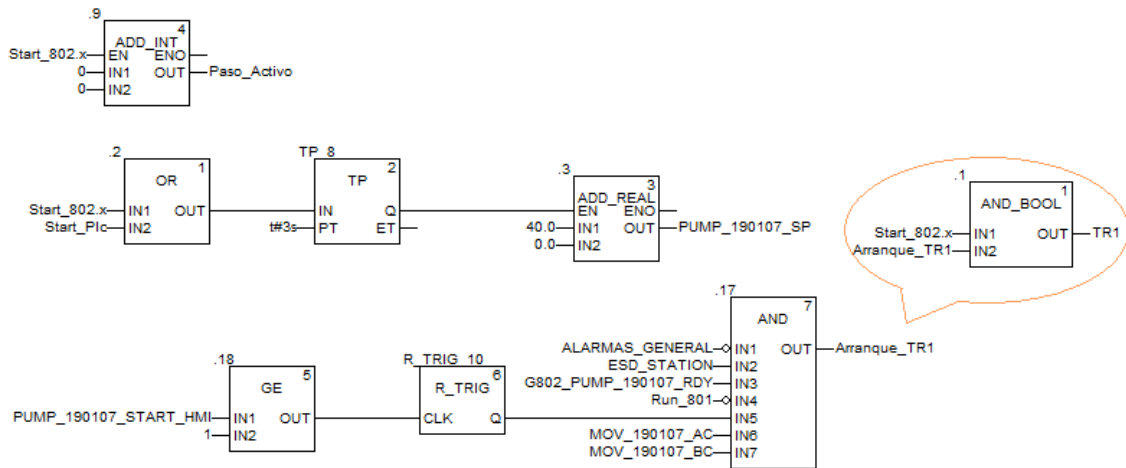
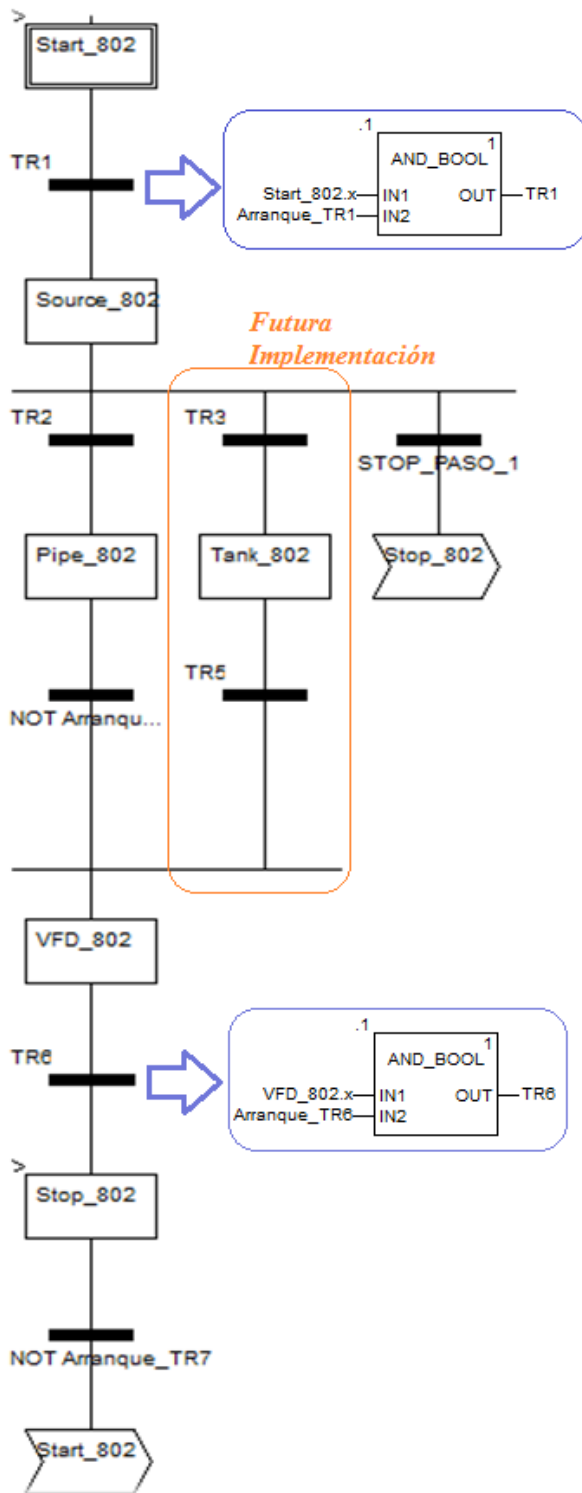


Figura 20-3: Lógica para flanquear la transición TR1.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

- **Source_802:** En la actualidad la fuente de producto es el Poliducto Quito-Ambato por lo cual esta etapa , conjuntamente con la , TR3,TR5 y Tank_802 sseran implementadas en un futuro de tal manera que con la incorporación de bombas booster se pueda bombear tomando como fuente los tanques de almacenamiento del terminal Ambato.



Etapa: Inicio de secuencia del G-802

Transición: Lógica interna del TR1

Etapa: Selección de fuente de producto limpio

Etapa: Alineación de MOV's de la fuente seleccionada

Etapa: Operación Normal de la unidad de bombeo G-802

Transición: Lógica interna de la TR6

Etapa: Apagado normal de la unidad G-802

Etapa: Salto a la etapa de inicio

Figura 21-3: Lógica SFC del proceso secuencial de la unidad G-802
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

- **TR2:** Al existir una sola fuente de decisión al momento, entonces este paso simplemente permite alcanzar la etapa siguiente.
- **Pipe_802:** Los actuadores de las válvulas de secuencia-01 se abren utilizando la Master-Station-II de Limitorque y de manera local es la apertura de los actuadores Rotor-K de la unidad de medición dinámica.
- **NOT-TR4:** Esta transición es de paso por ello esta negada, sirve para completar la convergencia en o de los ramales superiores.
- **VFD_802:** En esta parte, el programa verifica que las válvulas estén abiertas, que no haya alguna para de emergencia activada, que el VFD-801 este apagado, que el VFD-802 se encuentre listo y que no haya ninguna alarma activa, solo al cumplirse estas condiciones podrá pasar a RUN la unidad hasta alcanzar su velocidad de ralentí a los 40Hz; luego de alcanzar las velocidad angular mencionada el operador decidirá subir la frecuencia (rango 40-60Hz Figura 19-3) hasta conseguir el gradiente hidráulico capaz de superar el punto más alto de la columna de fluido dentro del perfil altimétrico de la trayectoria Ambato-Riobamba.

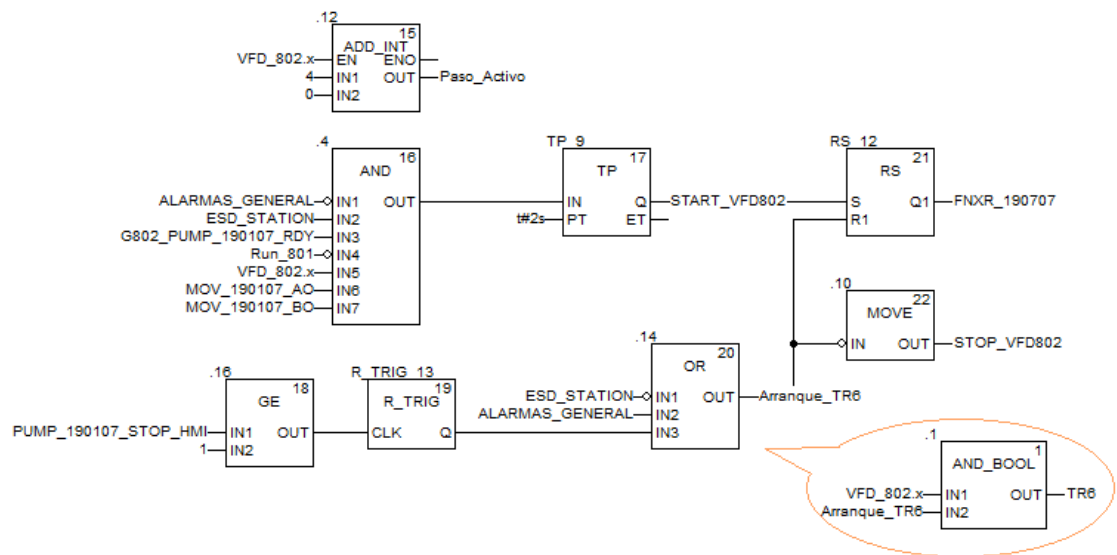


Figura 22-3: Etapa de operación normal de la unidad G-802.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

- **TR6:** Al existir alguna alarma se activara el bit de alarmas generales dando un shutdown de la unidad de manera abrupta, de manera similar si ocurriera una situación de emergencia y personal de operaciones activará uno de los pulsadores ESD también habría un shutdown de

- manera infranqueable, caso contrario si el operador decide parar la máquina entonces debe reducir la velocidad de rotación hasta los 40Hz, solo ahí podrá realizar una parada deseada.
- **Stop_802:** Si el operador decide parar la unidad de bombeo desde el HMI, si hubiera alguna falla o algún caso de emergencia entonces se flanquea la transición NOT-Arranque_TR7 y la secuencia salta al inicio de la programación.

Alarmas : Para resumir las alarmas, pre-alarmas y operación normal de la unidad de bombeo se hará uso de un bloque personalizado que en Unity Pro XL se denomina Derived Funtion Block; este DFB se repetirá en cada variable alcatada a ser monitoreada que se ejemplariza con la Figura 23-3, donde se observa que el bloque tiene doble barra vertical esto orienta que se está en presencia de un bloque personalizado DFB, el mismo que es desarrollado para simplificar la programación y poder reutilizarlo en diferentes partes de programa.

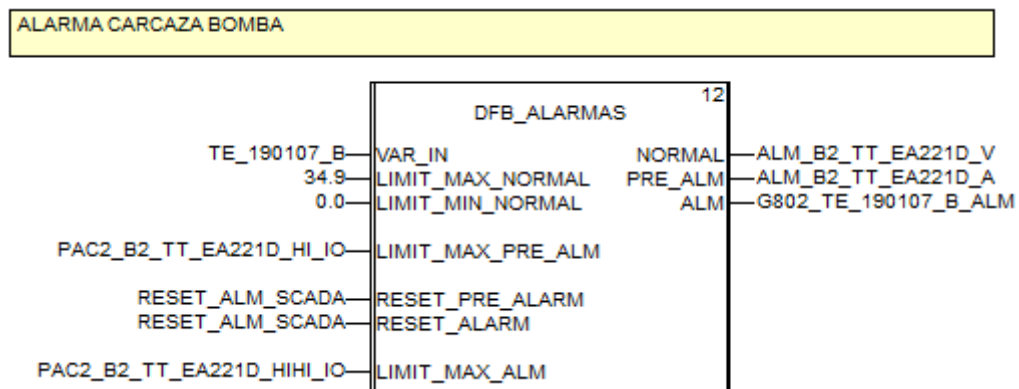


Figura 23-3: DFB para pre-alarma, alarma y operación normal de Temperatura de Carcaza
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

Para aleccionar este tema, se ha seleccionado la temperatura de la carcasa de la bomba (TE_190107_B) cuyos parámetros de alarmas son ajustados desde el HMI en base a los datos del fabricante.

De la manera como se percibe la Figura 23-3 no se conoce la programación interna, por tal motivo la programación se desglosa en las Figuras 24-3, 25-3 y 26-3.

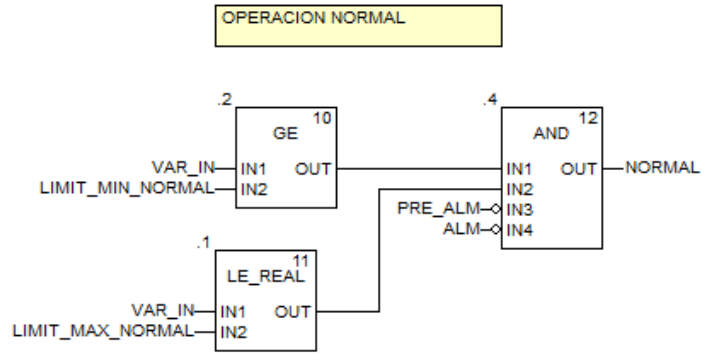


Figura 24-3: DFB de operación normal.
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

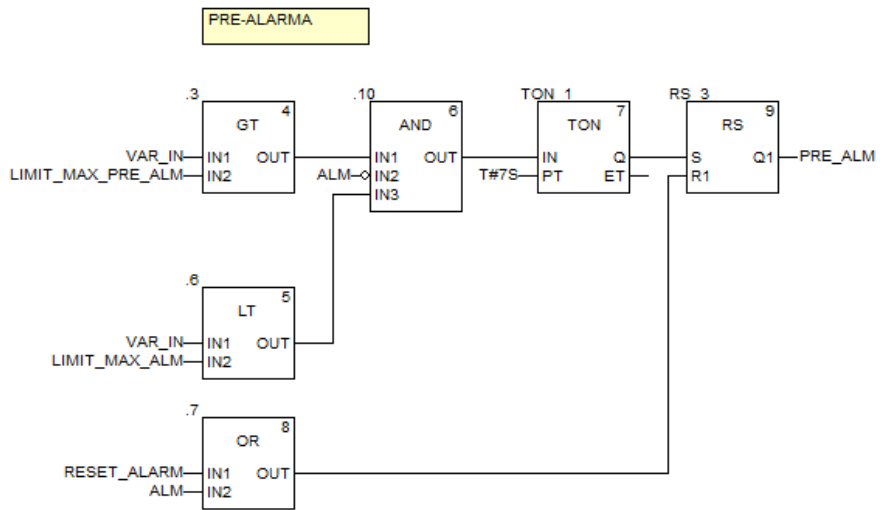


Figura 25-3: DFB de pre-larmas.
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

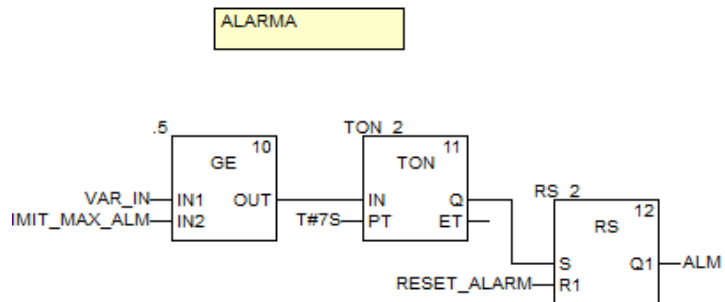


Figura 26-3: DFB de alarmas.
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

De manera semejante a la Figura 23-3, se ha programado el bloque DFB_ALARMAS para cada una de las señales analógicas de la Tabla 10-3 y adicional a estas, se agrega alarmas por falla de comunicaciones de la Tabla 22-3 y Tabla 23-3, fallas por señales digitales como los sensores discretos de presión y nivel de las torres A/B de lubricación de cojinetes, entre otras; todas estas alarmas tienen la misión de proteger la unidad G-802 ante la presencia de alguna falla y realizar el shutdown inmediato; por tal esquema, estas se concentran por grupos y salen por un solo punto discreto que se denomina ALARMAS_GENERAL como se matiza en la Figura 27-3.

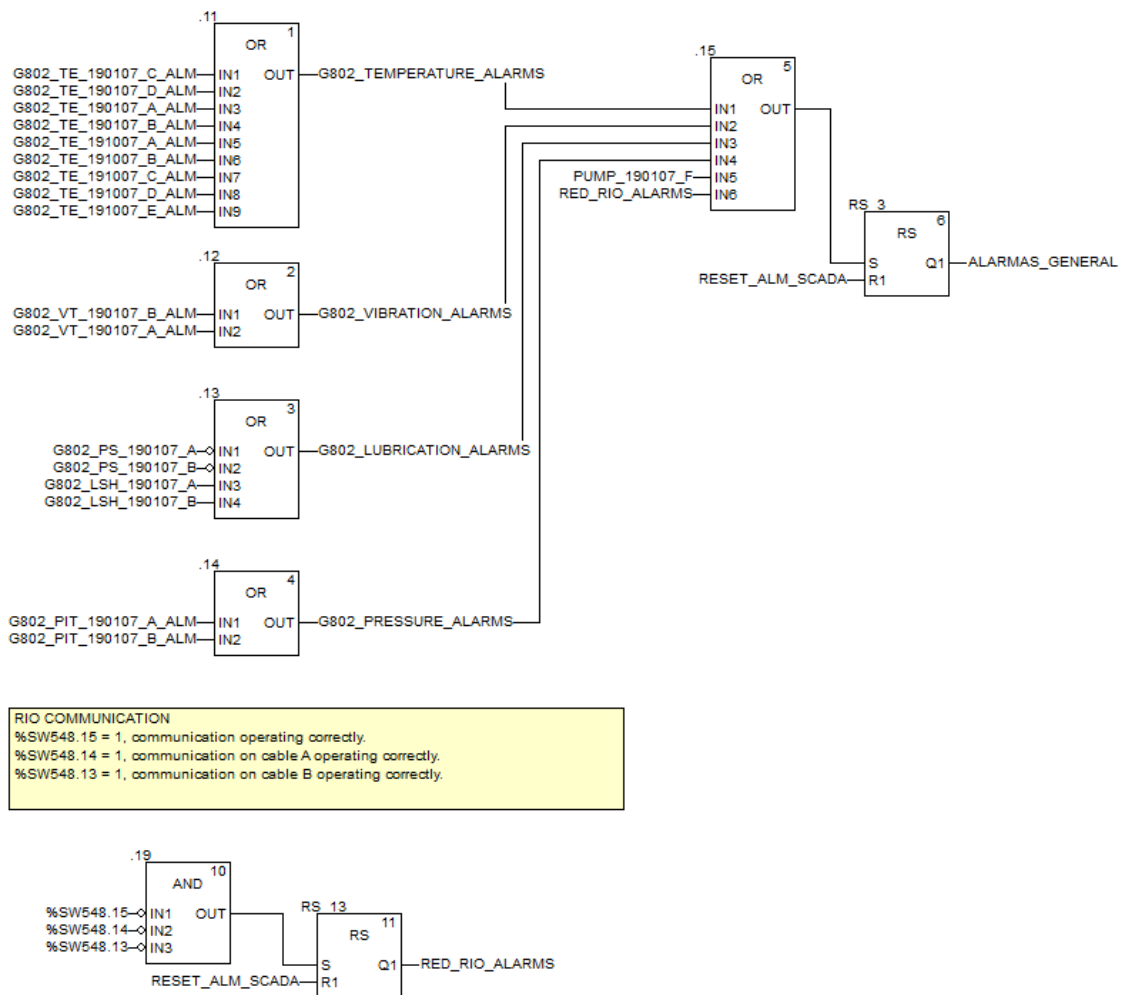


Figura 27-3: Alarma General de la unidad G-802
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

3.3 Capa de supervisión

En esta capa se tiene la facultad de monitorear y controlar el proceso operativo del ducto y sus estaciones; por tal circunstancia, de las acciones que el personal operativo tome, dependerá garantizar la operatividad y eficiencia del proceso de bombeo; cabe mencionar que en el mercado existen una variedad de software industrial enfocado a esta aplicación, pero en este caso de estudio la aplicación del interface hombre-máquina se lo ha desarrollado sobre *Wonderware System Platform 2014 R2 SP1*.

Según Schneider-Electric, empresa propietaria de Wonderware, asegura que: “System Platform es una plataforma integral de SCADA para procesos industriales y sistemas de negocio, que optimizan el rendimiento empresarial y faculta a los usuarios finales tomar decisiones inteligentes, rentables, de fabricación abierta y con un vasto aporte de herramientas en la visualización, alarmas inteligentes, herramientas flexibles de análisis y generación de informes.”

Basado en estos precedentes se decidió desarrollar la aplicación de los interfaces hombre-máquina – HMI utilizando la herramienta *Intouch HMI 2014 R2 SP1* y el *MBTCP DAServer 3.0*.

Wonderware MBTCP-DAServer: Es un programa de aplicación de Microsoft-Windows que actúa como un protocolo de comunicación de servidor y permite que otra aplicación de Windows tenga acceso a los datos de los controladores de la familia Modicon-Schneider a través de los puertos Ethernet usando Modbus TCP/IP. (Invensys, 2013)

Wonderware Intouch: Es un software de visualización de HMI que dispone de herramientas gráficas para el desarrollo de plantas, el cual tiene la finalidad de brindar una interface al operario para la toma de decisiones de control y monitoreo. (Invensys, 2014)

3.3.1 Convenios de visualización con el área operativa

Uno de los puntos de desacuerdo en el desarrollo de las pantallas de HMI con el área operativa, recae en los colores para diferente uso, tamaños de letra, gráficos personalizadas etc; de lo cual se tomó ciertas referencia de la *ANSI/ISA-101.01-2015 (Human Machine Interface)* y se alcanzó un consenso con personal de operaciones.

La Figura 28-3 focaliza el ciclo de vida de un interface hombre-máquina HMI que se ha considerado en este proyecto a fin de recabar una secuencia del desarrollo de esta aplicación, para lo cual se realizó entrevistas con el personal operativo a fin de recolectar sugerencias y plasmarlas como entradas según lo recomienda la ANSI/ISA-101.01-2015.

