



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS
ARMADAS - ESPE**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
CONTROL PARA EL SKID DE BOMBEO DE PRODUCTOS
LIMPIOS EN EL POLIDUCTO AMBATO-RIOBAMBA PARA LA
EMPRESA ANCAL-ACEROS.”**

**PROYECTO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECATRÓNICO**

**LASCANO DALGO DIEGO ANDRÉS
RUALES REALPE JOSÉ**

**DIRECTOR: ING. OSWALDO MARIÑO
CODIRECTOR: ING. ALBERTO ALBUJA**

Sangolquí, 2015 - 01

AUTORIZACIÓN

DIEGO ANDRÉS LASCANO DALGO
JOSÉ RUALES REALPE

AUTORIZAMOS QUE:

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, publique en la biblioteca virtual de la institución, la tesis de grado titulada “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL SKID DE BOMBEO DE PRODUCTOS LIMPIOS EN EL POLIDUCTO AMBATO-RIOBAMBA PARA LA EMPRESA ANCAL-ACEROS.” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad y autoría.

Diego Lascano.

José Ruales.

Sangolquí, 2015-01

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL SKID DE BOMBEO DE PRODUCTOS LIMPIOS EN EL POLIDUCTO AMBATO-RIOBAMBA PARA LA EMPRESA ANCAL-ACEROS.” fue realizado en su totalidad por Diego Andrés Lascano Dalgo y José Ruales Realpe como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica.

Ing. Oswaldo Mariño

DIRECTOR

Ing. Alberto Albuja

CODIRECTOR

Sangolquí, 2015-01

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

DIEGO ANDRÉS LASCANO DALGO
JOSÉ RUALES REALPE

DECLARAMOS QUE:

La tesis de grado titulada “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL SKID DE BOMBEO DE PRODUCTOS LIMPIOS EN EL POLIDUCTO AMBATO-RIOBAMBA PARA LA EMPRESA ANCAL-ACEROS.” ha sido desarrollada con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico de esta tesis de grado.

Diego Lascano.

José Ruales.

DEDICATORIA

A mis padres Marcelo y Marcia que siempre me han cuidado y apoyado. En retribución a tanto esfuerzo y dedicación de parte de ellos. Ustedes siempre nos han dado a mí y mis hermanos, todo lo que hemos necesitado llevándonos a ser personas de bien. Este logro es muy importante para mí porque deja ver el resultado del gran trabajo que han realizado como padres y como los excelentes seres humanos que son.

A mis hermanos Cristhian y Ronald porque siento que ellos forman parte de este logro. Me han acompañado a lo largo de mi carrera y siempre me han motivado a hacer cosas grandes e importantes.

Diego Lascano

DEDICATORIA

A mis padres, ya que gracias a su confianza en mí y sus ánimos
todo esto fue posible y fácil de lograr.

A mi hermanita Diana, ya que es ella la que me impulsa a ser mejor
en todo ámbito, dándome ánimos para superarme y confiando en mí más
que cualquier otra persona.

A mis familiares, demostrándoles que con un poco de esfuerzo se
pueden lograr grandes cosas en la vida.

José Ruales

AGRADECIMIENTO

A mis padres Marcelo y Marcia, porque sin ellos nunca hubiera tenido la oportunidad de crecer. Gracias por inculcarme valores tan importantes como honradez, la justicia y el respeto, pero sobre todo gracias por enseñarme a no rendirme, a confiar en mí mismo y que por más difícil que sean las situaciones, está en nuestras manos terminar de la mejor manera cualquier meta u objetivo planteado.

A mis hermanos por estar siempre a mi lado. Por sacarme una sonrisa en cada momento durante este tan importante periodo de mi vida. Por mostrarme que nunca estoy solo y por transmitirme esas ideas que me enseñaron a pensar fríamente y tomar siempre una buena y correcta decisión ante cualquier problema.

A todos los funcionarios de las empresas Ancalaceros y Electricbright, quienes desde un comienzo confiaron en mí. Me compartieron todas sus experiencias para ayudarme a ser lo que ahora a nivel profesional. Gracias por el apoyo durante el desarrollo de este proyecto y por todo lo que me han enseñado.