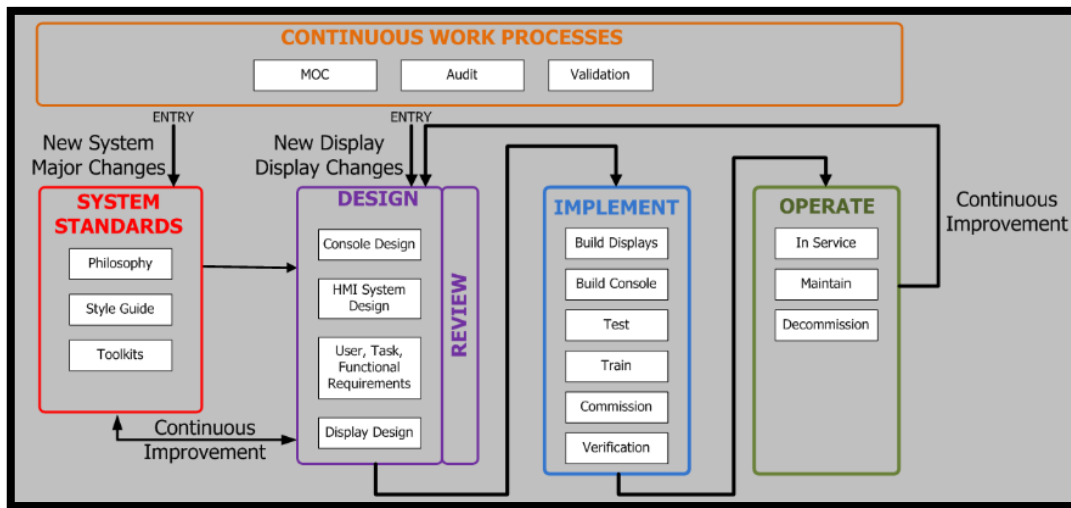


Figura 28-3: Ciclo de vida de un HMI

Fuente: (ANSI/ISA-101.01, 2015)

Tabla 25-3: Convenio de colores a ser usados en los HMI

Color	RGB	Equipo	Detalle
Rojo	255,0,0	Válvula	Estado-Open de válvula
Verde	0,255,0	Válvula	Estado-Close de válvula
Amarillo	255,255,0	Válvula	Estado de transición Opening/Closing de válvula
Rojo	255,0,0	Bomba	Estado Stopping
Verde	0,255,0	Bomba	Estado Running
Gris	192,192,192		Fondos de pantalla
Blanco	255,255,255	Trend	Fondo de tendencias
Azul	0,0,255	Trend	Señales analógicas
Cian	128,255,255	Trend	Señales analógicas
Café	128,0,0	Trend	Señales analógicas
Rojo	255,0,0	Etiquetas	Alarma de cualquier equipo
Amarillo	255,255,0	Etiquetas	Pre-Alarma de cualquier equipo
Negro	0,0,0	Etiquetas	Fondo de etiquetado.

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Uno de los puntos fue la revisión de la filosofía de control del Poliducto que reside en las ingenierías de detalle, los P&ID, experiencias de operación y el estándar propio de la empresa, de lo cual se rescató convenios que se incorporaron en el desarrollo de los HMI.

A más de los colores que se acordó estaba, el uso de la simbología para la representación de los mímicos de cada pantalla, en lo cual se acordó; que la pantalla de operación del G-802 sea lo más parecido a la realidad y centralice la operación completa de la planta, habilitar una pantalla de setpoints en relación al grado de acceso del personal, establecer una pantalla de tendencias con la selección de análisis de tag y disponer de un banco de alarmas.

3.3.2 Vision general de Wonderware-Intouch

Los requerimientos de hardware de Wonderware System Platform 2014 se detalla en la Figura 29-3, lo cual varia en relación al número de tags, y su aplicación en sistemas de 32bits o 64bits.

Installation Type	CPU (GHz)	CPU Cores (Minimum)	RAM (GB)	Storage (GB) (1wk @ max frequency)	Monitor Resolution	Network (MBPS)
Mini Installation (1 - 500 I/O per Node)	1.6	1	1	30	1024x768	100
Small Installation (1 - 5K I/O per Node)	1.8	2	2	30	1024x768	100
Medium Installation (5k - 50k I/O per Node)	2.8	4	8	500	1280x1024	1000
Large Installation (50k - 400k I/O per Node)	2.8	8	16	1000	1280x1024	1000
Preferred Environment (64-bit OS and SQL)	2.8	4	8	500	1280x1024	1000

Figura 29-3: Directrices para selección de hardware.

Fuente: (Wonderware, 2014)

Para el proyecto la aplicación será desarrollada en el hardware cuyas características son implementadas en máquinas virtuales bajo la plataforma de virtualización VMware cuya distribución de hardware y software es el que se establece en la Tabla 26-3.

Para la instalación del software Wonderware System Platform Platform 2014 SP1 en 64-bits, hay que realizar las siguientes instalaciones de software previas:

- Instalar el NET Framework 3.5 features.
- Instalar el Web Server (IIS) Support.
- Instalar el SQL Server 2012 Service Pack 1.

Después de cumplir con las instalaciones anteriormente enlistadas, se procede a instalar del compendio de Wonderware System Platform los siguientes programas:

- Wonderware Intouch 2014 R2 SP1, Development and Runtime.
- Licensing Manager and Server.

Tabla 26-3: Características de las PC's de los HMI.

<i>Windows edition</i>	<i>Windows Server 2012R2 Standard</i>
System	
<i>Processor</i>	<i>Intel(R) CPU E5-2630 0 @2.30GHz 2.30GHz(4 processors)</i>
<i>Installed Memory(RAM):</i>	<i>24.0GB</i>
<i>System Type:</i>	<i>64-bit Operating system</i>

Realizado por: Villalba, Williams,2017

Al disponer del software completo instalado, se procede a configurar el ArchestrA.DASMBTCP.3 como lo detalla la guía de Wonderware MBTCP DAServer .(Invensys, 2013).

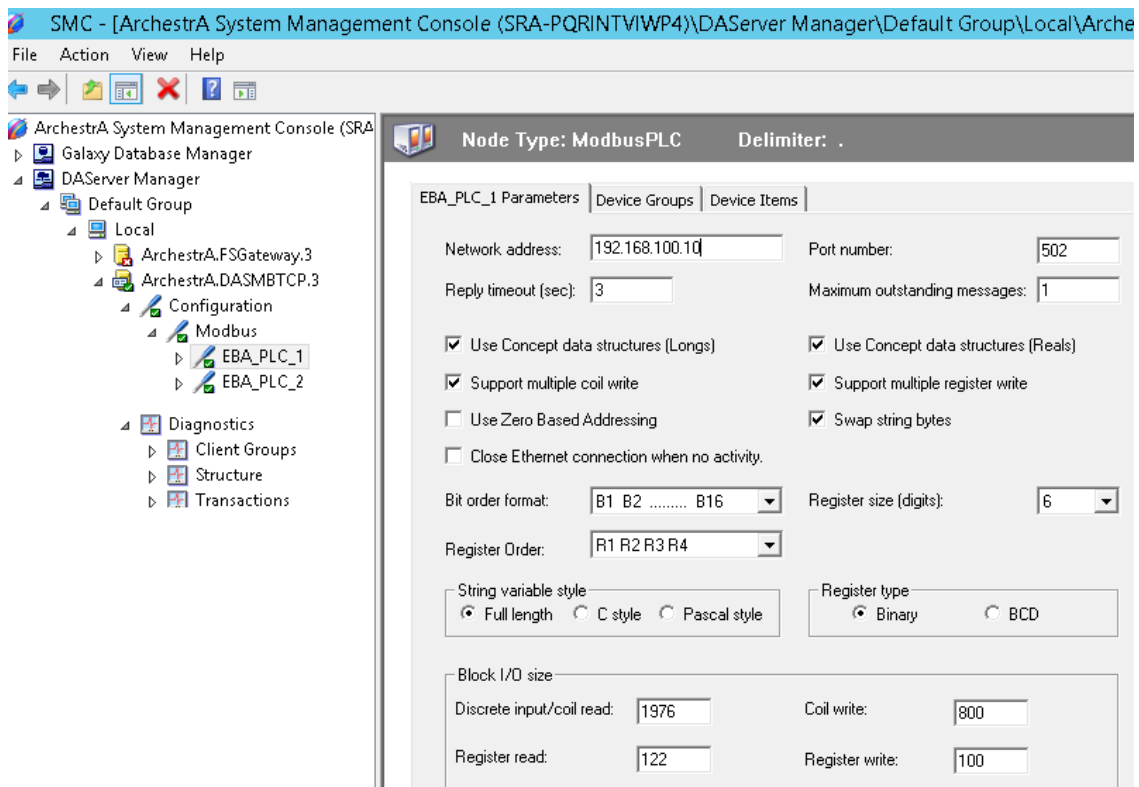


Figura 30-3: SMC- Configuración del DASMBTCP.3 – Parámetros.

Realizado por: Villalba, Williams,2017

En esta parte se tubo las siguiete consideracion; Como se utilizo un PLC-Quantum con registros de 6 bits entoces se debe configurar este punto en el DASMBTCP y tambien considerar el formato de la orden de los Bits como se observa en la Figura 30-3.

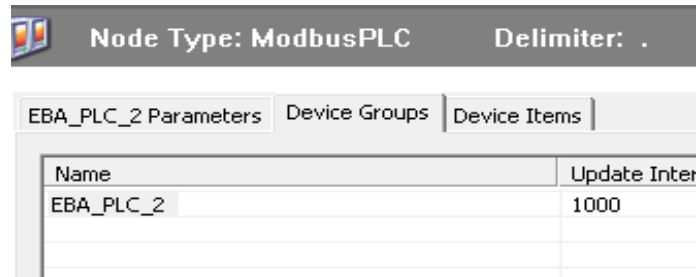


Figura 31-3: SMC- Configuración del DASMBTCP.3 – Device Groups.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

El Device Group es un unico nombre con el cual se reconocera posteriormente los tags asociados a este grupo en Intouch , ademas aquí se configura el intervalo de actualizaciones.

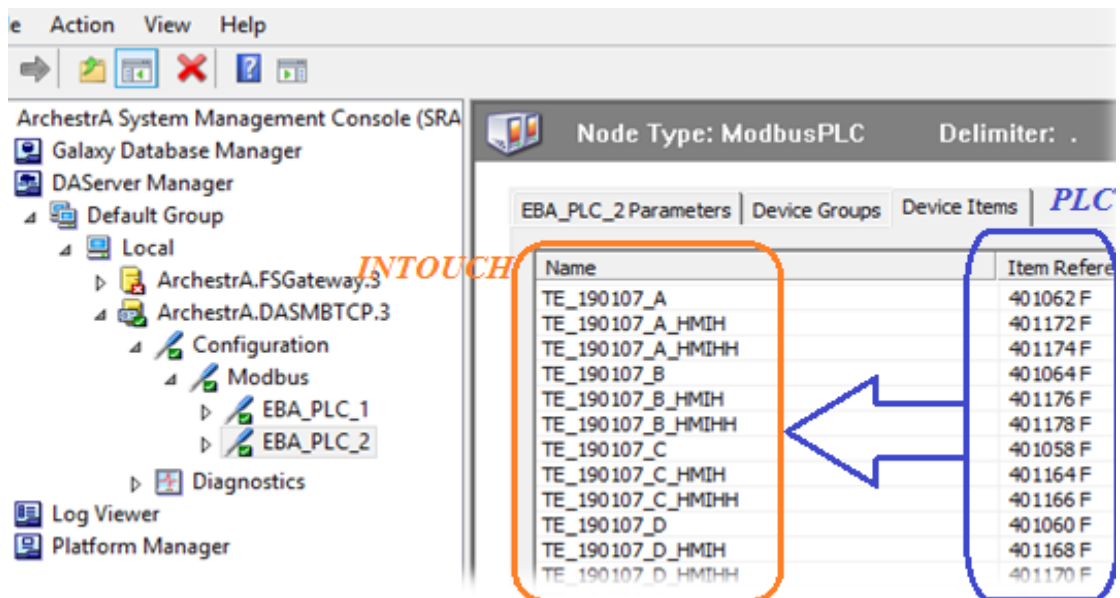


Figura 32-3: SMC- Configuración del DASMBTCP.3 – Device Items.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

Finalmente se enlista el mapeo de las variables modbus del PLC con su correspondiente Tag de reconocimiento en Intouch como se atisba en la Figura 32-3.

Luego de haber desarrollado la configuracion del DAServer, se procede a desarrollar las pantallas de aplicación en realcion a los reuqerimiento del area operativa y siguiente lineamientos del ciclo de vida de un HMI de la ANSI/ISA-101.01-2015.



Figura 33-3: HMI-Pantalla de acceso.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

En primera instancia se desarrolla una pantalla de inicio donde se deba realizar un *Login* (Figura 33-3) para la aplicación, aquí se cataloga a los usuarios con su nivel de acceso de 3000 para personal de operaciones con lo cual podrán visualizar y controlar la operación pero no dispondrán de la pantalla para modificación de setpoints, por otra parte, un acceso de 9999 dará toda la accesibilidad prevista para jefaturas y la administración de la aplicación, pudiendo así realizar modificaciones de setpoints, crear usuarios, modificar los niveles de acceso y cerrar la aplicación; ya realizado el *Login*, se tiene acceso a las demás pantallas que se manifiestan en figuras posteriores.

La Figura 34-3 es el cumplimiento del primer acuerdo, en el cual se dispone una pantalla que engloba las variables principales de operación de la planta, dando así la facultad al operario de monitorear el funcionamiento, las alarmas y el parámetro fundamental de densidad en grados API para el cambio de baches

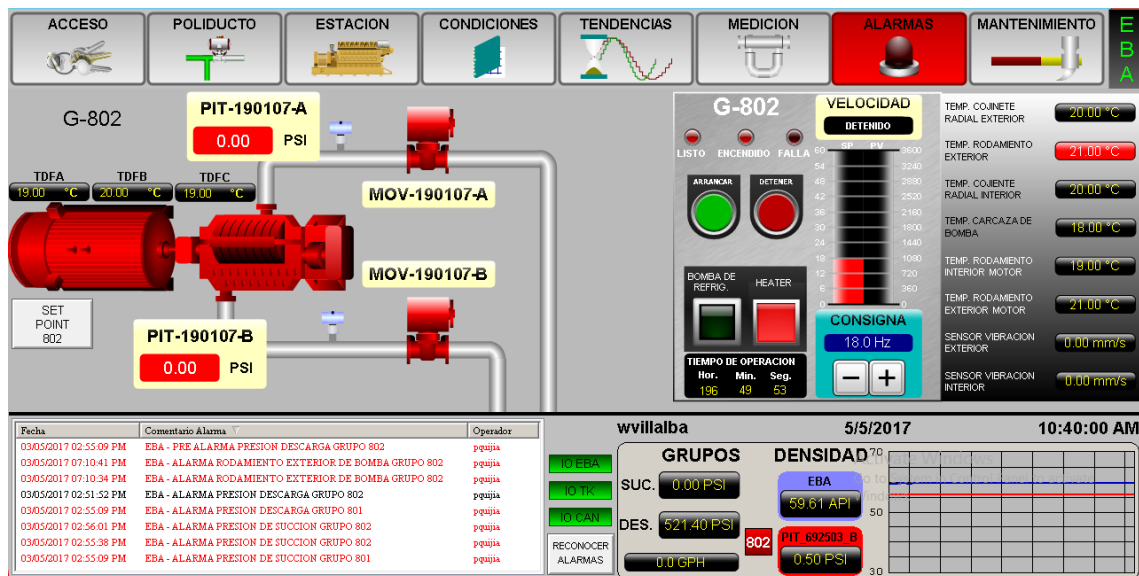


Figura 34-3: HMI-Pantalla de operación del G-802
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

En la Figura 34-3 detalla dos submenús constantes, el menú superior con iconos de acceso a otras pantallas (algunas de ellas en desarrollo) y el menú inferior donde se constata un resumen rápido de las alarmas presentes, las magnitudes de las presiones principales, la densidad en API y un botón de reconocimiento de alarmas.

La pantalla central muestra la operación de la unidad, conjuntamente con sus líneas de ingreso y salida, las MOV-190107-A en la succión, la MOV-190107-B en la descarga a más de las magnitudes de presión; adicionalmente se observa los valores de temperatura de las fases del bobinado del estator. En la parte derecha los indicadores superiores de “Listo”, “Encendido” y “Falla” son los indicadores digitales provenientes del VFD-802, los botones de “Arrancar” y “Detener” sirven para dar los comando de marcha/paro a la unidad, la barra de “Consigna” servirá para asignar la frecuencia que se desea que traiga el VFD-802, por tal razón, se configura el setpoint de rpm de la máquina y finalmente los indicadores de temperatura analógicos de temperatura localizados dentro de etiquetas que cambian de color negro a rojo en caso de que se presenten alarmas.

En la parte izquierda se ha insertado un botón “Set-Point” el mismo que tiene la finalidad de exhibir la pantalla de la Figura 35-3, en el cual, si se dispone del nivel de acceso adecuado, se podrá realizar modificaciones de los parámetros en mención.



Figura 35-3: HMI-Pantalla de Setpoints del G-802
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

La pantalla de la Figura 35-3 muestra la configuración de la Tabla 10-3, estos setpoints de alarmas son modificables pero debe considerarse las condiciones hidráulicas del ducto y de la planta; adicionalmente, estos valores son los parámetros de ajuste de los DFB_ALARMAS presentado para cada tag en la Figura 23-3..

Como esta aplicación fue creado como “Modern” entonces es posible utilizar “ Archestra-Symbols” como es el caso de la pantalla de tendencias de la Figura 36-3, donde se observa un símbolo de tendencias configurable a través del WindowMaker, el mismo que resume la tendencia de temperaturas que están siendo monitoreas durante el proceso de bombeo.

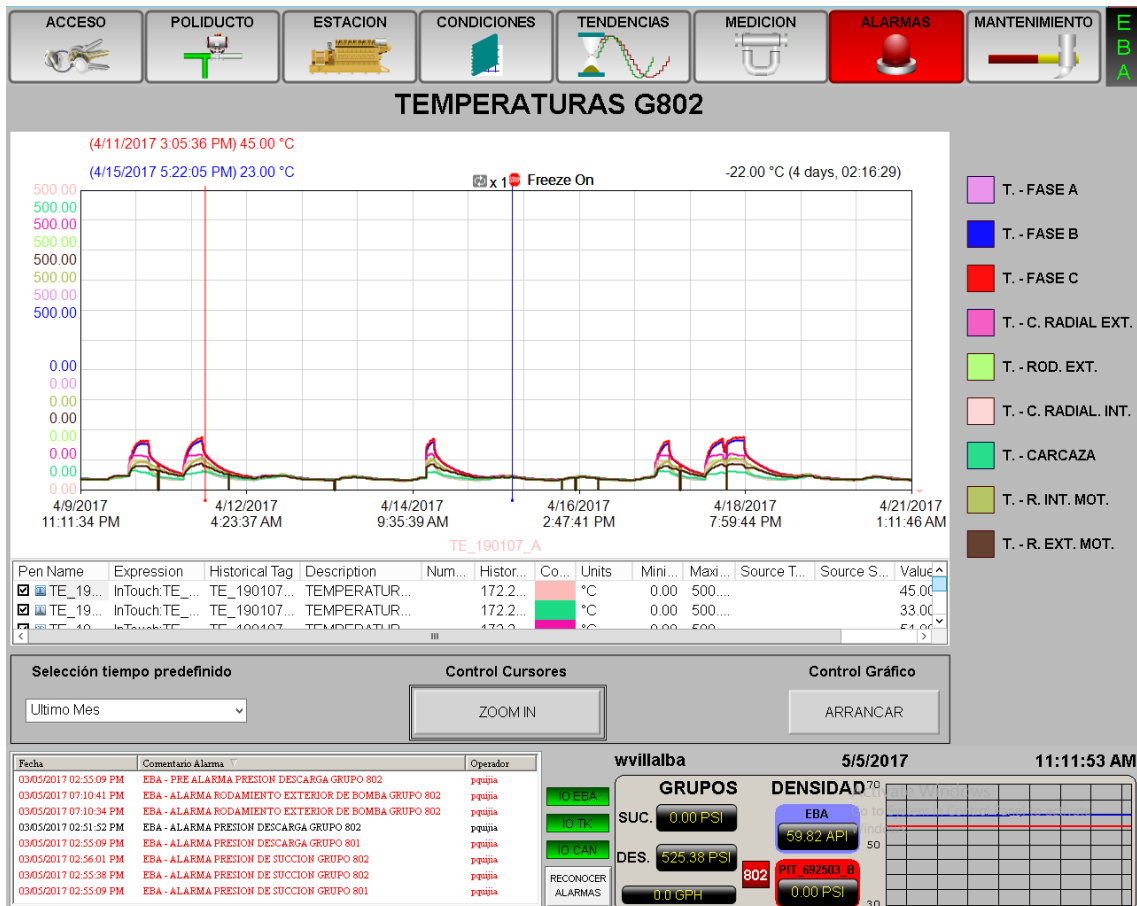


Figura 36-3: HMI-Pantalla de tendencias del G-802
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Esta herramienta es heredada del antiguo “Trend-Active-Factory” y ha sido embebida dentro de Intouch 2014 R2 SP1 con las mismas prestaciones, es así que es posible obtener una tendencia de un Tag seleccionado modificando su periodo de tiempo, es posible realizar acercamientos para ver detalles dentro de la ventana de tiempo que se elija con las barras verticales Roja-Azul y pulsando “ZOOM IN” y finalmente la tabla en la parte inferior de la tendencia detalla todos los elementos configurados por cada Tag historiado.

Por último, se desarrolló una pantalla de alarmas históricas (Figura 37-3), donde se puntualiza el tiempo a lo que se presentó la alarma, el estado de la misma, el grupo de pertenencia y un comentario de la alarma.

Es importante reconocer el estado de una alarma, por tal razón la pantalla fija inferior muestra las alarmas activadas como un sumario y color rojo, estas desaparecen al pulsar “Reconocer-

Alarmas”, pero siempre estarán presentes en la pantalla de Alarmas-Históricas por tal razón que Wonderware Intouch ha definido colores para poder distinguir el estado de la alarma.

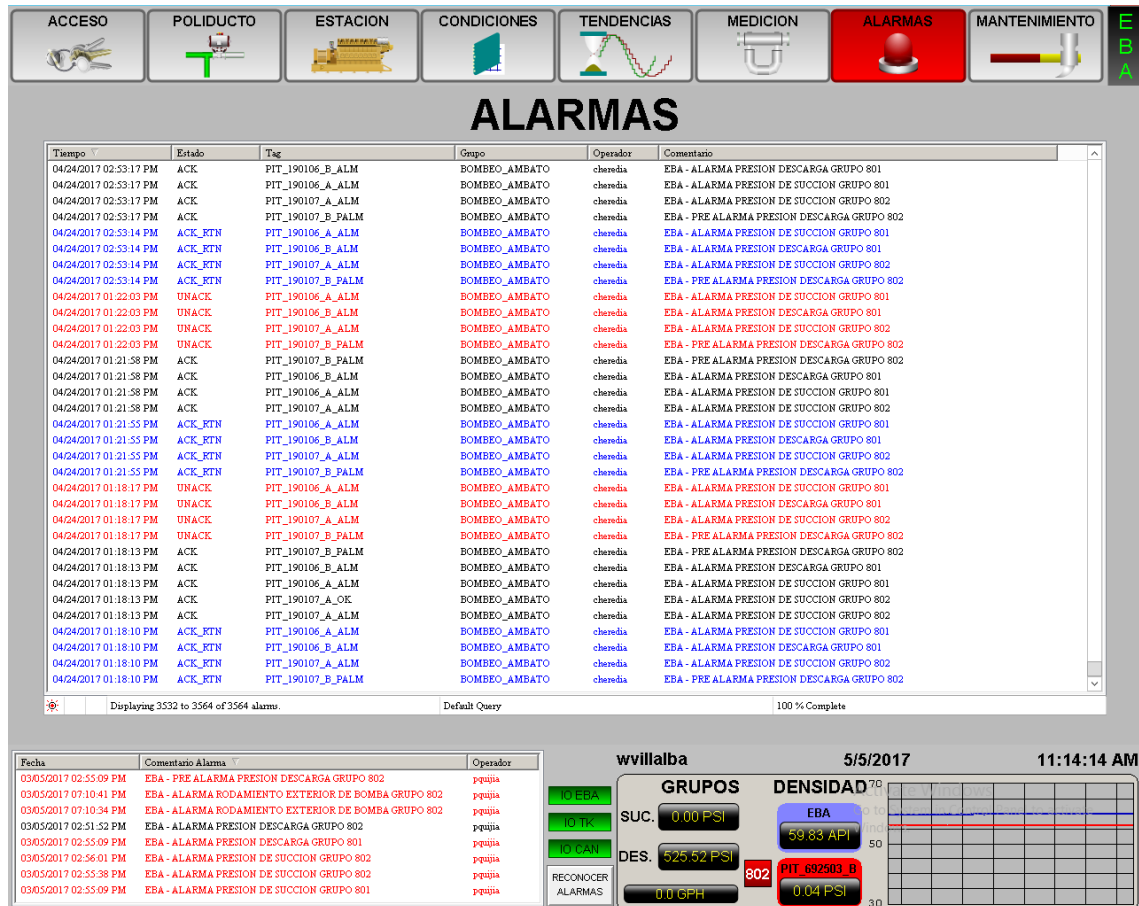


Figura 37-3: HMI-Pantalla de alarmas del G-802
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Las alarmas de color “Rojo” significa que una alarma está presente en ese momento y no ha sido reconocida “UNACK”, la de color “Negro” muestra una alarma que aún está presente en la planta pero ya ha sido reconocida por el operador “ACK” y las alarmas históricas en “Azul” avizoran alarmas que fueron reconocidas y sus valores han retornado a los limites seguros de planta.

3.4 Capa MES

Esta es una capa estadística con lo cual podemos avistar los índices de producción de la planta, que para nuestro caso de estudio y como apoyo en planta se dispone de un Historian Client que

es parte del System Platform , en el cual se podrá realizar un análisis por cada Tag, se puede generar informes estadísticos, tendencias históricas y consultas a la base de datos del Wonderware Historian; pero el alcance de este estudio no cubre estos conceptos sino más bien a tema de información para el lector.

CAPÍTULO IV

4 DISEÑO DE CONTROLADORES -ANFIS

La segunda parte del planteamiento del proyecto de tesis, es el diseño de un controlador difuso que será entrenado mediante ANFIS (Adaptive Neuto-Fuzzy Inference System), para lo cual, si bien un controlador difuso no requiere la identificación de la planta, es menester aclarar que al ser un diseño de un modelo de controlador se hace necesario el conocimiento dinámico de la planta en virtud de poder realizar las simulaciones del caso; entonces, asumiendo este orden fue necesario la automatización de la planta, la adquisición de datos, la identificación de la dinámica de la planta y finalmente el diseño del controlador. Dado que la automatización ya se ha focalizado en el capítulo anterior, este apartado puntualizará su atención en los otros tópicos antes mencionados.

4.1 Diagrama de bloques para flujo de datos

Antes de proceder con la adquisición de datos para la identificación de planta, se considera necesario entender el flujo de datos a través del diagrama de bloques de la Figura 1-4, donde se observa que durante la operación permanente, es decir cuando la unidad de bombeo trabaja en el rango de 40hz a 60hz esta dispone en la actualidad de un control en lazo abierto, cuyo flujo de datos pasa del setpoint en Hz del HMI mediante modbus hacia el controlador del PLC y este a su vez escala la señal en un rango de 14.4mA – 20mA para suministrar al VFD-802.

La planta para este caso de estudio esta estipulada en un solo bloque donde la señal de entrada o denominada señal de control son los miliamperios que ingresa al variador de frecuencia VFD-802, este maniobra la frecuencia obteniendo influencia sobre la velocidad angular del motor; como el motor y la bomba disponen de un acople mecánico de relación 1:1 las rpms del motor se transfieren a la bomba e influyen directamente sobre el sistema hidráulico de bombeo cuyos parámetros de control para este caso de especifico de estudio son las presiones de succión y descarga del sistema, los cuales son medidos a través de la instrumentación que se detallada en el

capítulo III y cuya señal de salida de 4-20mA retorna al PLC por medio de su tarjeta de entradas análogas, a su vez estas señales son desplegadas en el HMI via comunicación modbus/ETH.

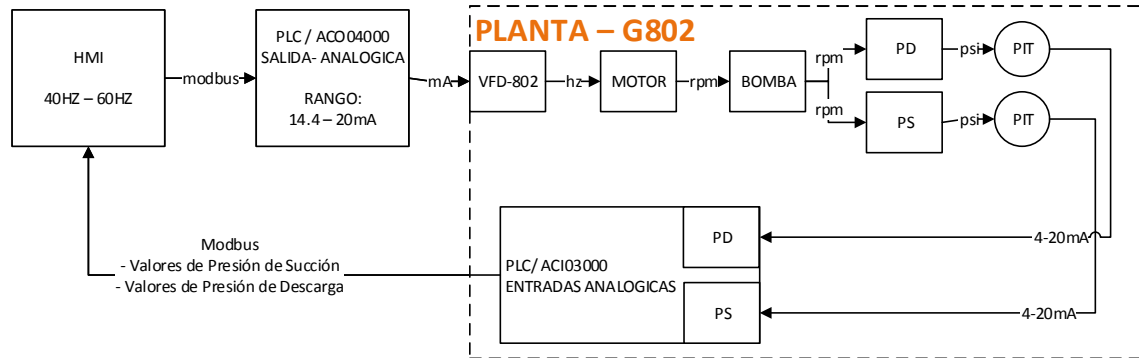


Figura 1-4: Diagrama de bloques de flujo de datos
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Luego de haber realizado el análisis del párrafo anterior, se pudo extraer que las variables importantes a considerar para la identificación de planta son los miliamperios suministrados al VFD como señal de control y las presiones del sistema como señales de salida proceso; estos tres parámetros serán la base del estudio que se planteara en los acápites posteriores; razón por la cual la Figura 1-4 estriba un solo bloque como planta dentro de la cual está el detalle de lo antes mencionado.

4.2 Adquisición de datos

Para la adquisición de datos de planta, se seleccionó los datos que son aportantes a la dinámica del sistema explicados en el acápite anterior y mediante comunicación modbus/Ethernet entre Labview Myrio-2016(National Instruments) y el PLC-Quantum (Schneider-Electric) se llevó a cabo la adquisición de datos con un tiempo de muestreo de 500ms como se observa en la Figura 2-4 .para luego ser almacenado en matriz como tabla de texto viabilizada en la Figura 3-4.

Como se detalló en el acápite anterior las principales variables de enfoque están en las presiones tanto al ingreso como a la salida de la unidad, estas a su vez se ven afectadas de manera directa por la velocidad de rotación de la bomba, cuyo parámetro de ingreso depende de los mili-amperios que se le inyecte al variador de frecuencia VFD-802 como se explica en la Figura 1-4; por esta

razón el enfoque es buscar que estos dos parámetros de salida que no tienen una relación lineal puedan ser controlados a fin de buscar mayor impulso hidráulico dentro de la trayectoria del ducto sin perder seguridad en el lado de succión de la bomba.

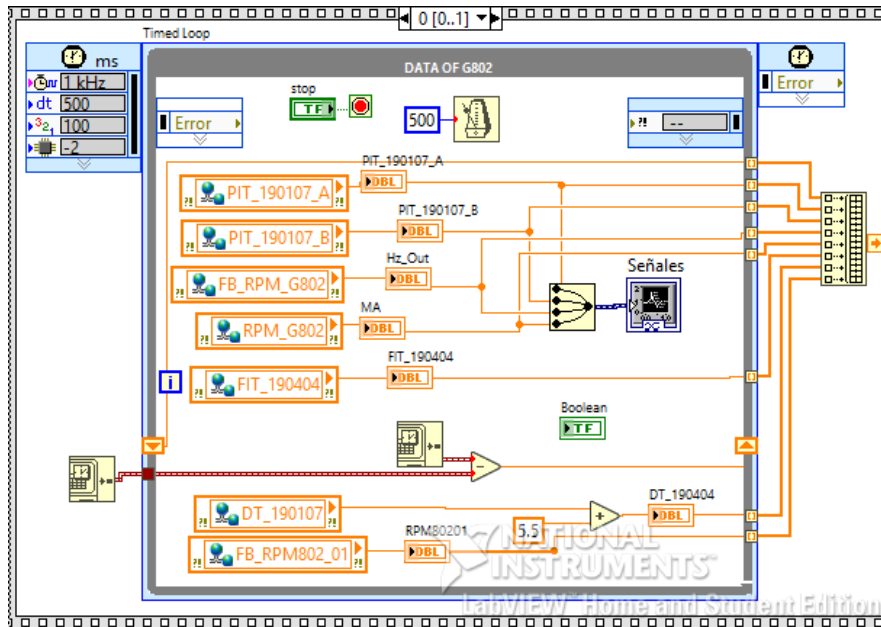


Figura 2-4: Modbus-Eth en Labview myRIO-2016
Realizado por: Villalba, Williams,2017

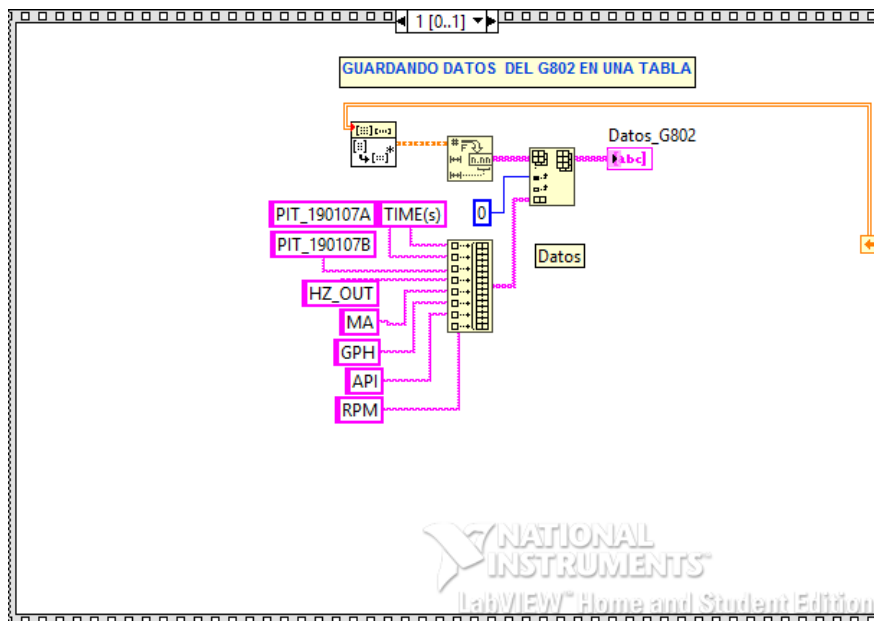


Figura 3-4: Almacenamiento de datos en Labview myRIO-2016
Realizado por: Villalba, Williams,2017

Las presiones de la unidad de bombeo con una densidad de 60-API perteneciente a las gasolinas, se comportan de manera inversa como se manifiesta en la Figura 4-4, a medida que se incrementa la velocidad de rotación de la unidad de bombeo la presión de descarga aumenta mientras que la presión de succión disminuye.

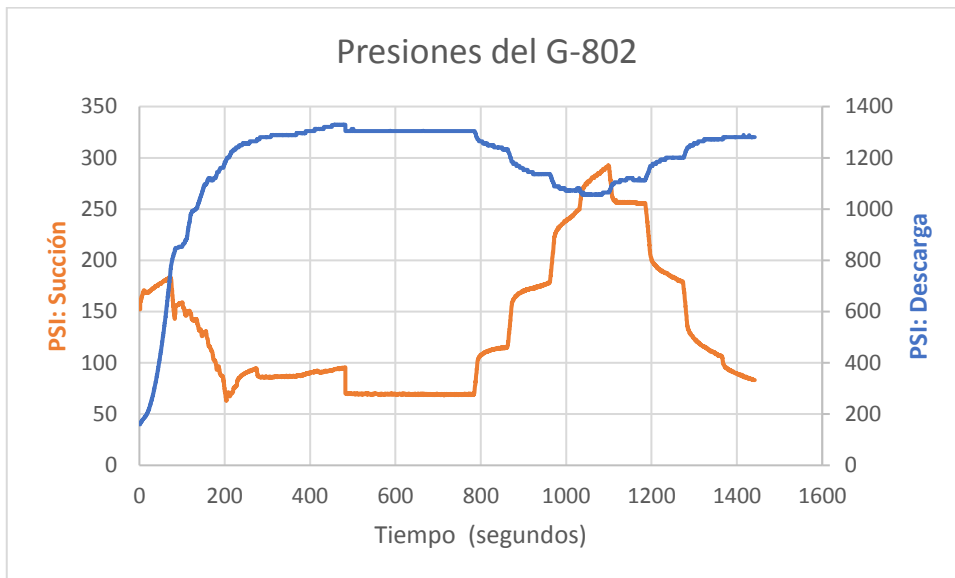


Figura 4-4: Relación de presiones de la unidad G-802
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Durante los primeros 100s la unidad está pasando de estado en reposo a su velocidad de ralentí según lo estipula el flujograma de la Figura 8-3 del capítulo anterior, es decir alcanza los 40Hz que como señal de control al VFD-802 se traduce en 14.4mA y donde la presión de descarga empieza a vencer la columna estática de sistema en este momento el operador puede en base a las condiciones operativas hidráulicas disponer de la aceleración de la unidad hasta alcanzar los 60Hz o 20mA, es por ello que el rango de la señal de excitación se lo hace entre 40-60Hz, que es la relación directa al rango de 14.4 a 20mA de señal de control del VFD.

De manera concordante al diagrama de bloques de la Figura 1-4 donde la planta se engloba en un solo bloque es importante mostrar la relación lineal y directa de los parámetros internos de la planta donde Hz son escalados a miliamperios para el VFD-802 y consecuentemente la velocidad de rotación del conjunto motor-bomba también es escalada en rpms como detalla la Figura 5-4.

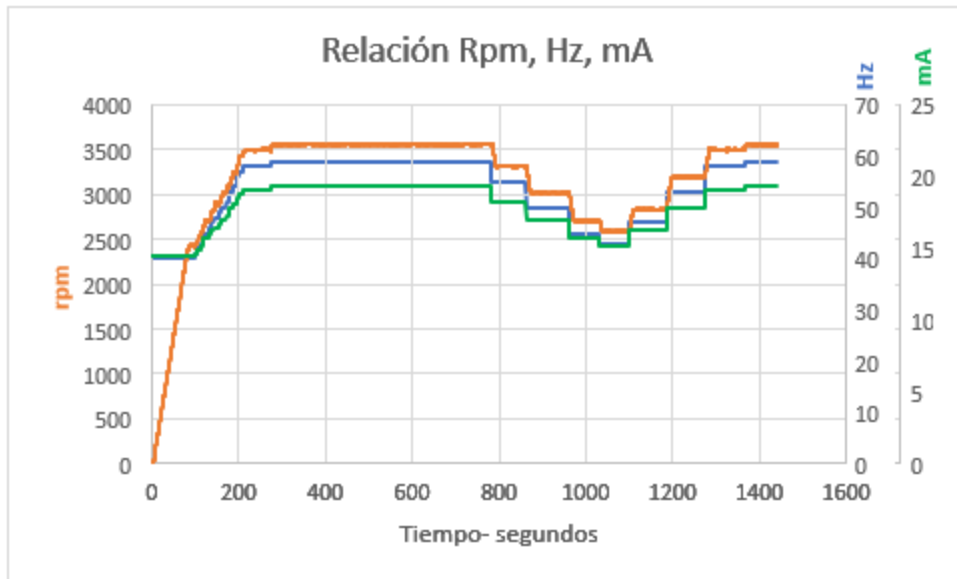


Figura 5-4: Relación entre RPM, Hz y mA de la G-802
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

4.3 Identificación de la dinámica de la planta

Como propuesta de los objetivos de tesis fue la identificación de un modelo neuronal de la planta que sustente la simulación de los controladores; para ello fue menester realizar una cantidad basta de pruebas hasta encontrar un modelo que satisfaga los datos adquiridos del G-802. Al final se logró obtener un modelo neuronal con estructura NARX-(Nonlinear autoregressive network with exogenous inputs), cuyos resultados reproduce con una alta exactitud los datos adquiridos en planta, lo que fundamenta la simulación y el trabajo de este capítulo.

4.3.1 Modelo neuronal de la unidad G-802

Sin lugar a duda, la identificación del modelo de planta constituyo una de los retos más complejos debido quizás a la falta de experticia en la selección del tipo de red neuronal, tipo de algoritmo de entrenamiento, selección de capas y más parámetros; pero como primicia fue menester conocer el rango de trabajo de la señal de entrada al VFD y las presiones que rigen la unidad de bombeo, donde la Figura 6-4 nos facilita una visión general tanto en el proceso de arranque y el proceso de operación normal dentro del rango de la señal de entrada [14.4 a 20mA], de lo cual se puede

señalar que la presión de descarga tiene una relación directamente proporcional a la señal de entrada, es decir si la unidad de bombeo incrementa su velocidad de rotación (Figura 5-4) la presión de descarga también se incrementa.