A mis amigos Carlos, Wilson, Gaby y José quienes estuvieron a mi lado durante los últimos 6 años compartiendo cada experiencia nueva y aprendiendo de cada situación.

Diego Lascano

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios ya que esta es una más de las bendiciones que
Él me regala.

A mis padres, demostrándoles que su esfuerzo ha sido
recompensado con la obtención de este título y sobretodo una mejor
persona que ellos fueron formando en el camino.

A Dianita, mi hermana, que estuvo presente en todos los
momentos de mi vida, en los buenos y en los malos; siempre apoyándome y
dándome fuerzas para seguir adelante; demostrándome que las
adversidades de la vida no son tan difíciles como uno cree, sino pasajeras y
rápidas de superar.

A la empresa ANCALACEROS por darme la oportunidad de
realizar mi tema de tesis en uno de sus proyectos dentro de las estaciones
de EPPetroecuador, contando con todo el apoyo de la empresa y del
personal no solo de ANCALACEROS sino de funcionario y valiosas
personas de EPPetroecuador.

José Ruales

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO I	
	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	ÁREAS DE INFLUENCIA.....	2
1.3	OBJETIVOS	3
1.3.1	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4	ALCANCE	4
1.5	IMPORTANCIA DE LA AUTOMATIZACIÓN EN EL SKID DE BOMBEO.....	4
1.5.1	IMPORTANCIA DE AUTOMATIZAR LAS VÁLVULAS.....	6
1.5.2	IMPORTANCIA DE AUTOMATIZAR LAS BOMBAS	6
2	CAPÍTULO II	7
	DESCRIPCIÓN DEL SKID DE BOMBEO.....	7
2.1	ESTACIÓN DE BOMBEO.....	7
2.1.1	PRODUCTOS LIMPIOS.....	9
2.1.2	SISTEMA DE BOMBEO REDUNDANTE	9
2.2	DESCRIPCIÓN DEL SKID DE BOMBEO	10
2.2.1	BOMBAS	11
2.2.2	VÁLVULAS	12
2.2.3	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS	14
2.2.3.1	Presión	14
2.2.3.2	Temperatura.....	16
2.2.3.3	Vibración.....	18
2.2.3.4	Switches.....	18
2.2.3.5	Variador de Frecuencia	19
2.2.4	SISTEMA DE TUBERÍAS	20
2.3	CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA EL PROYECTO	21
2.3.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES.	21
2.3.2	CONCEPTOS DE SEGURIDAD PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS	23
2.3.2.1	Clasificación por divisiones	23
2.3.2.2	Consideraciones para la clasificación de áreas peligrosas por divisiones	26
2.3.2.3	Determinación del grupo	29

2.3.3	SISTEMAS DE CONTROL.....	29
2.3.3.1	Métodos de control	30
2.3.3.2	Elemento de corrección para el proceso	32
3	CAPITULO II	34
	CONFIGURACIÓN DE INSTRUMENTOS Y EQUIPOS.....	34
3.1	DIVISIÓN DE EQUIPOS.....	34
3.1.1	MECÁNICOS.....	34
3.1.2	ELÉCTRICOS.....	34
3.1.3	ELECTRÓNICOS.....	35
3.2	INSTRUMENTACIÓN.....	35
3.2.1	REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE.....	36
3.2.2	CONDICIONES GENERALES.....	36
3.2.3	CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD	36
3.2.4	MANÓMETROS	36
3.2.4.1	Condiciones de proceso en la succión	37
3.2.4.2	Condiciones de proceso en la descarga.....	37
3.2.4.3	Rango de calibración	37
3.2.4.4	Conexión al proceso.....	37
3.2.4.5	Especificación.....	38
3.2.5	TRANSMISORES INDICADORES DE PRESIÓN	39
3.2.5.1	Condiciones de proceso en la succión	39
3.2.5.2	Condiciones de proceso en la descarga.....	39
3.2.5.3	Rango de calibración	39
3.2.5.4	Conexión al proceso.....	39
3.2.5.5	Requerimientos electricos – electrónicos	39
3.2.5.6	Especificación.....	40
3.2.6	TRANSMISORES INDICADORES DE TEMPERATURA.....	44
3.2.6.1	Condiciones de proceso.....	44
3.2.6.2	Rango de calibración	45
3.2.6.3	Conexión al proceso.....	45
3.2.6.4	Requerimientos eléctricos – electrónicos	45
3.2.6.5	Especificación.....	45
3.2.7	INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS	49
3.2.7.1	Procedimiento de instalación de transmisor de presión	49
3.2.7.2	Procedimiento de instalación de transmisor de temperatura	54