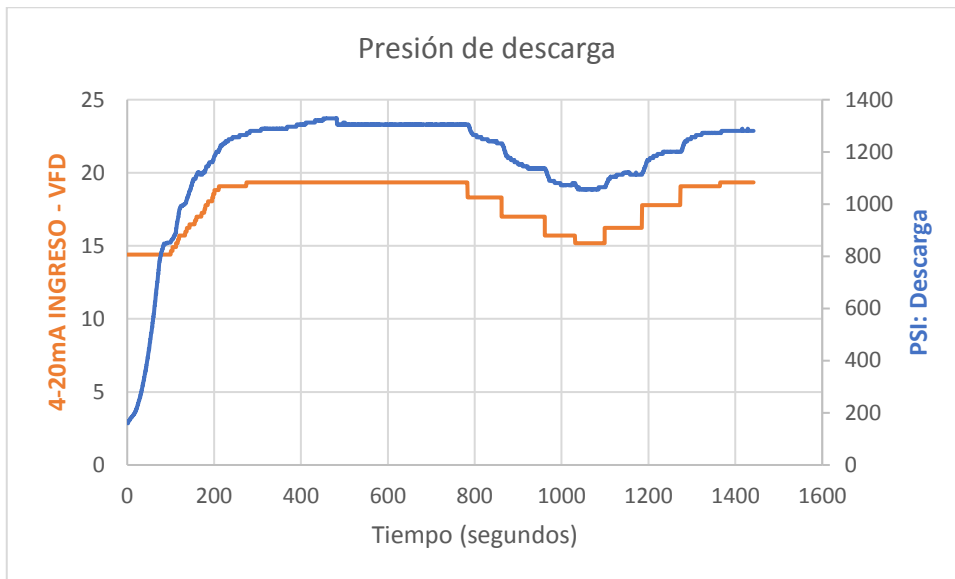


Figura 6-4: Relación entre la entrada de 4-20mA al VFD y la presión de descarga de la unidad
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Antes de proceder al entrenamiento es de extrema importancia realizar un preprocesamiento de los datos de tal manera que a través de un filtrado se pueda eliminar ruidos y como los parámetros físicos de la unidad disponen de diferentes rangos de trabajo es preponderante efectuar un procedimiento de escalamiento o normalización para adquirir un entrenamiento más eficiente. (Segura, 2017)

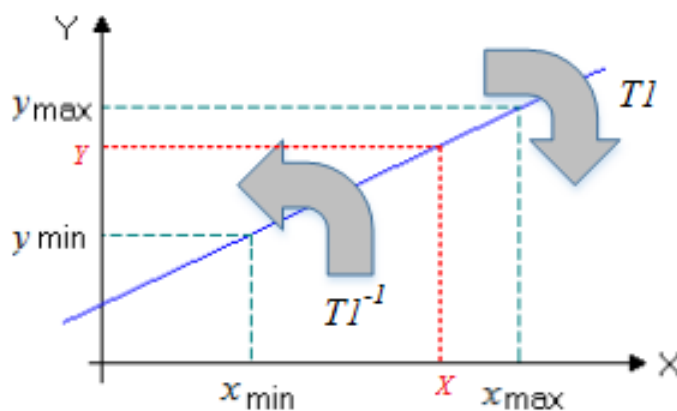


Figura 7-4: Mapeo lineal entre el dominio X de la variable física y el dominio normalizado Y.
Fuente: (Segura, 2017)

El mapeo desde el dominio de la variable de entrada en mA para el VFD y de las variables de presión de la bomba hacia el rango de operación normalizada se lo realizo a través de la transformación lineal T1 que se detalla en la ecuación (4.1), donde X es el dominio original de las variables e Y el dominio normalizado.

$$(x) \rightarrow T1(x) = y = Y_{min} + \frac{Y_{max} - Y_{min}}{X_{max} - X_{min}} * (x - X_{min}) \quad (4.1)$$

Para retornar desde el dominio normalizado Y al dominio de las variables físicas X se realiza una transformación lineal inversa como lo detalla la ecuación (4.2).

$$(y) \rightarrow T1^{-1}(y) = x = X_{min} + \frac{X_{max} - X_{min}}{Y_{max} - Y_{min}} * (y - Y_{min}) \quad (4.2)$$

Los rangos reales de las variables físicas de operación y su normalización se resumen en la Tabla 1-4; cabe señalar que se seleccionó el rango normalizado de 0 a 1 debido a que las funciones de membresía de los controladores neurodifusos que se diseñaran en un apartado posterior, por concepto se manejan dentro de este rango de operación, no obstante, se puede seleccionar otros rangos normalizados como lo expresa (Niño, 2010).

Tabla 1-4: Mapeo de Rangos entre los dominios real y normalizado.

<i>Variable</i>	<i>Rango Real</i>	<i>Rango Normalizado</i>
Miliamperios	14.4 - 20 mA	0 - 1
Presión de succión	68.98 - 290.17 psig	0 - 1
Presión de descarga	1056 - 1328 psig	0 - 1

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

El algoritmo del Anexo D desarrollado en Matlab es para efectuar el pre-procesamiento de datos donde se observa tanto el filtrado de los mismo y la normalización aplicando las ecuación 4.1

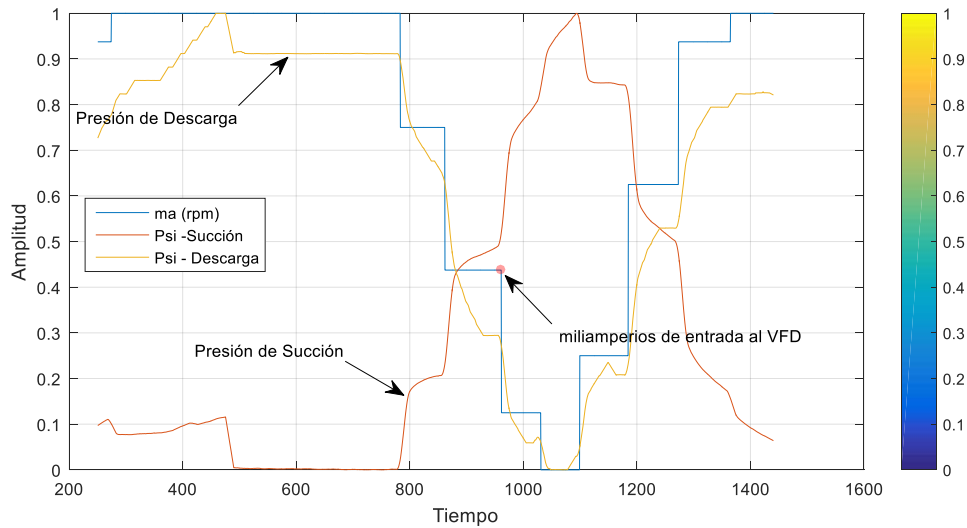


Figura 8-4: Dominio normalizado de las variables
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

Luego de realizado el pre-proceso de datos, se presenta en la Figura 8-4 un resumen de las señales a fin de observar su completa similitud con los valores originales de las Figura 4-4 y Figura 5-4; a partir de estos datos normalizados se realizará los análisis posteriores.

4.3.1.1 No-lineales Auto-Regresivas con entradas externas - NARX

Las redes neuronales Narx son redes recursivas que se basan en serie de tiempo las cuales son observaciones tomadas secuencialmente, donde el predecir es estimar valores futuros de una serie de tiempo a partir de los valores actuales y pasados.(Haykin, 2009)

Las redes Narx están sustentadas por la ecuación 4.1 donde los datos de salida, depende de los valores anteriores de salida y entrada; F es una función no-lineal, Y_n y U_n son los valores presentes de salida y entrada respectivamente y los subíndices p/q son la cantidad de salidas-entradas anteriores que se deben tomar en cuenta para calcular el dato de salida de predicción.

$$Y_{n+1} = F(Y_n, \dots, Y_{n-q+1}; U_n, \dots, U_{n-p+1}) \quad (4.3)$$

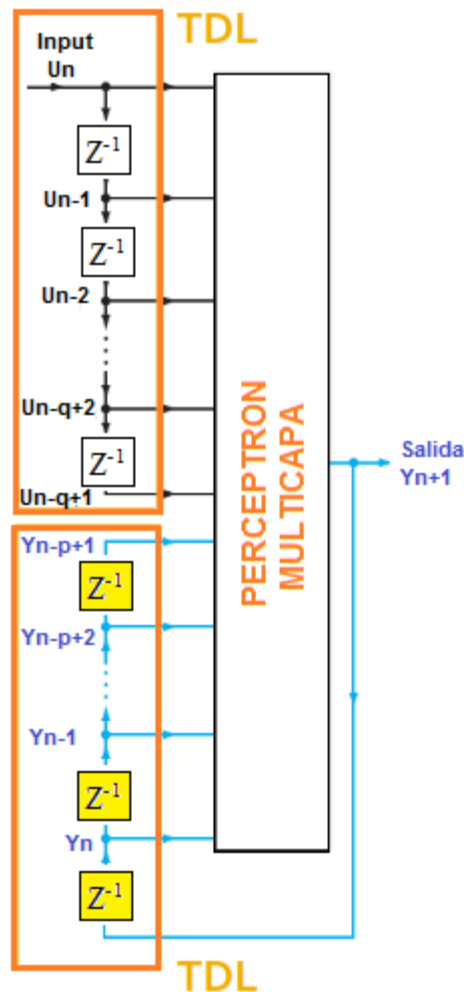


Figura 9-4: Modelo NARX
Fuente: (Haykin, 2009)

La Figura 9-4 contempla la estructura de la red Narx donde la serie de tiempo entra por la izquierda y va transformándose en vectores de tamaño p/q al pasar por los retardos (Z^{-1}); a estas memorias las denominan tapped-delay-line (TDL) cuyo contenido alimenta la capa de entrada de una red perceptrón multicapa. (Haykin, 2009)

Según Liu y Song(2009);la red perceptrón multicapa trabaja como el sistema no-lineal donde la función de activación ‘tansig’ es usada en la capas ocultas y ‘purelin’ como función de activación de la capa de salida; adicionalmente, el algoritmo de entrenamiento es Levenberg-Marquardt para ajustar los pesos de la red; sin embargo, Matlab dispone también el algoritmo de entrenamiento por regulación bayesiana que se describe en el capítulo 2 del marco teórico.

El procedimiento de identificación con Narx lo expresan Liu y Song(2009); como un proceso de cinco pasos que los resumen de la siguiente manera:

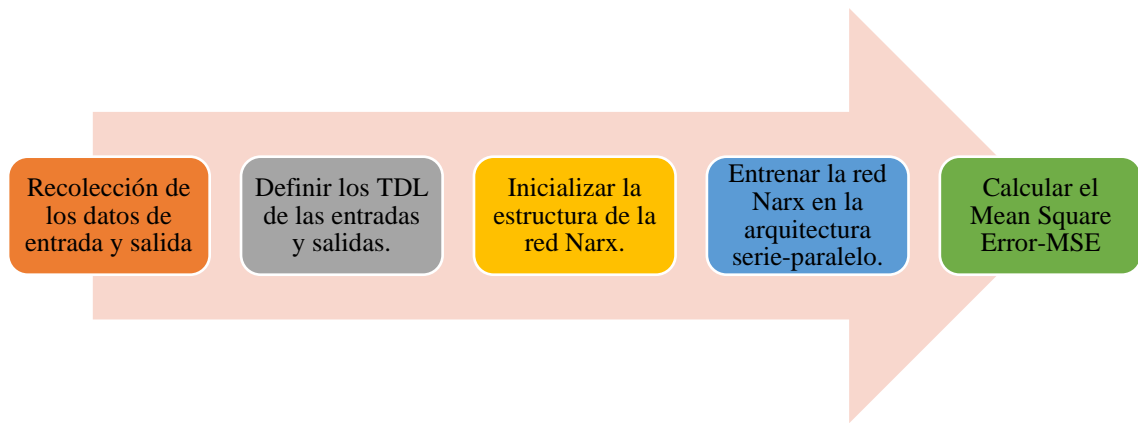


Figura 10-4: Pasos de identificación con NARX
 Fuente: (Song, 2009)

4.3.1.2 Modelo NARX de la presión de descarga unidad G-802

Como se conceptualiza, las redes neuronales No-lineales Auto-Regresivas con entradas externas, cada valor de la salida actual depende de los valores de las salidas y entradas pasados, los cuales permiten a la red NARX capturar las características de la dinámica del proceso basados en la ecuación (4.3).

El diagrama de flujo de la Figura 11-4 es una forma general de la programación en Matlab 2015.b para el entrenamiento supervisado del algoritmo del Anexo E para la presión de succión y descarga; como no existe un método cuantitativo para la definición del número de capas ocultas, número de neuronas por capa, cantidad de épocas, método de entrenamiento y factor de aprendizaje; entonces, se procede con el mecanismo heurístico hasta alcanzar el error mínimo tolerable de $1e-6$; con estos parámetros de entrenamiento se alcanzó un error cuadrático medio - MSE de $9.5972e-07$ (Figura 12-4) que como criterio de estimación del error considero que la salida entrenada de la NARX tiene una mínima variación respecto a los valores reales de planta.

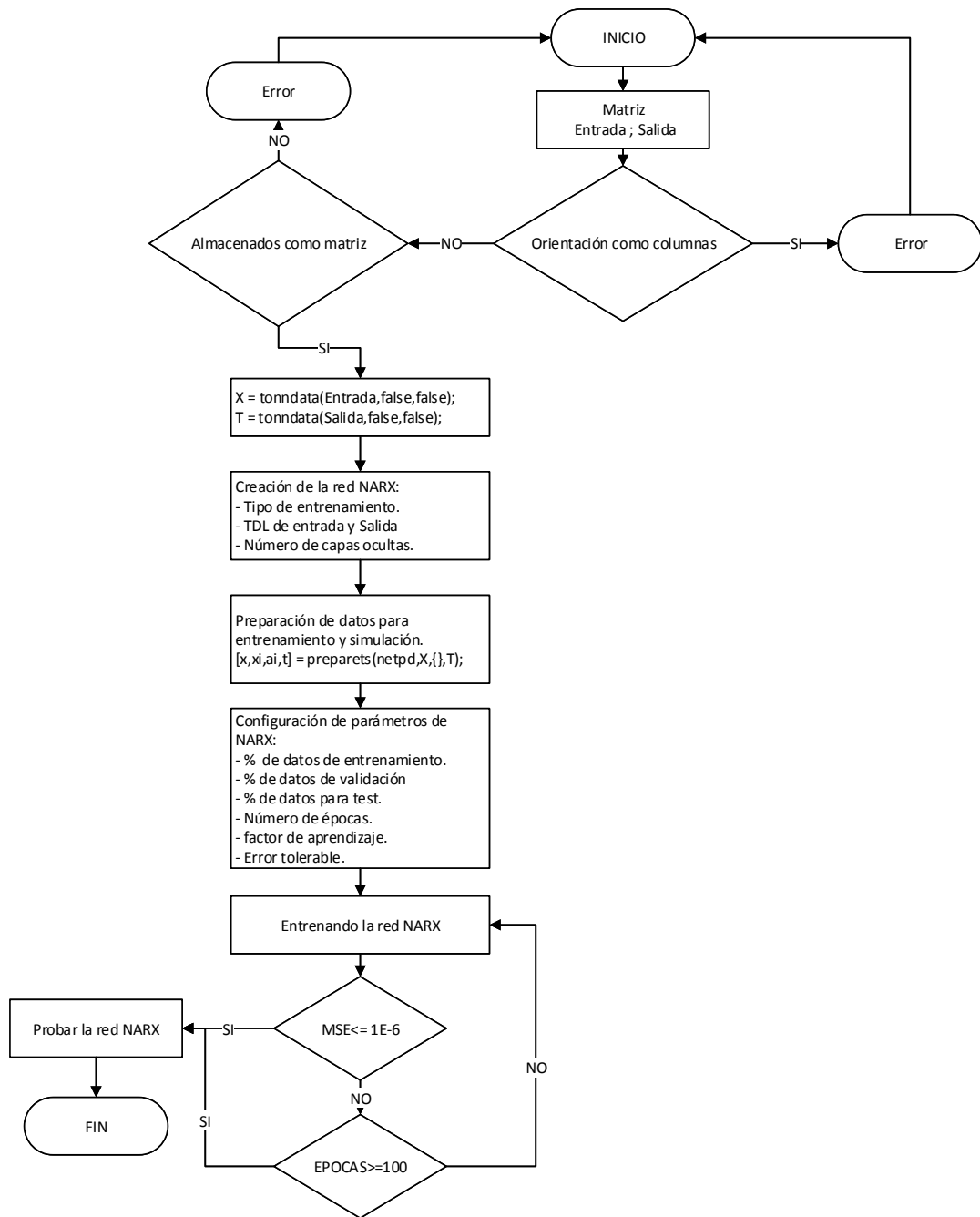


Figura 11-4: Diagrama de flujo para NARX
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

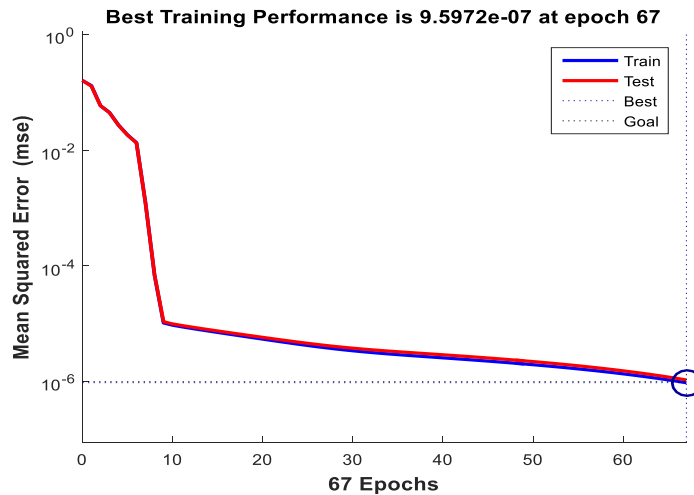


Figura 12-4: MSE de entrenamiento de la NARX para Presión de descarga
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Por su parte, la Figura 13-4 detalla la regresiones lineales simples, que haciendo uso del método de mínimos cuadrados se calcula el coeficiente de regresión lineal (m) de la ecuación (4.4) y con la ecuación (4.5) la constante de regresión lineal para formar la recta de ajuste por mínimos cuadrados de la ecuación (4.6).

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - [\sum x_i]^2} \quad (4.4)$$

Coeficiente de regresión lineal

$$b = \frac{\sum y_i - m \sum x_i}{n} \quad (4.5)$$

Constante de regresión lineal

$$y = mx_i + b \quad (4.6)$$

Recta de ajuste por mínimos cuadrados

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - b \sum y_i - m \sum x_i y_i}{n-2}} \quad (4.7)$$

Error estándar estimado

$$s_y^2 = \frac{\sum y_i^2}{n} - \left[\frac{\sum y_i}{n} \right]^2 \quad (4.8)$$

Coeficiente de determinación

$$R^2 = 1 - \frac{s_e^2}{s_y^2} \quad (4.9)$$

Coeficiente de correlación

Luego calcula el error estándar estimado s_e y el coeficiente de determinación s_y^2 de las ecuaciones (4.7) y (4.8) respectivamente de tal manera que con estos coeficientes se extrae el coeficiente de correlación (R^2) de la ecuación (4.9), que no es otra cosa que la magnitud y dirección de la

relación entre la salida real de la planta y la salida de la red Narx que se está empleando para el entrenamiento.

La Figura 13-4(a) representa la regresión lineal del 70% de los datos de entrenamiento donde la comparación de los datos reales normalizados de la presión de descarga con respecto a los datos que entrega la Narx (ynarx) nos da la recta por mínimos cuadrados expresada en el eje ordenado $\text{Output} \approx 1 * \text{Target} + 5.2e-05$; adicionalmente, la relación de los datos entre las dos variables es positiva-perfecta debido a que su coeficiente de correlación R detalla una magnitud de 1 y dirección positiva; es decir +1.

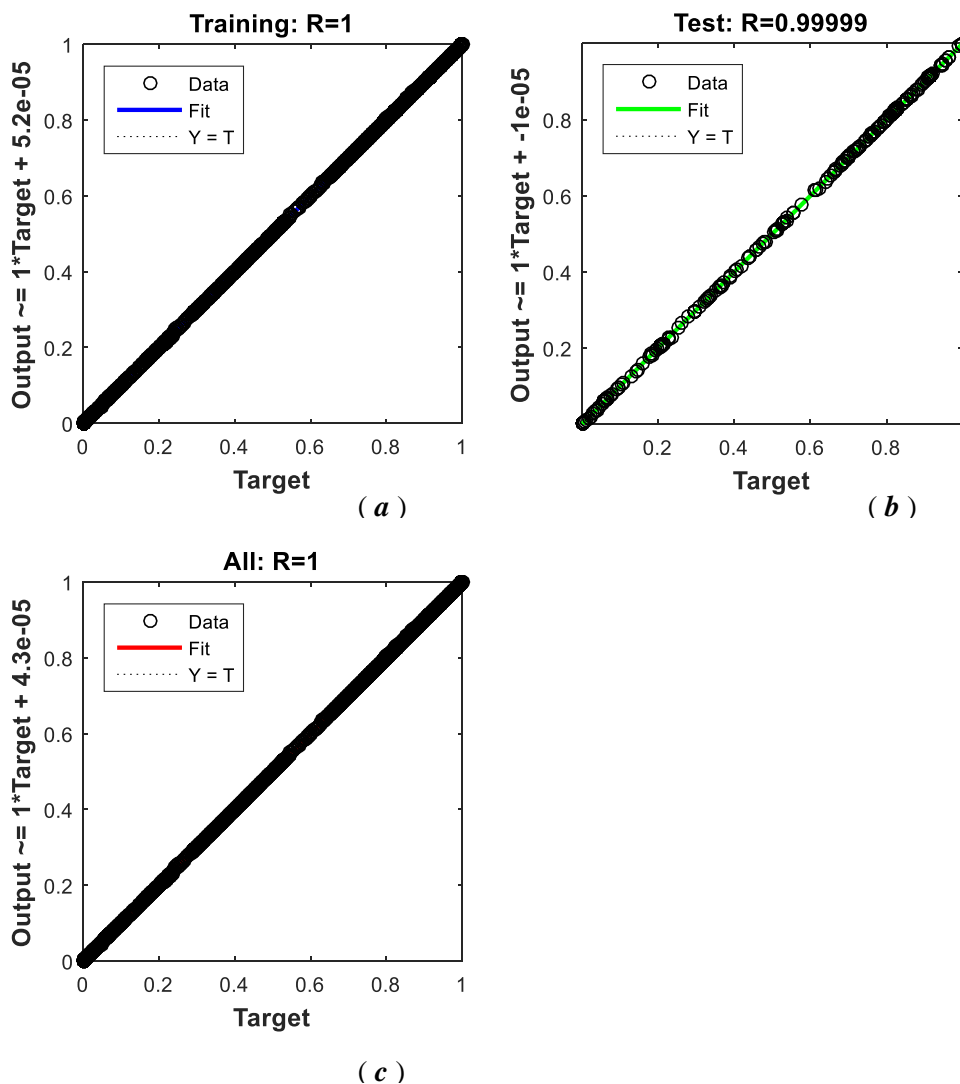


Figura 13-4: Regresiones lineales del entrenamiento de la NARX de Presión de descarga.
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

De forma análoga; la Figura 13-4 (b) representa la regresión lineal del 15% de los datos de prueba donde también muestra una relación positiva y casi perfecta como lo detalla su coeficiente de

correlación $R = +0.99999$; Finalmente, la Figura 13-4 -(c) interpreta la regresión lineal del 100% de los datos reales normalizados de la presión de descarga con respecto a los datos que entrega la Narx (ynarx), cuya recta de ajuste por mínimos cuadrados se manifiesta en el eje ordenado $\text{Output}=1*\text{Target}+4.3\text{e-}05$ y que su coeficiente de correlación R simboliza una relación en dirección positiva con magnitud perfecta 1, entre las dos variables objetos de estudio.

Luego de realizar el entrenamiento de la red, se realiza una comparación gráfica entre los datos originales normalizados y la salida de la NARX los cuales se expresan en la Figura 14-4, donde se observa las dos señales superpuestas casi en su totalidad e imperceptible notar su diferencia, a lo cual se tiene la certeza de que el modelo representa la dinámica de la planta del G-802 y mantiene una relación entre las variables entrada-salida como manifiesta las regresiones lineales simples de la Figura 13-4.

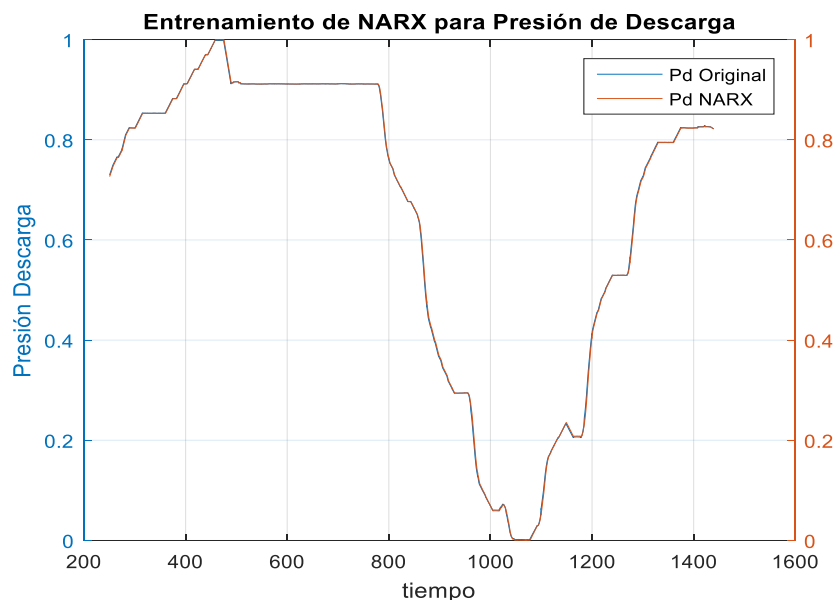


Figura 14-4: Comparación de salida de red Narx vs Presión de descarga normalizada.
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

(s)

Finalmente, la Figura 15-4 detalla la estructura de la NARX donde se percibe una red recurrente con 2 retardos tanto para la señal de entrada como para la salida, una red perceptrón multicapa de 10 neuronas en la capa oculta con función de transferencia simétrica sigmoide según la ecuación de la Figura 8-2 y la capa de salida con una función de transferencia tipo lineal como se detalla en el marco teórico en el apartado de redes neuronales.

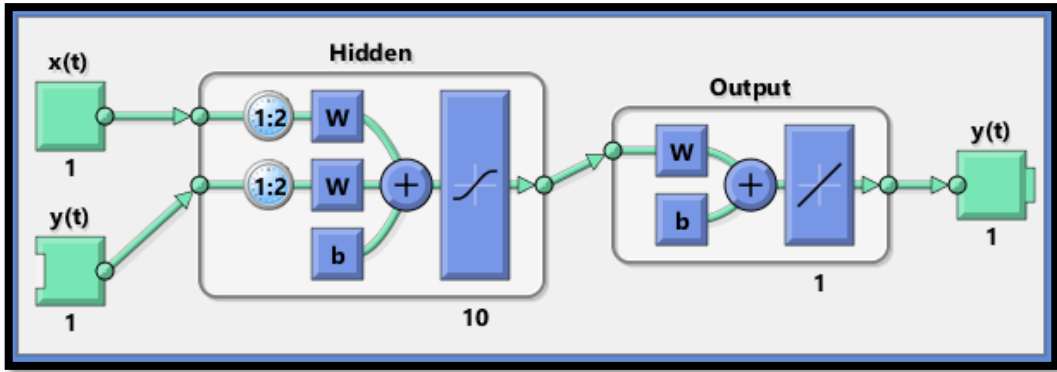


Figura 15-4: Narx de la Presión de descarga.
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

4.3.1.3 Modelo NARX de la presión de succión de unidad G-802

De manera análoga al entrenamiento de la presión de descarga, se procede con la presión de succión también utilizando la metodología heurística; concluyendo que se necesitó modificar al algoritmo las neuronas de la capa oculta a 5, cambiado la señal objetivo de la red por “Presión de succión normalizada” ; teniendo como resultado un salida semejante a la Figura 8-4 donde la presión de succión es inversa a la velocidad angular de la bomba.

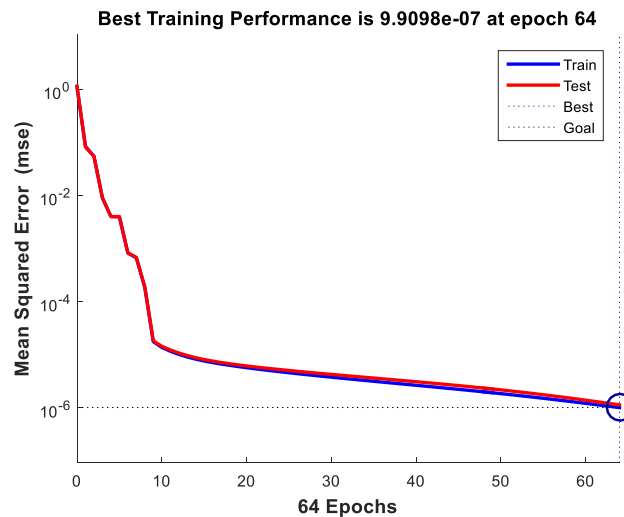


Figura 16-4: MSE de entrenamiento de la NARX para Presión de succión
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

Del entrenamiento se extrae que el MSE es de $9.9098e-07$ en la Figura 16-4 en la época 64, dando como iniciativa un algoritmo de entrenamiento con una convergencia bastante rápida; adicionalmente se observa Figura 17-4 (a) representa la regresión lineal del 70% de los datos de entrenamiento donde la comparación de los datos reales normalizados de la presión de succión con respecto a los datos que entrega la red nos da la recta por mínimos cuadrados expresada en el eje ordenado $\text{Output} \approx 1 \cdot \text{Target} + 3.8e-05$; adicionalmente, la relación de los datos entre las dos variables es positiva-perfecta debido a que su coeficiente de correlación R detalla una magnitud de 1 y dirección positiva; es decir +1; por su parte, la Figura 17-4 -(b) representa la regresión lineal del 15% de los datos de prueba donde también muestra una relación positiva y casi perfecta como lo detalla su coeficiente de correlación $R = +0.99999$ y por último, la Figura 17-4 -(c) interpreta la regresión lineal del 100% de los datos reales normalizados de la presión de descarga con respecto a los datos que entrega la salida de red Narx; cuya recta de ajuste por mínimos cuadrados se manifiesta en el eje ordenado $\text{Output} \approx 1 \cdot \text{Target} + 3.7e-05$ y que su coeficiente de correlación R extrae una relación positiva-perfecta entre las dos variables.

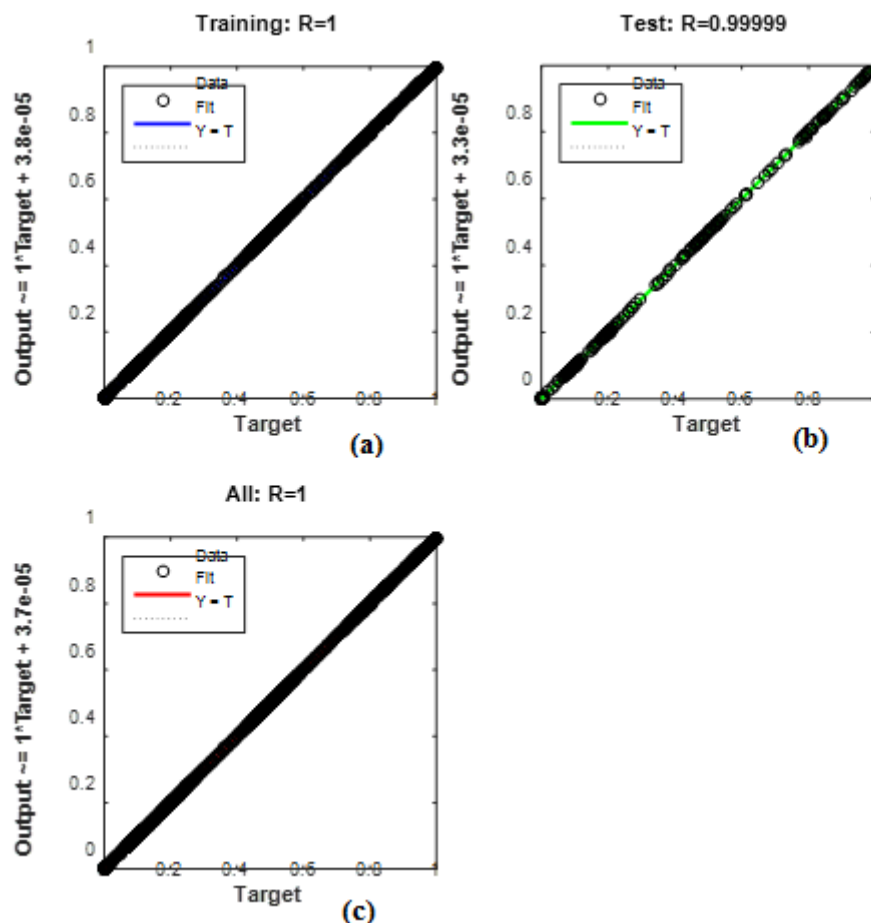


Figura 17-4: Regresiones lineales de entrenamiento de la NARX de Presión de succión.
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Finalmente se concluye con una validación gráfica comparativa entre los datos normalizados de la presión de succión y los datos de salida de la red NARX como se percibe en la Figura 18-4 donde se aprecia un solapamiento entre las dos señales de tal manera que de una manera gráfica también se valida el modelo.

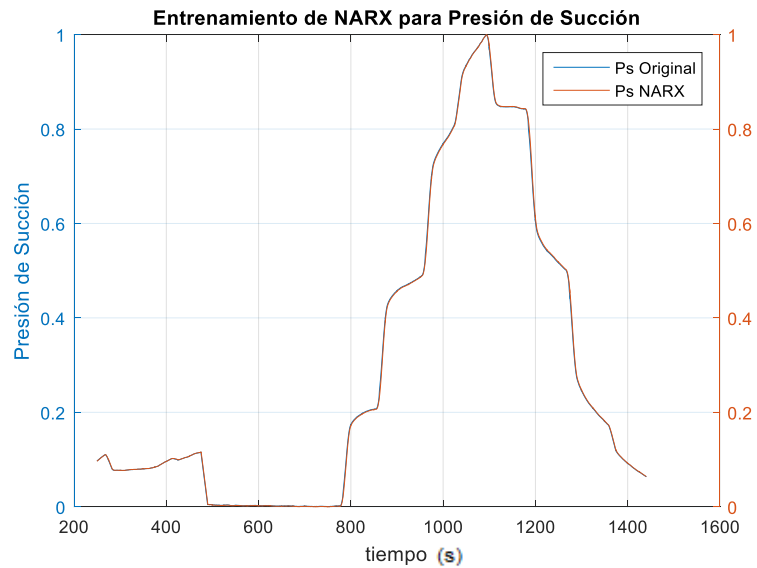


Figura 18-4: Comparación de salida de la Narx vs Presión de succión normalizada.
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

La estructura Narx muestra una red recurrente con 2 retardos en las señales entrada-salida, la red perceptrón multicapa está conformada por 5 neuronas en la capa oculta y una capa de salida con las mismas funciones de membresía de la estructura anterior; donde conjuntamente los dos modelos de NARX serán el pilar base del para la simulación de los controladores neurodifusos.

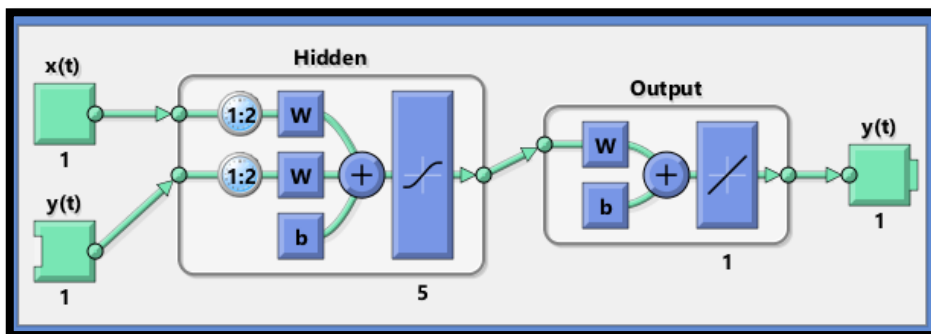


Figura 19-4: Narx de la Presión de succión.
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

4.4 Diseño de controladores ANFIS

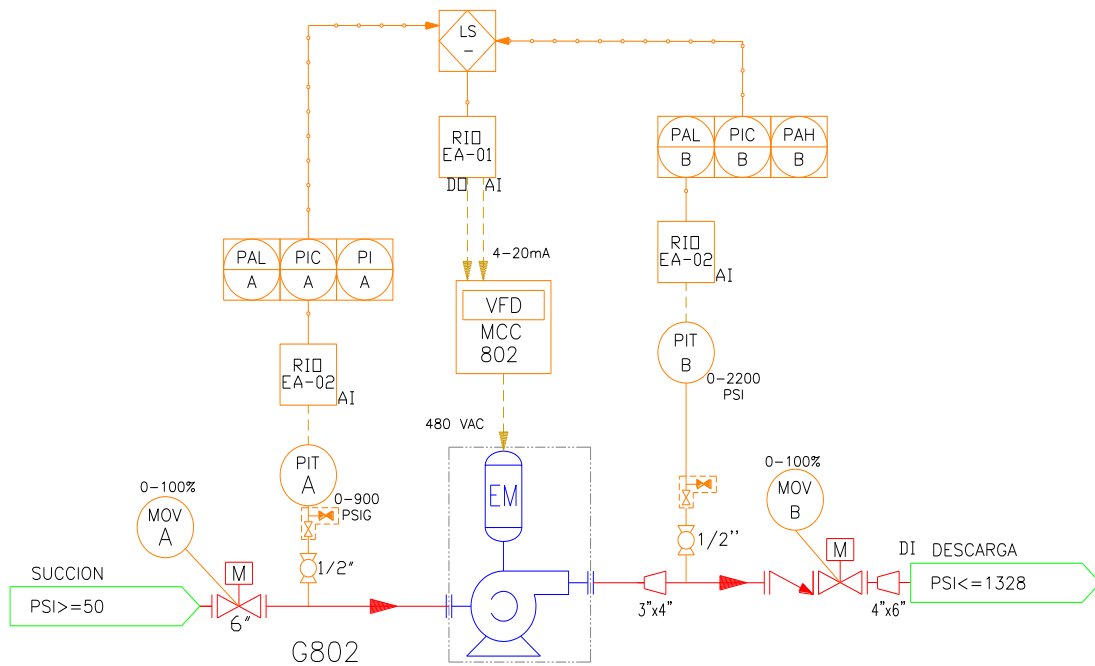


Figura 20-4: Estructura propuesta para control override de la G802.
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Uno de los factores primordiales que hay que controlar dentro de un sistema de bombeo son las presiones de succión y descarga, las dos están enteramente relacionadas con la velocidad de rotación y esta con los miliamperios que se le entregue al variador de frecuencia FVD-802 por ello se entrenó la planta bajo este criterio en los párrafos anteriores; es así que en la Figura 20-4 se observa la estructura de control override propuesta de tal manera que se trata de mantener los setpoints tanto en la succión como la descarga variando la velocidad de rotación a través de controlar el menor dato de miliamperios entregado al variador de frecuencia.

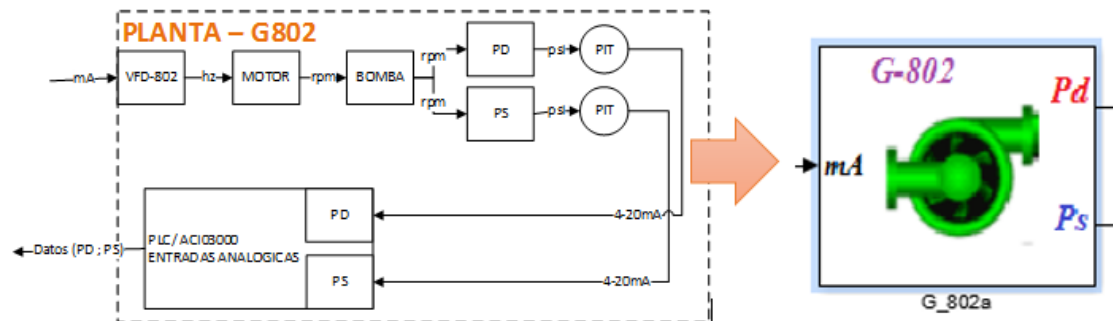


Figura 21-4: Planta G802 y su equivalente..
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Bajo este precepto, se procede a diseñar los controladores considerando la planta equivalente presentada en la Figura 21-4 para cada uno de los parámetros mencionados a fin de disponer de una estructura de control override sustentado en controladores neurodifusos que puedan absorber las no-linealidades de la planta como es la característica principal del control fuzzy.

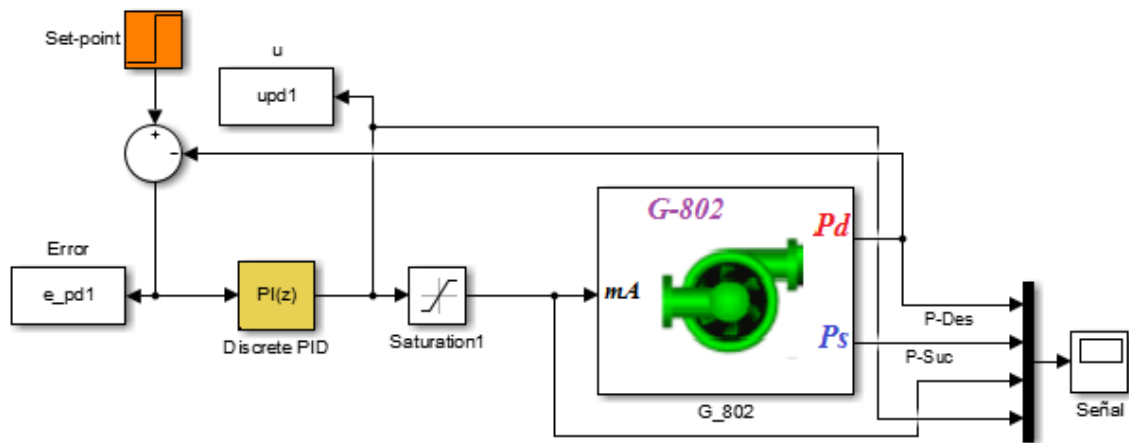


Figura 22-4: Clonación base de un PI para presión de descarga.
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Como se conoce hay dos maneras de sintonizar un controlador fuzzy; la primera es que un experto lo desarrolle sustentado en su vasta experiencia de manejo de este tipo de controladores, mientras que la otra manera es utilizando un mecanismo de aprendizaje de apoyo, que en sí es el objetivo que busca el caso de estudio del presente trabajo. Dentro de estos mecanismos de aprendizaje está “*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System -ANFIS*” cuyos conceptos de funcionamiento se pormenorizaron en el marco teórico; en esta sección se centraliza la sintonización de los controladores, que para dicha meta se hizo menester tener un elemento patrón y luego efectuar un ajuste fino buscando la mejor respuesta a una entrada de excitación tipo escalón.

La Figura 22-4 presenta una estructura patrón, que si bien es cierto no es parte del objetivo de esta tesis realizar una comparación de las respuestas de un controlador clásico PID, se me hizo absolutamente necesario tomarlo como base de entrenamiento para el controlador fuzzy con ANFIS.