3.3	EQUIPOS	57
3.3.1	REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE.....	58
3.3.2	VÁLVULAS MOTORIZADAS.....	58
3.3.2.1	Requerimientos de proceso y localización	58
3.3.2.2	Funcionamiento	59
3.3.2.3	Clasificación de seguridad.....	60
3.3.2.4	Especificación.....	60
3.3.3	VARIADORES DE FRECUENCIA.....	61
3.3.3.1	Requerimientos de proceso y localización	61
3.3.3.2	Control y Comunicación	62
3.3.3.3	Clasificación de seguridad.....	62
3.3.3.4	Especificación.....	63
3.3.4	FILTROS	65
3.3.4.1	Tipo de filtro	65
3.3.4.2	Control y comunicación.....	65
3.3.4.3	Clasificación de seguridad.....	65
3.3.4.4	Especificación.....	65
3.3.5	CONTROLADOR PAC T2750.....	68
3.3.6	SERVIDORES Y ESTACIONES DE TRABAJO	69
3.3.6.1	Hardware	69
3.3.6.2	Software	70
3.3.7	INSTALACIÓN DE EQUIPOS.....	72
3.3.7.1	Instalación de variadores de velocidad.....	72
3.3.7.2	Procedimiento de instalación de válvulas MOV.....	73
3.3.8	INTEGRACIÓN DE EQUIPOS A LA RED INDUSTRIAL Y PROGRAMACIÓN	76
3.3.8.1	Variadores de velocidad.....	76
3.3.8.2	Controladores PAC T2750.....	78
3.3.8.3	Servidores y workstation	79
3.3.9	PROGRAMACIÓN	80
3.3.10	CONFIGURACION DE COMUNICACIÓN MODBUS TCP/IP.....	85
4	CAPÍTULO III.....	88
	DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	88
4.1	MODELAMIENTO DE LA PLANTA Y DISEÑO DEL CONTROLADOR	89
4.1.1	FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.....	91

4.1.2	ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA PLANTA	94
4.1.3	DESARROLLO DEL CONTROLADOR.....	96
4.1.4	SIMULACIÓN DE LA PLANTA CON CONTROLADOR EN MATLAB..	98
4.2	PROGRAMACIÓN DEL PAC T2750 MEDIANTE LINTOOLS	107
4.2.1	LÓGICA DE CONTROL.....	107
4.2.2	PROGRAMACIÓN BLOQUE DE BOMBAS.....	108
4.2.3	PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR.....	112
5	CAPITULO IV.....	114
5.1	PRUEBAS PRELIMINARES.....	114
5.1.1	INSTRUMENTACIÓN	114
5.1.2	EQUIPOS.....	120
5.1.2.1	Válvulas motorizadas.....	120
5.1.2.2	Variadores de velocidad.....	124
5.1.2.3	Pruebas de motores eléctricos	124
5.2	SISTEMA DE CONTROL.....	126
5.2.1	DIESEL PREMIUM	126
5.2.2	GASOLINA EXTRA	128
5.2.3	GASOLINA SUPER.....	130
5.2.3.1	Prueba 1	131
5.2.3.2	Prueba 2	133
5.2.4	RESUMEN	135
5.3	COSTOS OPERATIVOS	137
6	CAPITULO V.....	139
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
6.1	CONCLUSIONES	139
6.2	RECOMENDACIONES.....	140
	REFERENCIAS.....	146
	ANEXOS	144
	ANEXO 1. PLANOS	145
	ANEXO 2. REPORTE DE ENSAYOS DE LAS BOMBAS	147
	ANEXO 3. DATOS DEL MOTOR	149
	ANEXO 4. PROTOCOLO DE PRUEBAS	150
	ANEXO 5. PROCEDIMIENTOS.....	151
	ANEXO 6. DIAGRAMAS DE FLUJO.....	153
	ANEXO 7. DATASHEETS Y ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS	154
	ANEXO 8. CERTIFICACIONES	156