Los controladores convencionales hasta la actualidad acaparan un 90% de los procesos industriales, gracias a su robustez y facilidad de implementación; para esta tarea se hace uso de un controlador discreto proporcional más integral (PI) con formato en paralelo; donde sus

ganancias se han calculado por el método de ganancia limite, con un tiempo de muestreo de 500ms haciendo uso de la fórmula 4.3 del compensador Euler en atraso.

$$u = P + I.Ts.\frac{z}{z-1} \quad (4.10)$$

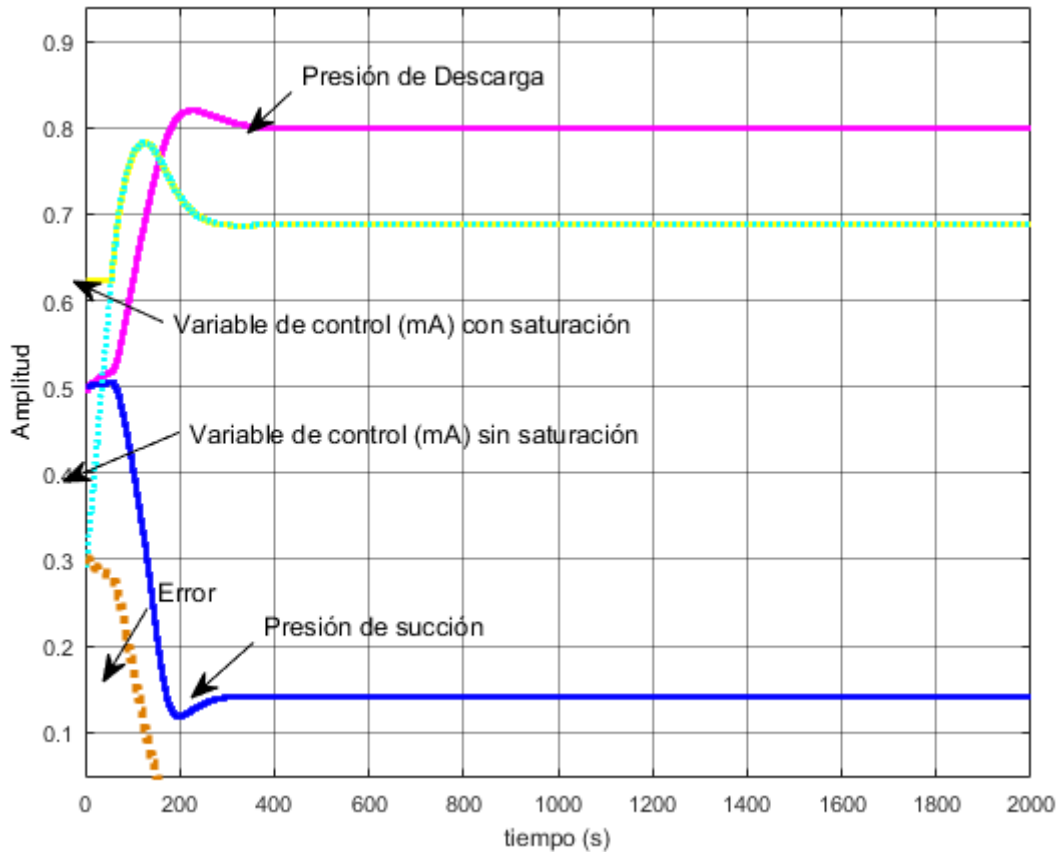


Figura 23-4: Respuesta del PI a un escalón desde 0.625(17.9mA) a 0.8(18.8mA)
 Realizado por: Villalba, Williams,2017

Como resultado, la Figura 23-4 muestra la respuesta del controlador (PI) con un sobre impulsos del 10% aproximadamente sobre las presiones de descarga y succión; es así entonces, que este set de datos conforman el conjunto de datos de entrenamiento para el ANFIS.

Como los controladores difusos se basan en un modelo lingüístico capaz de operar con razonamiento lógico propio, y bajo un soporte matemático que sostiene la obtención de desenlaces a partir de reglas cualitativas, se puede decir entonces que es un sistema para expertos; para contrarrestar este problema, los controladores entrenados a través de redes adaptativas como es el

Anfis basan su aprendizaje en un patrón de tal manera que con el conjunto de datos de entrenamiento y los algoritmos de adaptación se pueda optimizar el desempeño del controlador.

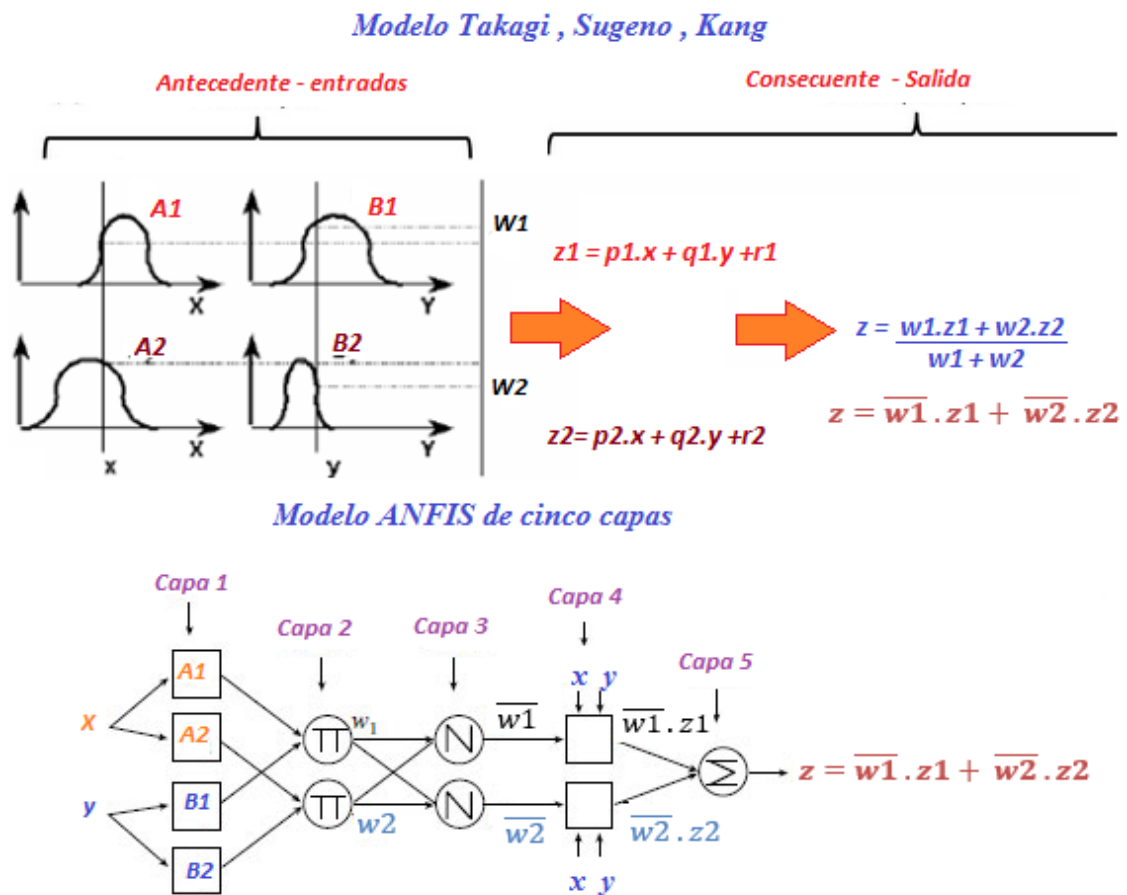


Figura 24-4: Estructura ANFIS de 5 capas
Fuente : (Saedi, A. , Wu, H & Handroos, 2013)

La Figura 24-4 sintetiza el proceso de entrenamiento ANFIS de 5 capas que ha sido estudiado a detalle en el capítulo 2, que ha igual que el procedimiento de identificación de planta con redes neuronales en este tampoco se dispone de una metodología que definían de manera explícita el tipo y cantidad de funciones de membresía, número de iteraciones etc; consecuentemente a través de metodología heurística se llegó a precisar el método de inicio con grid-partition, cinco funciones de membresía tipo gaussianas y una salida del sistema de inferencia difusa tipo TSK de orden-1, a través de la configuración de la función de Matlab “genfis1” ; adicionalmente el algoritmo de entrenamiento Anfis del Anexo F, fue desarrollado para un método de optimización híbrido con una estructura de cinco capas detalla en la Figura 26-4.

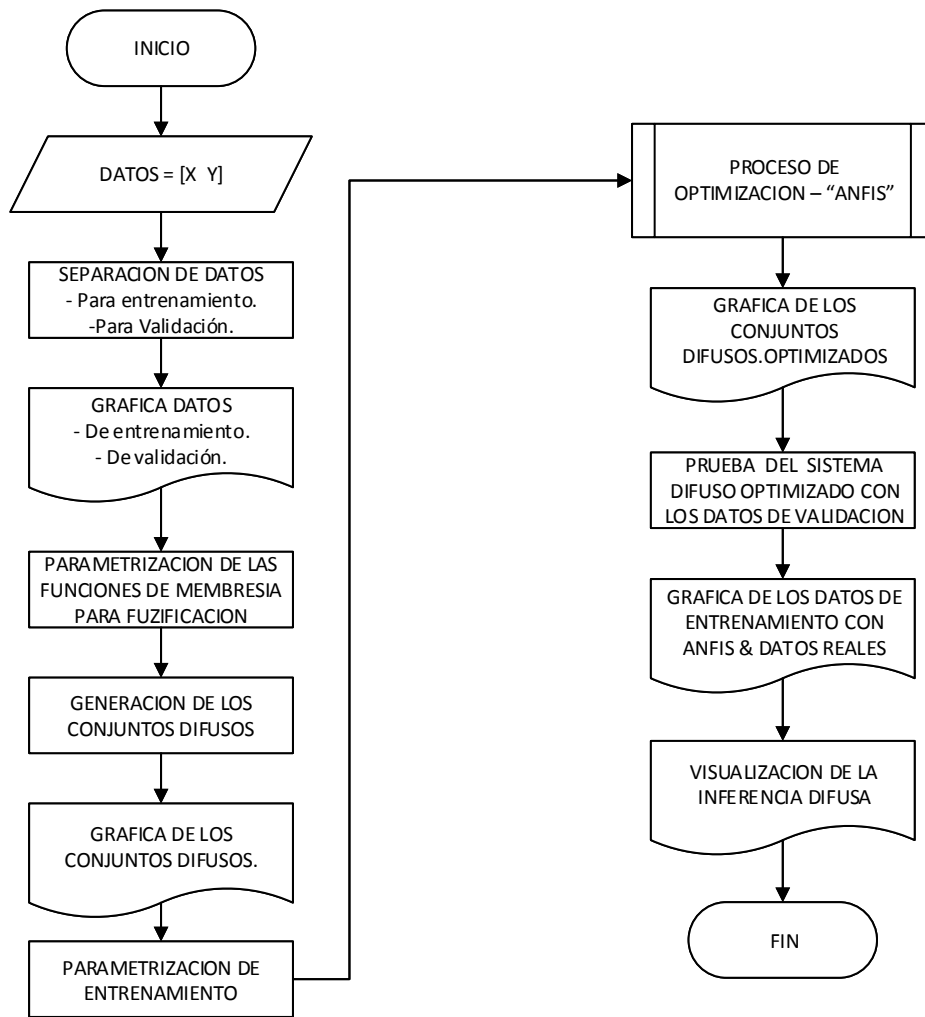


Figura 25-4: Diagrama de flujo para entrenamiento ANFIS de los controladores difusos
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

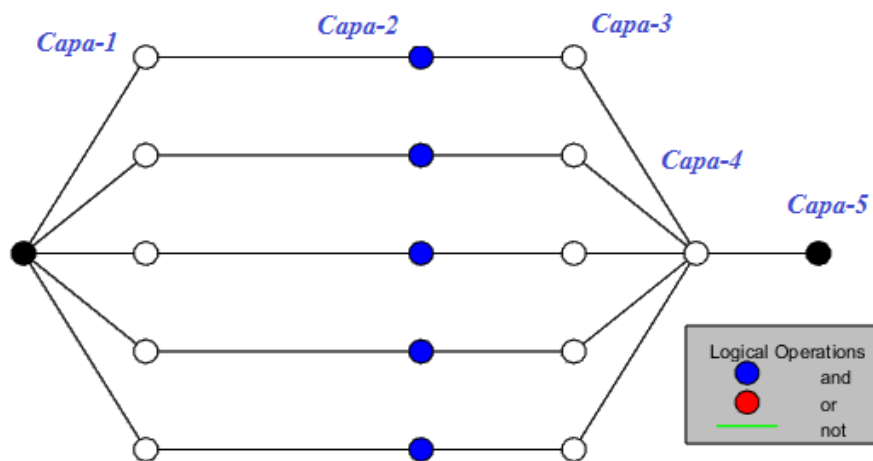


Figura 26-4: Estructura del sistema neurodifuso para la Presión-descarga.
 Realizado por: Villalba, Williams, 2017

La justificación por lo que se requiere tener un conjunto de datos de entrenamiento es porque se necesita la curva de control del sistema (Figura 28-4) que permita pasar de las funciones de membresía de inicio a funciones de membresía optimizadas como se aprecia en la Figura 27-4., donde las funciones gaussianas se ajustan con la finalidad de alcanzar la curva de control deseada.

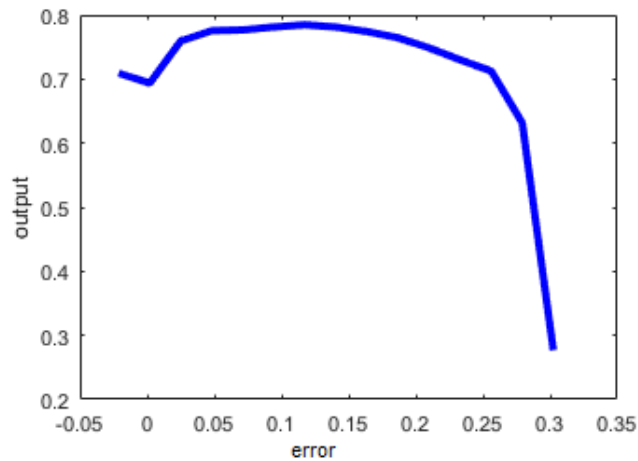


Figura 28-4: Curva de control de la Presión-descarga.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

Después de obtener el entrenamiento con el Anfis, es necesario realizar la simulación y ajustes con el fin de suavizar los sobre impulsos del (PI) para ello se utiliza simulink de Matlab R2015b

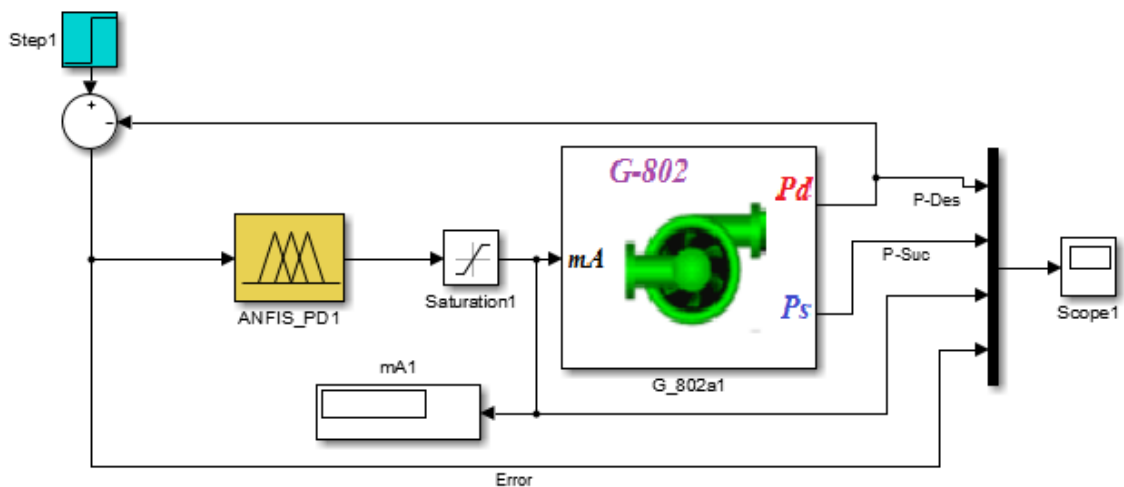


Figura 29-4: Diagrama de bloques de la Presión-descarga.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

donde se incorpora el controlador ANFIS_PD1(Figura 29-4) y solo se ajustó un poco el parámetro de ancho de la función de membresía gaussiana in1mf3 dando como resultado una curva suave sin sobre impulso de las presiones en un tiempo de establecimiento de aproximadamente 200 segundos, esto es debido a que se requiere vencer toda la columna hidráulica del perfil altimétrico del ducto para que se establezca las presiones, adicionalmente es posible apreciar que no existe error de estado estacionario a partir del tiempo de establecimiento.

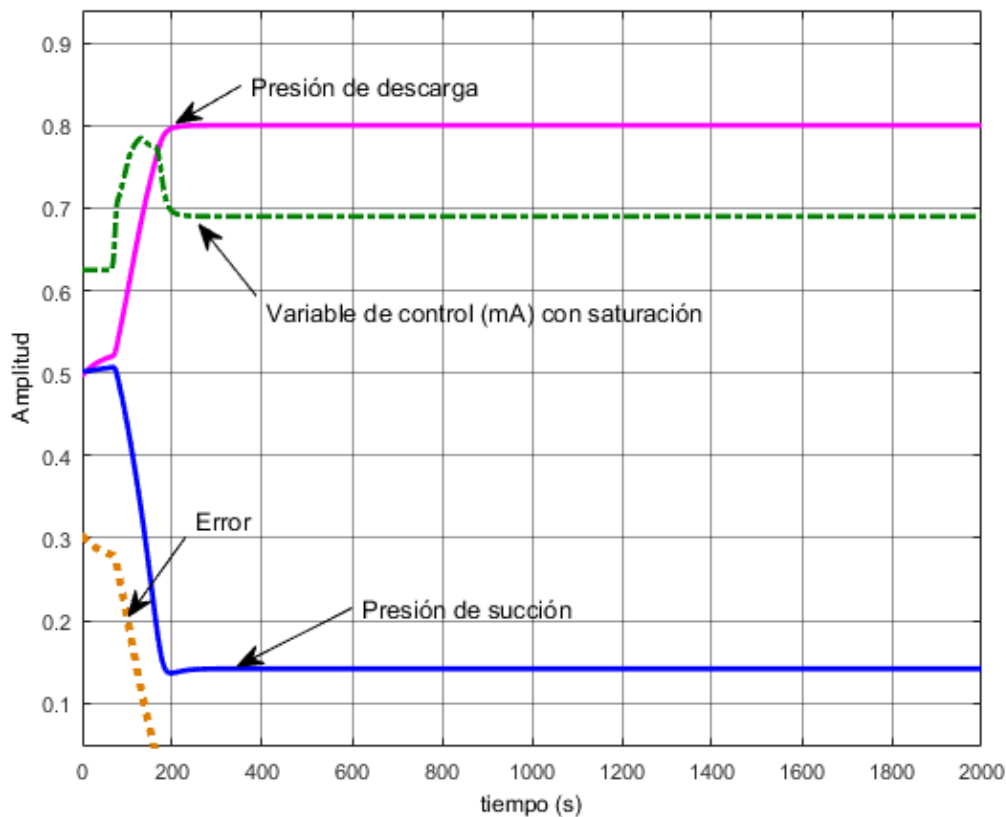


Figura 30-4: Simulación del controlador neurodifuso para presión de descarga
Realizado por: Villalba, Williams,2017

De forma semejante al procedimiento para la presión de descarga se encamino el procedimiento para la presión de succión, en primer lugar, se sintonizo un controlador (PI) de tal manera que se pueda disponer de una curva de control (Figura 31-4).

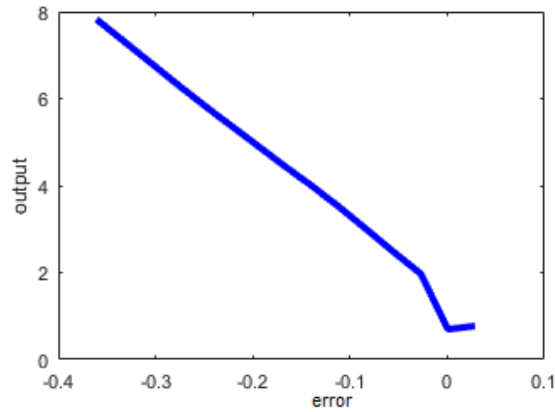


Figura 31-4: Curva de control de la Presión-succión.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

Luego con la misma metodología heurística y haciendo uso del mismo algoritmo de aprendizaje supervisado Anfis para los pares de datos error/ouput de la curva de control, se determinó 5 funciones de membresía de inicio tipo triangulares ‘trimf’, para un controlador tipo TSK de orden 1, con una partición de rejilla del espacio difuso de entrada para los antecedentes de las reglas

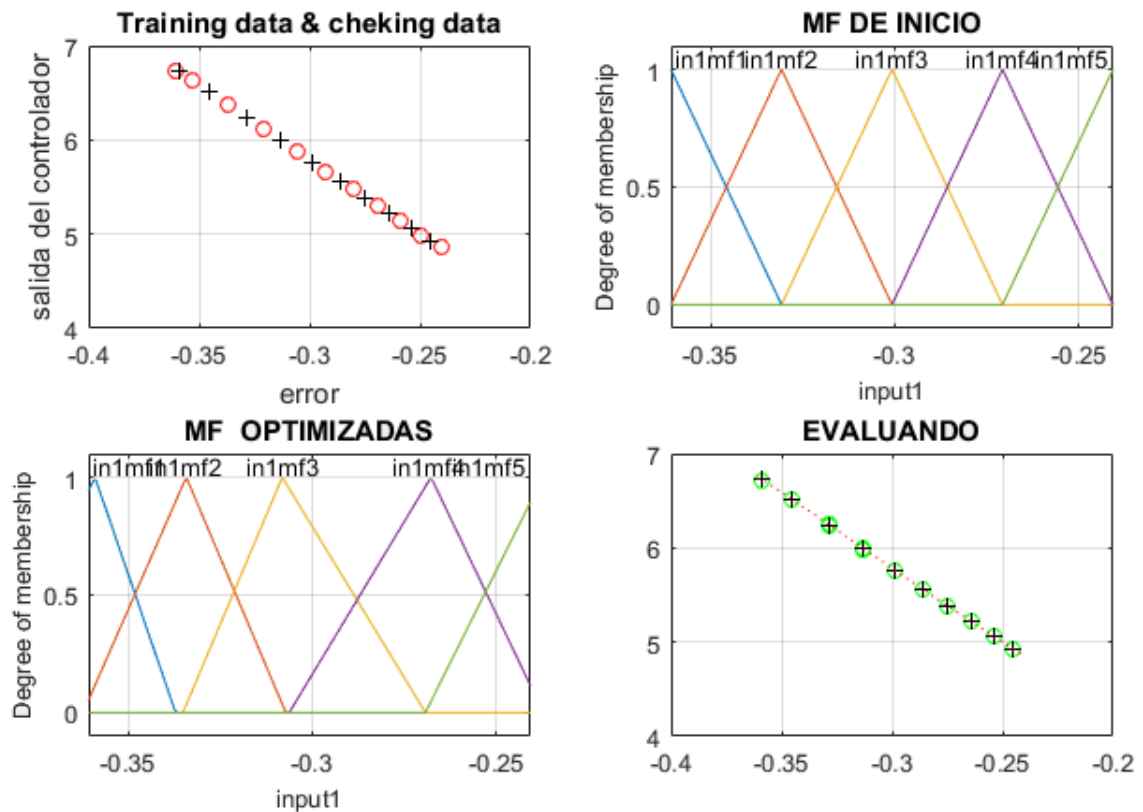


Figura 32-4: Entrenamiento Anfis para Presión-Succión.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

difusas y como metodología de optimización para redes adaptativas, se utilizó el aprendizaje híbrido que ajustan los parámetros de la arquitectura Anfis, es decir la aplicación del estimador de mínimos cuadrados en el paso de avance y el gradiente decreciente en el paso de retroceso por cada época de tal manera que se corrija la medida del error para cada par de datos de entrenamiento haciendo el tiempo de convergencia más rápido que un entrenamiento de backpropagation.

La Figura 32-4 expresa el cambio a causa del ajuste de los parámetros de las funciones de membresía iniciales a las funciones de membresía optimizadas a fin de conseguir la curva de control propuesta en la Figura 31-4.

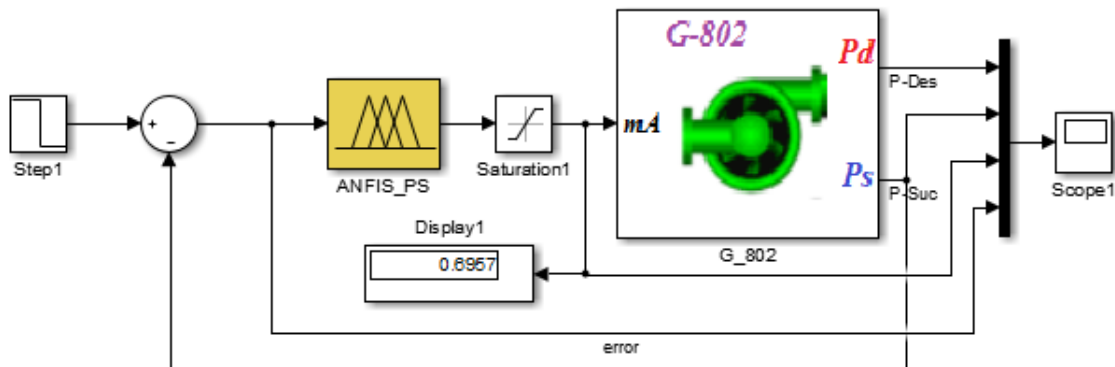


Figura 33-4: Diagrama de bloques de la Presión-Succión.
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

La simulación del controlador ANFIS_PS se lo realizó con excitación tipo escalón negativo en virtud de que la presión de succión tiene un efecto inverso a la velocidad angular de la bomba, es decir cuando decrecen las rpm's la presión de succión incrementa por esta razón el escalón se tomó dentro de la escala normalizada de 0.2(15.52mA) a 0.14(15.18mA) dando como resultado una salida de presión de succión que se estabiliza aproximadamente a los 75s, causando también un efecto suave sobre la presión de descarga y un tiempo de estabilización a los 200s, la diferencia entre estos tiempos de estabilización es esencialmente que el empaquetamiento de fluido en la succión es un tramo corto de tubería desde las unidades de medición dinámica, no obstante, la descarga debe vencer toda la presión hidrostática del perfil altimétrico, por ello el tiempo de estabilización es más lento; concordante con lo descrito, el controlador por el lado de succión también tiene una señal de saturación más rápida Figura 34-4 para cumplir este efecto y alcanzar el setpoint deseado.

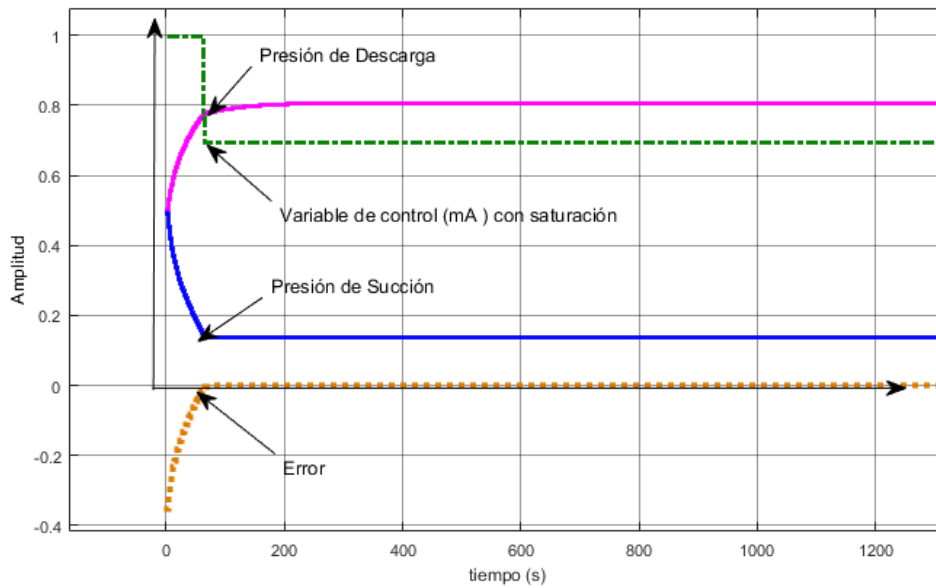


Figura 34-4: Simulación del controlador neurodifuso para presión de succión.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

4.5 Control neurodifuso con estructura override

La Figura 20-4 presenta un resumen del P&ID para una estructura de control override, mientras que la Figura 35-4 detalla la arquitectura interna de control con los dos controladores neurodifusos entrenados con la red adaptativa de inferencia neurodifusa -ANFIS en los apartados anteriores.

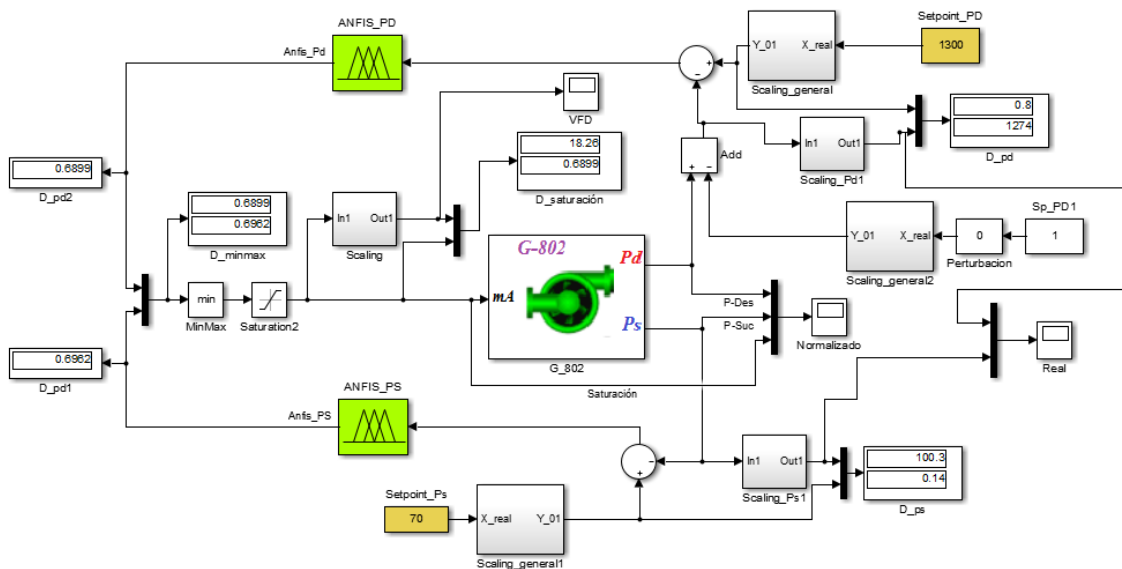


Figura 35-4: Estructura override con controladores neurodifusos
Realizado por: Villalba, Williams,2017

En la práctica, la operación normal de la unidad de bombeo requerirá de dos setpoints de presiones que tienen estrecha relación entre ellas y dependen de la velocidad de rotación de la bomba; estos setpoints presiones son tomados de los registros diarios de operación del ducto y en base a ellos se desarrolló las sintonizaciones de los controladores, los mismos que se acogen en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4: Setpoints de presiones en operación normal

<i>Variable</i>	<i>Unidades</i>	<i>Setpoint de operación normal</i>
Presión de succión	Psig	70
Presión de descarga	Psig	1300

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Acorde a la teoría de un control con estructura override, los controladores neurodifusos se traslapan en relación a la operatividad de planta; normalmente, la manera de trabajo de este ducto es mantener alrededor de 1300psig la descarga de la bomba de tal manera que el punto más alto del perfil altimétrico se mantenga con una presión mayor a los 15psig, mitigando así el efecto de cavitación de la tubería en este punto crítico de poliducto.

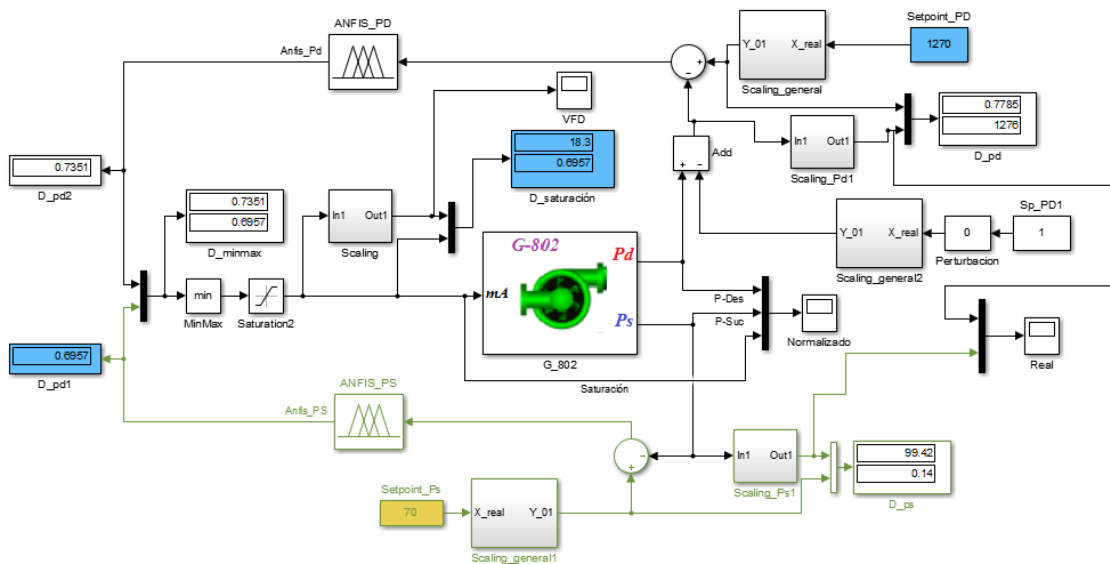


Figura 36-4: Modificación del setpoint de Presión de descarga y traslape a controlador de succión

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Normalmente cuando el control es por lado de la descarga [ANFIS_PD], la estructura override mantiene la respuesta como lo detalla la Figura 30-4, a medida que reduzca el Setpoint_PD de descarga sin correlacionar con la succión, es decir que deba reducir la velocidad de rotación de la máquina, tomará el control el Setpoint_Ps de la succión y respetara el control [ANFIS_PS] como lo indican los displays D_pd1 y D_saturación de la Figura 36-4.

En este punto se debe tomar en consideración algo muy importante, las presiones de succión y descarga dependen directamente de las rpm's y mantienen relación inversa entre ellas como lo expresa la Figura 30-4; por lo tanto, las modificaciones de los setpoint de presiones deben tener correlación y no cambiar los valores aleatoriamente. A pesar de esta recomendación el control soporta que varíe o cometa errores de ajuste entre 1285psi a 1300psi sin que se vea afecta la respuesta por presión de descarga, sin embargo, por debajo de 1280psi en el setpoint de descarga sin considerar la vinculación con la succión, la respuesta tendrá una tendencia a deformarse como se observa en la Figura 37-4 con un setpoint de descarga de 1270psi sin correlación con la succión.

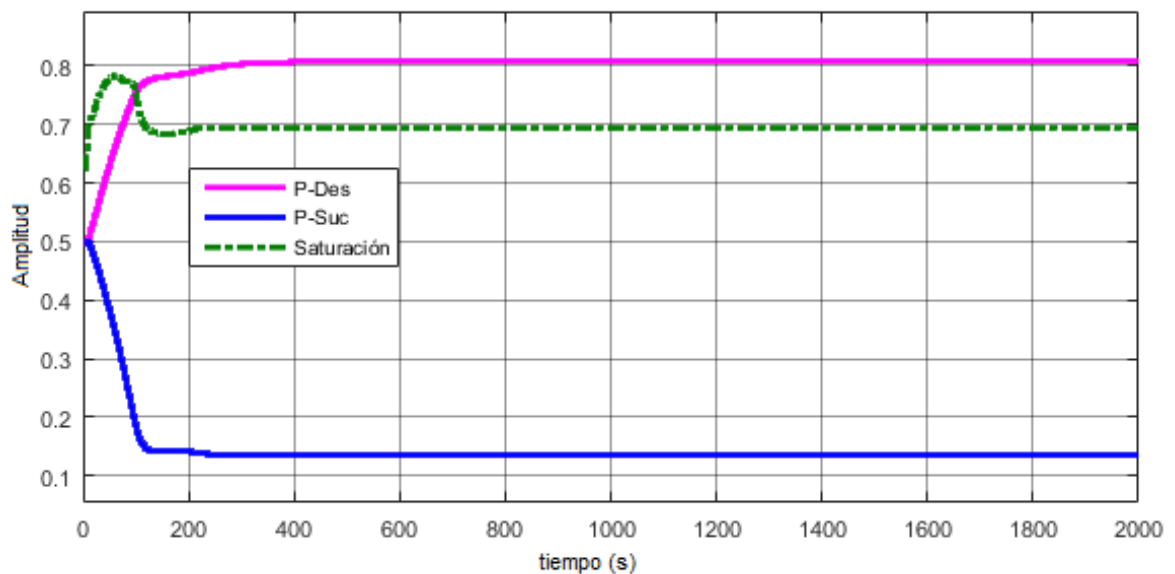


Figura 37-4: Control por succión ante una modificación del setpoint de Presión de descarga sin correlación con la succión.

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Otro escenario de estudio es: ¿Que ocurre con el control, cuando hay un descenso de presión en la descarga?. Una caída de presión puede deberse a una falla de la instrumentación o alguna fuga pequeña y controlada en alguna válvula al lado de descarga, a lo cual el controlador absorbe este

disturbio hasta los - 30psig como máximo e incrementando el tiempo de establecimiento como lo manifiesta Figura 38-4, pasado los 35 psig puede tratarse de una rotura de la tubería, convirtiéndose en un problema crítico de operatividad del ducto, por lo que ya no se realiza ningún control.

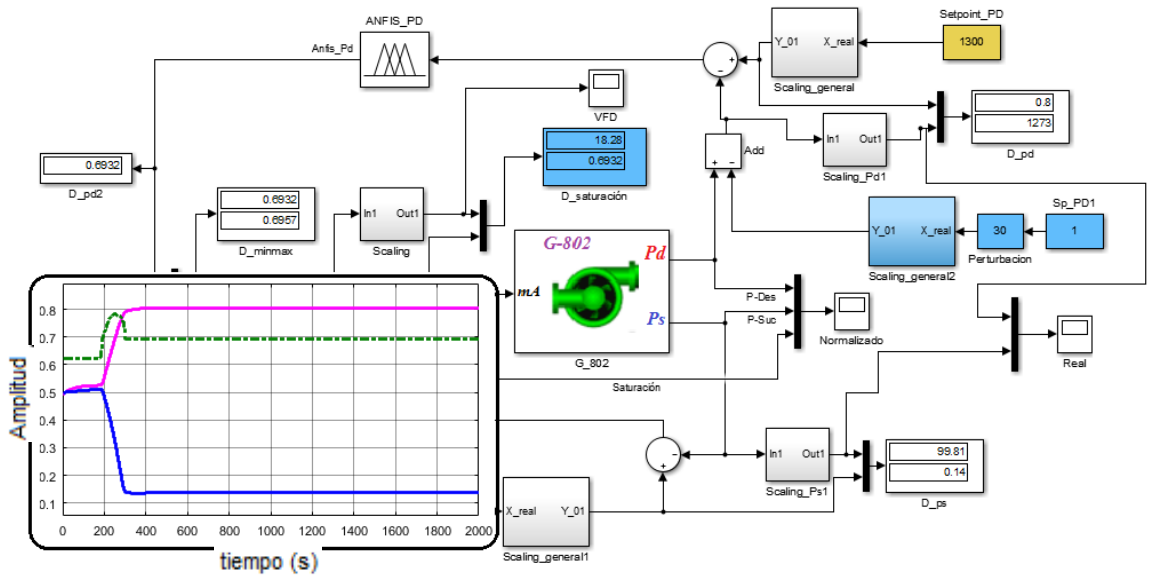


Figura 38-4: Disturbio en la Presión de descarga.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

Finalmente, la Figura 39-4 revela las respuestas de las señales reales para un escalón; aquí se puede observar como el VFD-802 será afectado con la entrada en miliamperios y como las presiones responden como parte del sistema .

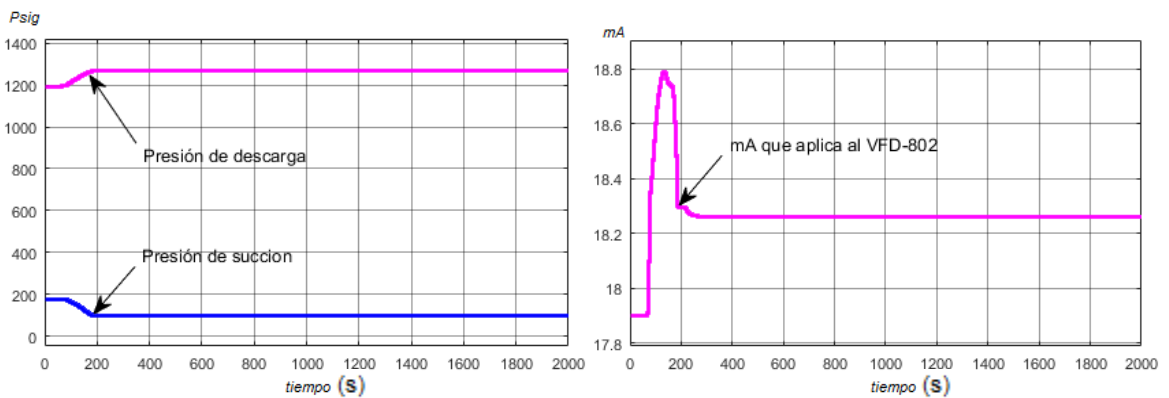


Figura 39-4: Valores reales a un escalón de 1200psig a 1300psig en descarga.
Realizado por: Villalba, Williams,2017

CAPÍTULO V

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Metodologías de investigación utilizadas

5.1.1 *Método Heurístico*

Como se expresaba en el capítulo anterior, varios tópicos como la determinación del modelo de planta y sintonización de controladores neurodifusos se sustentó en reglas empíricas para alcanzar una solución, a esto se lo conoce como el método heurístico propuesto por Bransford y Stein en 1984, cuya metodología está soportada en cinco pasos. (Bransford & Stein, 1984).

- Identificar el problema;
- Definir y presentar el problema
- Explorar las estrategias viables
- Avanzar en las estrategias
- Lograr la solución y volver para evaluar los efectos de las actividades.

Para llevar a cabo la metodología heurística se planteó el formato del Anexo C, donde se puede llevar el control sistemático de las pruebas realizadas hasta alcanzar el MSE deseado.

5.1.2 *Método Documental*

Para la elaboración de esta tesis se debió apoyarse en fuentes documentales de la IEEE, la ISA, libros, artículos, tesis desarrolladas y más fuentes bibliográficas con los cuales se sustentó el trabajo.

5.2 Análisis de resultados

Dentro de este apartado es procedente analizar los resultados obtenidos dentro de las secciones de automatización de la G-802, la identificación de planta y el diseño de los controladores mediante ANFIS.