ANEXO 9. MANUAL DE OPERACION.....	158
ANEXO 10. ESTUDIO HIDRÁULICO	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Perfil del poliducto Ambato-Riobamba. Ubicación de estaciones.....	2
Figura 2. Perfil del poliducto Ambato-Riobamba.....	7
Figura 3. Perfil de presión para el Diesel.....	8
Figura 4. Perfil de presión para la Gasolina Extra.....	8
Figura 5. Perfil de presión para la Gasolina Súper.....	9
Figura 6. SKID de bombeo redundante.....	9
Figura 7. SKID de bombeo. Bomba centrífuga.....	10
Figura 8. Bomba centrífuga.....	11
Figura 9. Motor eléctrico de inducción tipo jaula de ardilla.....	12
Figura 10. Actuador eléctrico.....	13
Figura 11. Válvula de bola.....	13
Figura 12. Válvula de seguridad de presión PSV.....	14
Figura 13. Indicador de presión tipo Bourdon.....	15
Figura 14. Indicador-transmisor de presión PIT.....	15
Figura 15. Transmisor de presión PT.....	16
Figura 16. Indicador-transmisor de temperatura TIT.....	17
Figura 17. Sensor de temperatura RTD.....	17
Figura 18. Sensor de vibración VE.....	18
Figura 19. Switch de nivel.....	19
Figura 20. Switch de presión PS.....	19
Figura 21. Variador de frecuencia.....	20
Figura 22. Tanque sumidero. Tubería de venteo.....	28
Figura 23. Diagrama de control general.....	30
Figura 24. Motor asíncrono. Partes.....	33
Figura 25. Especificación de transmisores de presión.....	43
Figura 26. Especificación de transmisores de temperatura.....	46
Figura 27. Instalación de accesorios mecánicos.....	49
Figura 28. Válvula de bloqueo y purga Rosemount.....	50
Figura 29. Instalación de accesorios mecánicos.....	50
Figura 30. Conector TMCX.....	51
Figura 31. Cable armado 2Px16AWG. Apantallado.....	51
Figura 32. Conexión de transmisor de presión.....	52
Figura 33. PI y PIT montados en succión de bomba 220.....	53
Figura 34. Montaje en derivación de PI y PIT en descarga de bomba 220.....	53
Figura 35. Threadolet de 1/2".....	54
Figura 36. Instalación TIT en descarga de bomba 220.....	54
Figura 37. Configuraciones de conexión en TIT.....	55
Figura 38. Instalación completa TIT en descarga de bomba 220.....	55
Figura 39. Conexión de RTDs de los devanados del motor de la bomba 221.....	56
Figura 40. Conexión de RTD de cojinete D.E. del motor de la bomba 221.....	57
Figura 41. Tamaño y capacidad de carga de modelo MX de válvulas limitorque.....	61

Figura 42. Efecto de la carga.....	66
Figura 43. Espectro de armónicos a plena carga.....	67
Figura 44. Filtro RLC. Exterior.....	67
Figura 45. PAC T2750.....	68
Figura 46. Servidores SRV-001 y SRV-002.....	69
Figura 47. Estaciones de trabajo.....	70
Figura 48. Ventana principal ArcestrA.....	71
Figura 49. Pantalla de WS-002 en tiempo real. Software cliente.....	72
Figura 50. Pruebas de continuidad y megado de los variadores.....	73
Figura 51. Válvulas de succión y descarga del SKID de bombeo durante etapa de construcción.....	73
Figura 52. Sección transversal cable armado 12Cx14AWG.....	74
Figura 53. Cable armado 12Cx14AWG.....	74
Figura 54. Cables conectados en válvula motorizada MOV.....	75
Figura 55. Conexión de válvula motorizada MOV.....	75
Figura 56. Instalación final del SKID de bombeo.....	76
Figura 57. Variador de velocidad PowerFlex 700H del poliducto Ambato - Riobamba.....	77
Figura 58. Cambio de dirección IP, Subnet y Gateway de los controladores.....	79
Figura 59. Bloque base del controlador número 1.....	80
Figura 60. Bloques de entradas y salidas creadas.....	81
Figura 61. Ingreso de TAG de variables.....	84
Figura 62. Configuración de variables.....	85
Figura 63. Configuración de instrumentos Modbus TCP/IP.....	85
Figura 64. Datos de corriente vs tiempo obtenidos del arranque de las bombas a plena carga.....	90
Figura 65. Datos de presión vs tiempo obtenidos del arranque de las bombas a plena carga.....	90
Figura 66. Ingreso de variables de entrada y salida del sistema en vectores.....	91
Figura 67. Herramienta de identificación de sistemas.....	92
Figura 68. Ingreso de vectores de datos del arranque en el dominio del tiempo.....	93
Figura 69. Creación de función de transferencia con escogiendo número de polos y ceros.....	94
Figura 70. Arquitectura de control estándar. <i>SISOTOOL</i>	99
Figura 71. Ventana de análisis de plantas. <i>SISOTOOL</i>	99
Figura 72. Ventana principal de <i>SISOTOOL</i>	100
Figura 73. Resultados que muestra <i>SISOTOOL</i> al ingreso de la planta del sistema sin controlador.....	100
Figura 74. Resultados que muestra <i>SISOTOOL</i> al ingreso de la planta del sistema con controlador.....	101
Figura 75. Respuesta de la planta a un impulso unitario con controlador en lazo cerrado.....	103
Figura 76. Respuesta de la planta a un impulso unitario con controlador corregido en lazo cerrado.....	104