5.2.1 Análisis de resultados de la automatización del G-802

Como se detalla en la problemática de la automatización en el capítulo 2 en donde se expone de manera puntual los defectos de la automatización del sistema antes de la intervención propuesta, a razón de esto, los resultados sobre las principales problemáticas detectadas fueron cubiertas bajo los siguientes aspectos:

- **Falla constante de comunicaciones:** Al realizar la automatización actual del G-802 se realizaron pruebas de megado de cables, pruebas de lazo de toda la instrumentación, pruebas de comunicaciones entre controladores, DASMBTCP y HMI, obteniendo resultados favorables.
- **La estructura de la programación:** Otro factor importante para la decisión de cambiar la automatización anterior fue la estructura utilizada anteriormente en donde se mezclaban las variables de las dos unidades de bombeo en los controladores, para lo cual se separaron por backplanes, por I/O y Drops a fin de que si ocurre una falla dentro de una de las unidades de bombeo solo afecta a la unidad de correspondencia y no para el proceso general de bombeo.
- **Falta de soporte y Know-How dentro del país:** Los controladores anteriores no basan su programación en el estándar IEC-61131-3 haciendo difícil la interpretación de los mismos, no contaba con una estructura sistemática de programación y tampoco es fácil encontrar soporte técnico dentro del país, esto instigó a tomar la decisión de cambiar por controladores estandarizados dentro de la entidad y de un amplio conocimiento y grado de experticia obteniendo como resultado confianza y rapidez de respuesta al momento de presentarse fallas en planta.

5.2.2 Análisis de resultados del entrenamiento de planta

Durante el entrenamiento de planta para las señales de entrada/ salida se aplicó el método heurístico con el cual se descartaba las posibilidades a través de las pruebas y el MSE alcanzado.

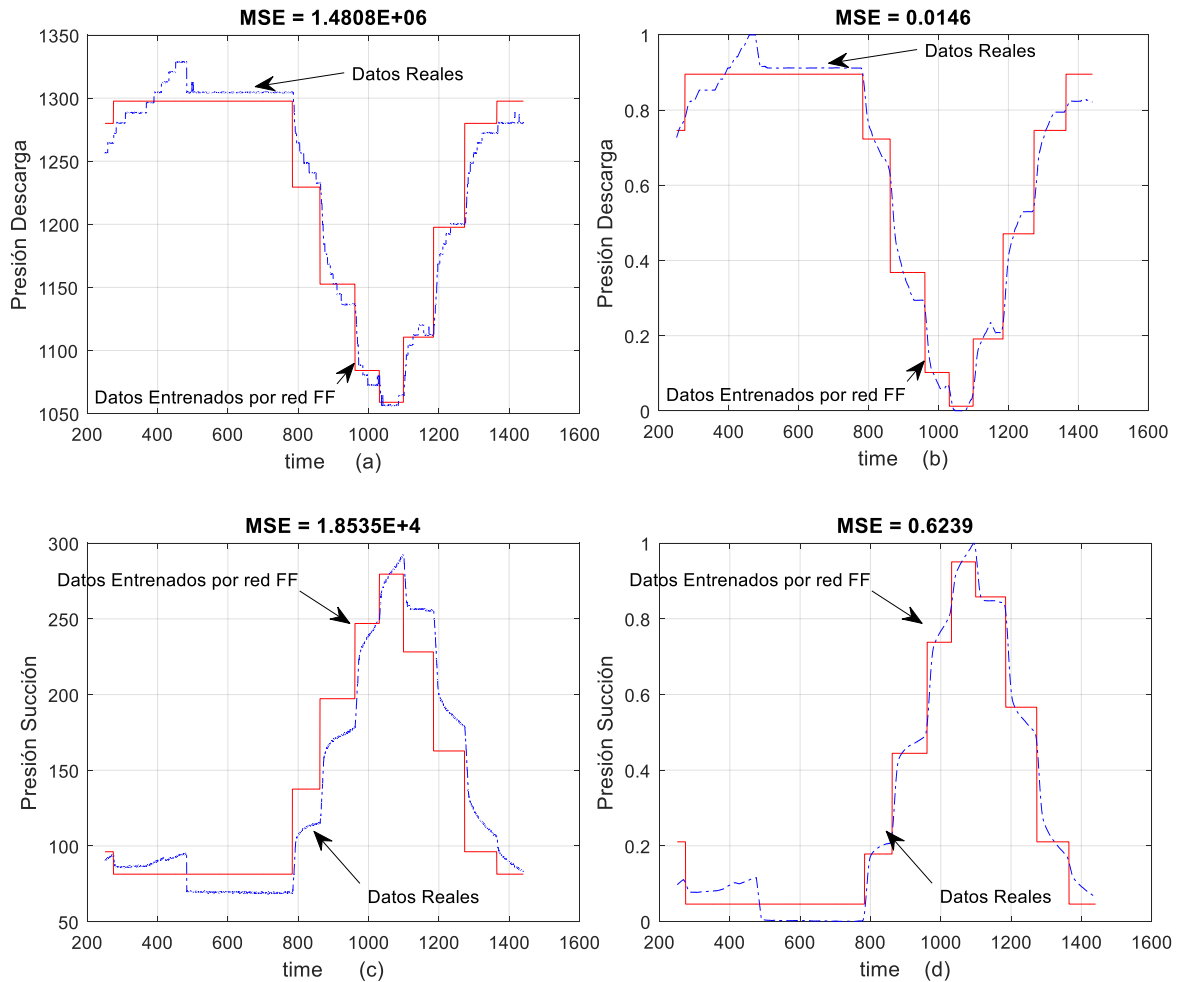


Figura 1-5: Entrenamiento supervisado con redes Feed-Forward

Realizado por: Villalba, Williams, 2017

De la Figura 1-5, podemos rescatar que, el entrenamiento de redes neuronales feed-forward realizadas con datos reales nos dan un Mean Squared Error (MSE) elevado, mientras que cuando se normalizan las variables el MSE disminuye; sin embargo, luego de haber realizado una cantidad de variación de parámetros concatenados a la metodología heurística con el Anexo C, se descarta este tipo de red neuronal ya que no se alcanza el objetivo planteado ($MSE = 1E-6$).

El siguiente tipo de red neuronal planteado para entrenamiento de planta fue NARX, donde luego de haber adquirido la experiencia que se obtiene mejores resultados con datos normalizados se procedió bajo el mismo procedimiento de reglas heurísticas, obtenido excelentes resultados superiores a MSE-objetivo, por lo cual, esta red fue valida como lo muestra la Figura 2-5

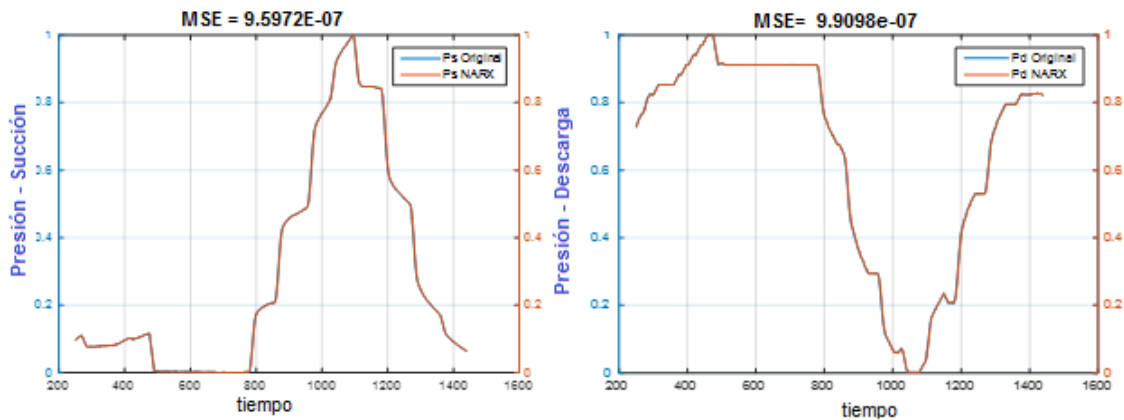


Figura 2-5: Entrenamiento supervisado con redes NARX
Realizado por: Villalba, Williams, 2017

Los datos obtenidos de planta manifiestan un comportamiento no lineal, donde con la red feed-forward no fue posible entrenar la red, sin embargo, la red recurrente Narx dispuso de 2 retardos y a medida que se incrementó las neuronas de la capa oculta se alcanzó el valor objetivo de MSE; adicionalmente, la redes Narx mostraron converger más rápidamente con un algoritmo de entrenamiento de Regulación-Bayesiana que con un algoritmo de entrenamiento Levenberg-Marquardt.

5.2.3 Análisis de resultados del diseño de controladores

En capítulo 4 se detalla la sintonización de los controladores para lo cual se hace referencia a controladores convencionales Proporcional + Integral que sirven de base de entrenamiento de los controladores neurodifusos mediante ANFIS, de manera similar por metodología heurística también se ajusta los parámetros del Anfis a fin de conseguir un error aceptable.

Mediante sintonización de controladores P+I convencionales muestran un sobre impulso del 10% aproximadamente en señal de salida de planta; contrariamente a este efecto, el Anfis al ser entrenado con la curva de control entrada-salida del P+I el sobre impulso se elimina en el mismo tiempo de subida como lo detalla Figura 3-5.

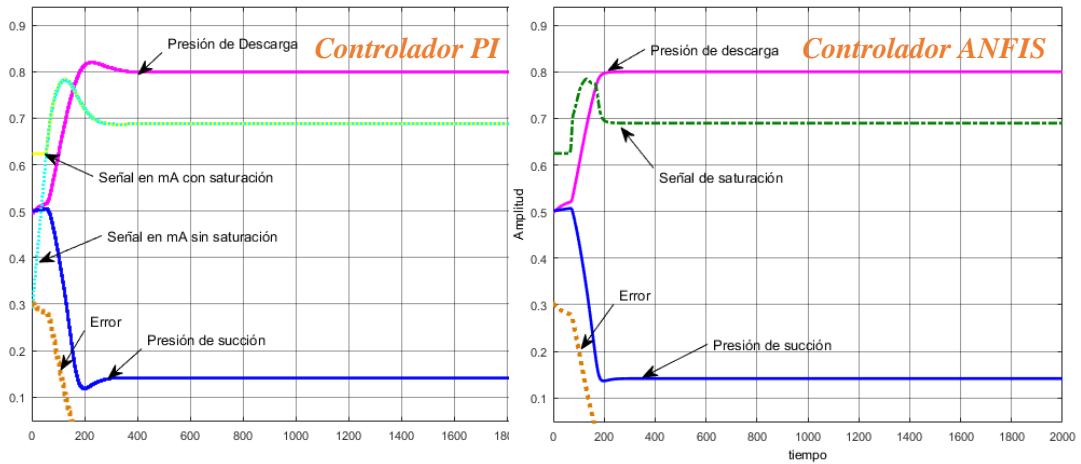


Figura 3-5: Comparación de presiones de los controladores P+I y Anfis,
Realizado por: Villalba, Williams,2017

El error estacionario se anula en el controlador P+I cuando se alcanza alrededor de los 300s mientras que con el controlador neurodifuso entrenado por Anfis se elimina alrededor de los 200s.

Las presiones de la unidad de bombeo están ligadas entre ellas y dependen de la velocidad de rotación de máquina, pero no presentan una relación constante que pueda generalizar su comportamiento.

Dentro de la estructura de control override con controladores neurodifusos, se selecciona al menor de las señales que llegan a la entrada del controlador, que para el caso del ducto es de mayor importancia la presión de descarga de la bomba a fin de eliminar la posibilidad de que se presente el fenómeno ‘slug-flow ‘ que es la presencia de la mezcla líquido-vapor en el punto más alto del perfil altimétrico de la tubería; concluyentemente, mitiga la cavitación que se causa por efecto de la implosión de las burbujas de gas originadas por las bajas presiones; adicionalmente el control por alta presión es ajustado a 1300psig como setpoint, a fin de preservar el punto óptimo de operación entre las curvas del sistema y las curva de la bomba.

Un aspecto relevante que se pudo poner a prueba en las simulaciones fue la robustez de los controladores neurodifusos a la presencia de errores de ajuste del setpoint de la presión de salida, como se expresó anteriormente las presiones están ligadas entre ellas y las rpm’s de la bomba y no se puede ajustar un valor al azar, pese a esto los resultados de las simulaciones nos muestran que el controlador puede absorber un error de 15psig (1285psig-1300psig) transfiriendo el control hacia el lado de succión y manteniendo la estabilidad en las curvas de las presiones como lo atisba la Figura 30-4.

Finalmente, al existir presencia de perturbaciones en la salida del sistema, el controlador sostiene el control hasta una reducción de 30psig porque puede ser por presencia de algún fenómeno dentro de la instrumentación, pero si pasara de estos valores no se debe mantener el control debido a que puede ser a causa de alguna fuga real presente en el tramo de descarga de la bomba y al tratarse de combustibles se convierte en un riesgo potencial de incendio; Por tal razón los resultados manifiestan no controlarse la planta a una perturbación decreciente alta de la presión de descarga como lo detalla el capítulo 4.

CAPÍTULO VI

6 PROPUESTA

- Implementar la estructura override con controladores neurodifusos diseñados en este trabajo de investigación haciendo uso del hardware en el PLC – Quantum y el software del Fuzzy Control V1.2 de Unity Pro XL de Schneider-Electric.

6.1 Conclusiones

Las conclusiones están enfocadas en relación a las dos fases de la propuesta del presente proyecto de tesis, es por ello que se secciona para una mejor comprensión de los mismos.

6.1.1 Respecto a la fase de implementación de la automatización

- La evaluación de la instrumentación del BPCS de la unidad de bombeo está acorde a las etapas previas de ingeniería, dentro de los rangos de calibración necesarios y seleccionada congruentemente con la NEC-500 para áreas clasificadas.
- La implementación del controlador programable Quantum bajo una arquitectura RIO en capa de célula, permitió disminuir los tiempos muertos de operatividad de la unidad de bombeo ocasionados por la problemática presentada, además, al tratarse de un controlador con algoritmos de programación estándar IEC-61131-3, faculta velocidad de respuesta en temas de mantenimiento correctivo, disponibilidad de repuestos en bodegas de la empresa y la parte más importante la facilidad de respuesta ante una emergencia por el know-how adquirido.
- La implementación del HMI en capa de supervisión fue realizado bajo un consenso de las áreas involucradas, tomando como referencia el ciclo de vida del estándar *ANSI/ISA-101.01-2015*, de esto se pudo evidenciar una concatenación de ideas nuevas, recopilación de

experiencias por parte del personal operativo y aceptación del cambio a la nueva propuesta donde fueron participes.

6.1.2 *Respecto a la fase de diseño de controladores neurodifusos*

- La adquisición de datos para la identificación del modelo de planta real, fue un trabajo laborioso sobre todo porque se debe considerar la compatibilidad entre el Hardware & Software del controlador del BPCS y la aplicación con la que se pretende adquirir los datos.
- El tiempo mínimo de los datos adquiridos por el Wonderware Historian Server SP1 es de 1 segundo, motivo por el cual no se podía capturar la dinámica completa de la planta; adicionalmente, el Query del Historian Client desplegaba los datos cada 8 segundos razón suficiente para descartar este método para la adquisición de datos de entrenamiento.
- Labview MyRIO, dispone de protocolo Modbus/Ethernet que es compatible con los controladores Quantum, esto facilitó la programación personalizada y selección de las variables a adquirir y el tiempo de muestreo deseado, que son factores preponderantes para el estudio de la dinámica de la planta.
- Los resultados del entrenamiento de planta con redes neuronales feed-forward no cubrieron el mean squared error (MSE) de $1e-6$, argumento que descartó a este modelo para el presente caso de estudio.
- Las redes, Nonlinear autoregressive exogenous model – NARX al depender de los valores anteriores de la salida y de entrada actual de manera concatenada con las unidades de retardo permitieron alcanzar el MSE deseado; por lo tanto, se validó las propiedades dinámicas del proceso de bombeo.
- Es sustancial afirmar que el entrenamiento de una red neuronal debe hacerse con datos normalizados en lugar de datos reales, ya que es más rápido y fácil alcanzar el MSE deseado.
- El diseño de un controlador neurodifuso mediante sintonización del Anfis de Matlab R2015b es un entrenamiento Off-line y depende de un modelo patrón de I/O para construir la curva de control, con la cual se optimiza las funciones de membresía de la etapa de fuzzificación.

- Los controladores neurodifusos en ambiente de simulación tuvieron un comportamiento robusto a cambios no correlacionados de los setpoints en la presión de descarga, transfiriendo el control al controlador por presión de succión.
- El controlador neurodifuso entrenado para una estructura TSK de orden-1 o lineal mostro mayor rapidez de entrenamiento que la TSK de orden-0 o constante.
- La presencia de disturbios que disminuyan la presión de salida de la unidad de bombeo es absorbida por el controlador hasta -30psig por posibles causas en la instrumentación, por debajo de este límite no hay control ya que puede deberse a una rotura del ducto a lo largo de la trayectoria.
- El controlador neurodifuso por presión de descarga siempre tendrá prioridad de tal manera que se pueda mantener el punto óptimo de operación del sistema; adicionalmente, presenta un curva suave y sin sobre impulsos.

6.2 Recomendaciones

- Antes de realizar un entrenamiento de una red neuronal, es preponderante realizar un preprocesamiento de los datos, tanto en filtrado y normalización de los mismos, con ello se disminuye el tiempo computacional de procesamiento.
- Los rangos de normalización son diversos, pero para el caso de que se encamine el estudio a utilizar sistemas difusos es recomendable trabajar dentro del rango de 0 a1 debido a que las funciones de membresía de los conjuntos difusos de entrada son escalados en este rango.
- Se recomienda realizar un estudio para diseño de controladores neurodifusos basado en la referencia del punto más crítico del perfil altimétrico de la tubería a fin de tener un control de mitigación del efecto de Slug-Flow.

BIBLIOGRAFÍA

- ANSI/ISA-101.01. (2015). *Applying ISA101 Concepts to Existing HMI Applications*.
- Arias,L. & Zabala, M. (2006). *Análisis en estado estacionario y transitorio de las condiciones de operación del Poliducto Quito - Ambato*. Escuela Politécnica Nacional.
- Bravo,Y. & Garcia, D. (2006). *Estudio y aplicación de los modelos ANFIS de Matlab*. Escuela Politécnica Nacional -EPN.
- Emerson. (2015). FloBoss™ S600.
- EP Petroecuador. (2012). 40 Años Construyendo El Desarrollo Del País 1972-2012, 253. Retrieved from http://www.amm.org.gt/pdfs/informes/2001/InfEst2001_01.pdf
- Gonzalez, A. (2008). *Modelado, Planificación y control de sistemas de distribución de gas y derivados de petróleo*. Madrid.
- Haykin, S. (2009). *Neuronal Networks and Learning Machines*. (P. Education, Ed.) (3ra-Edic ed.).
- Invensys. (2013). MBTCP DAServer User ' s Guide.
- Invensys. (2014). Wonderware HMI and Supervisory Solutions.
- Jadhav,S. & Jaladi, K. (2016). Advanced VSC and Intelligent Control Algorithms Applied to SVM_DTC for Induction Motor Drive: A Comparative Study, 2694–2698.
- Kusagur, A. , Kodad, S. & S. R. (2010). Modeling, Design & Simulation of an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for Speed Control of Induction Motor. *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, 6(12), 29–44.
- Malamura,E. & Murata, T. (2016). Hybrid System Modeling and Operation Schedule Optimization for Gas Transportation Network Based on Combined Method of DE, GA and Hybrid Petri Net. *2016 5th IIAI International Congress on Advanced Applied Informatics (IIAI-AAI)*, 1032–1035. <http://doi.org/10.1109/IIAI-AAI.2016.106>
- Metrixvibration. (2013). *DataSheet ST5484E*. Retrieved from

<http://www.metrixvibration.com/tenants/metrix/documents/1133014.pdf>

NFPA-70. (2012). Código Eléctrico Nacional Edición 2008.

Niño, J. (2010). *Control de procesos con redes neuronales artificiales*. Bogota: Editorial Académica Española.

Pérez, J. (2013). *Herramienta Matlab para la selección de entradas y predicción neuronal de valores de bolsa*.

Ponce, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingeniería*.

Saedi, A. , Wu, H & Handroos, H. (2013). ANFIS and Fuzzy Tuning of PID Controller for Trajectory Tracking of a Flexible Hydraulically Driven Parallel Robot Machine. *Journal of Automation and Control Engineering*, 1(2), 70–77. <http://doi.org/10.12720/joace.1.2.70-77>

Schneider-Electric. (2009). User Manual Unity Pro XL.

Segura, V. (2017). *Control Neurodifuso Multivariable de una Turbina de Gas*. México: Editorial Académica Española.

Song, X. & L. . (2009). Nonlinear System Identification Based on NARX Network, (1), 517–525.

Villagomez, J. (2005). *Diseño e implementación del sistema de control automático para el grupo de bombeo P – 301 de la estación Faisanes de Petrocomercial*. ESCUELA POLITECNICA DEL EJERCITO.

Wonderware. (2014). *About This Readme Feature Enhancements Included in InTouch HMI 2014 Patch 01 Programmatically Exporting and Importing ArchestrA Symbols Trend Pen Step Line Mode Wonderware Product Compatibility Updates Resolved Issues - Wonderware InTouch HMI 2014 (v11 . (Vol. 2014)*.