Figura 77. Respuesta de la planta a un impulso unitario con controlador corregido en lazo cerrado.....	105
Figura 78. Respuesta de la planta a un impulso con valor del set point con controlador en lazo cerrado.	106
Figura 79. Diagrama de flujo del arranque de las bombas.....	108
Figura 80. Lógica de control de presión.....	108
Figura 81. Creación de bloque.	109
Figura 82. Programación de las bombas.....	109
Figura 83. Propiedades del bloque de los motores de las bombas.....	110
Figura 84. Propiedades del bloque PID.	110
Figura 85. Propiedades del bloque de las válvulas.	111
Figura 86. Permisivos para el control del motor de la bomba.	112
Figura 87. Configuración de constantes en bloque PID.....	113
Figura 88. Indicadores de estados en PAC T2750.....	115
Figura 89. Transmisor de presión en pruebas de lazo. Lectura en campo.....	115
Figura 90. Válvula energizada y encendida.	120
Figura 91. Pruebas de cambio de estados de válvula B1_MOV_EA220 en tiempo real.....	121
Figura 92. Status de comunicación de válvulas en Master Station	123
Figura 93. Mapa Modbus Estación Maestra	123
Figura 94. Prueba de arranque de motor en vacío. Verificación de parámetros.....	125
Figura 95. Presión de descarga con Diésel Premium.....	127
Figura 96. Presión de descarga con Gasolina Extra.....	129
Figura 97. Presión de descarga con Gasolina Súper. Prueba 1	132
Figura 98. Presión de descarga con Gasolina Súper. Prueba 2.....	134
Figura 99. Error medido en las pruebas con producto.....	136
Figura 100. Error en estado estable obtenido en las pruebas	136
Figura 101. Isla de carga actual Estación Ambato.	138
Figura 102. Autotank de 10000 gls. Estación Ambato.	138

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características Gasolina Extra.....	21
Tabla 2. Características Gasolina Súper.....	22
Tabla 3. Características Diésel Premium.....	22
Tabla 4. Manómetros especificados	40
Tabla 5. Números de parte de los instrumentos PIT de la sección de bombas	44
Tabla 6. Números de parte de los instrumentos TIT de la sección de bombas	48
Tabla 7. Lista de instrumentos.....	48
Tabla 8. Características PAC T2750	68
Tabla 9. Número de tarjetas PAC T2750.....	69
Tabla 10. Número de señales PAC T2750.....	69
Tabla 11. Distribución de licencias.....	72
Tabla 12. Dirección IP, Subnet y Gateway de los variadores	77
Tabla 13. Parámetros del variador de frecuencia PowerFlex 700H.....	78
Tabla 14. Dirección IP, Subnet y Gateway de los controladores PAC T2750.....	79
Tabla 15. Dirección IP, Subnet y Gateway de servidores	80
Tabla 16. Dirección IP, Subnet y Gateway de workstation	80
Tabla 17. Lista de señales del PAC	81
Tabla 18. Mapa Modbus Variador PowerFlex 700H	86
Tabla 19. Mapa Modbus Estación Maestra	86
Tabla 20. Matriz de ponderación para modelamiento de planta.	89
Tabla 21. Matriz de ponderación para controlador.	96
Tabla 22. Pruebas de control de válvulas.	122
Tabla 23. Muestra de datos obtenidos para el Diésel Premium.....	126
Tabla 24. Muestra de datos obtenidos para la Gasolina Extra.....	128
Tabla 25. Muestra de datos obtenidos para la Gasolina Súper. Prueba 1.....	131
Tabla 26. Muestra de datos obtenidos para la Gasolina Súper. Prueba 2.....	133
Tabla 27. Errores obtenidos en las pruebas.	135
Tabla 28. Costo mensual operativo con autotanques	137
Tabla 29. Costo mensual operativo poliducto Ambato - Riobamba.....	138

RESUMEN EJECUTIVO

En este proyecto se diseña e implementa un sistema de control para el SKID de bombeo del poliducto Ambato – Riobamba para transportes de combustibles. El objetivo principal es controlar dos bombas centrífugas de flujo axial de 14 etapas y de 600 HP de potencia, de tal forma que se genere la presión de descarga necesaria para poder movilizar cada producto, sobrepasando el punto más elevado ubicado en el sector de Urbina. Para medir la presión de succión y descarga de cada bomba, se instalaron indicadores – transmisores de presión marca Rosemount los cuales garantizan una medida confiable para el proyecto. Para controlar los motores eléctricos de inducción de las bombas se instalaron variadores de frecuencia PowerFlex 700H de la marca Allen Bradley – Rockwell Automation. La adquisición de datos se realizó con el protocolo 4-20 mA para toda la instrumentación, llevando todas las señales a los controladores PAC de la marca Foxboro donde se programaron las lógicas de control y todas las protecciones que garanticen el cuidado de los equipos. La aplicación HMI fue desarrollada en el entorno ArchestrA de Wonderware. Se instalaron dos máquinas de trabajo ubicadas en el Cuarto de Control donde se opera el poliducto. Las pruebas realizadas evidencian el correcto funcionamiento del sistema implementado y los equipos instalados, cumpliendo con el objetivo que es transportar el combustible desde la Estación de Bombeo Ambato hasta la Estación Reductora Riobamba.

Palabras Clave: PID, Sistema de Control, PAC, SCADA, Instrumentación.

ABSTRACT

In this project is designed and implemented a control system for a pumping system in the Ambato - Riobamba poliduct for transport fuels. The main objective is to control two 14 – stages 600HP centrifugal pumps, in order to reach a needed discharge pressure to mobilize each product from Amtato Statio to Riobamba Statio, exceeding the highest point situated in Urbina. Rosemount pressure indicators – transmitters, measure the suction and discharge pressure of each pump, giving a reliable measure for the project. Two Rockwell PowerFlex 700H inverters were installed in order to control the electric induction motors of the pumps. Data acquisition was performed with 4-20 mA protocol for all field instrumentation, carrying the signals to Foxboro PAC controllers, where the strategies and protections that guarantee a secure operation and care of equipment were programmed. The HMI application was developed in Wonderware ArcestrA environment. Two Work Stations located in the control room are used to operate the poliduct. Tests show the correct operation of the implemented system and the installed equipment, fulfilling the objective that is to transport fuel from Pumping Station Ambato to Reducing Station Riobamba.

Key Words: PID, Control System, PAC, SCADA, Instrumentation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Debido al incremento de la demanda en los últimos años de combustibles en la ciudad de Riobamba y zonas aledañas, nace la idea del traslado de estos productos por medio de un poliducto desde la ciudad de Ambato, del cual se rebombeará diésel y naftas, también conocidos en el ámbito técnico como productos limpios, provenientes del poliducto Quito-Ambato. Uno de los inconvenientes en el traslado de productos limpios de Ambato a Riobamba, es el costo de transporte que se paga a los tanqueros. De esta forma se puede abastecer de manera eficiente los combustibles limpios, reducir el riesgo por efecto de la transportación y poder efectuar un control más exacto de la cantidad de producto transportado.

Actualmente el poliducto Ambato – Riobamba se encuentra en una etapa de transición donde por un lado se está cerrando la ingeniería de diseño en todas las áreas y por otro lado, se está finalizando la construcción mecánica tanto de la Estación Ambato como la terminal Riobamba. Para nuestro caso en particular, las bombas, tuberías y demás accesorios mecánicos han sido correctamente instalados por la empresa contratista dejando claramente especificado que los tesisas se encargarán de realizar la especificación de la instrumentación necesaria y equipos, además de diseñar e implementar el sistema de control de las bombas sin tener que involucrarse con el dimensionamiento e instalación de las mismas.

El sistema de tuberías de transporte de combustibles livianos desde la ciudad de Ambato hasta la ciudad de Riobamba tiene una longitud aproximada de 50km, formado por tubería de acero al carbono API5L x46 de diámetro 6 pulgadas. Este poliducto consta con varias estaciones como son: la estación de bombeo ubicada en Ambato, cuatro estaciones de control

llamadas canastillas, ubicadas a lo largo del poliducto y la estación reductora ubicada en la ciudad de Riobamba.

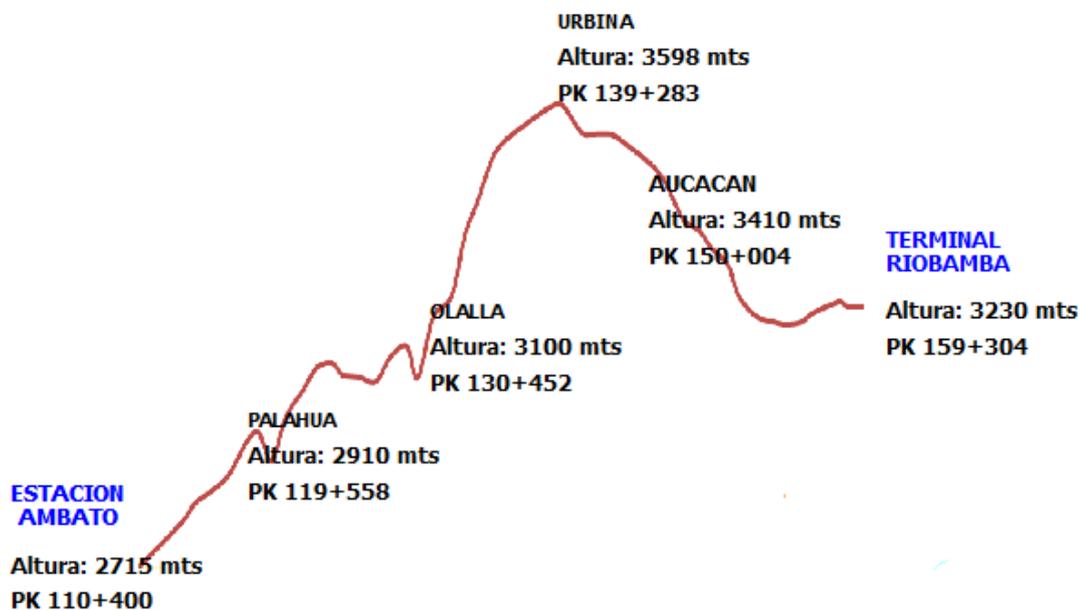


Figura 1. Perfil del poliducto Ambato-Riobamba. Ubicación de estaciones.

Desde la estación de Ambato se llevará por medio del poliducto Ambato – Riobamba hasta la terminal de Riobamba, 3 tipos de combustibles los cuales son: gasolina extra, gasolina súper y diésel Premium.

1.2 ÁREAS DE INFLUENCIA

El presente proyecto es una propuesta de desarrollo que tiene una amplia área de influencia poblacional. El sector de impacto abarca la zona sierra-centro del Ecuador ya que desde la terminal de productos limpios en Riobamba, se podrá abastecer de manera más fácil y rápida a las ciudades aledañas, consiguiendo así un mejor servicio para la población de dicho sector.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de control para el SKID de bombeo redundante de productos limpios desde la estación Ambato hasta la estación reductora Riobamba para mantener durante la operación una presión de descarga mínima requerida por EP Petroecuador para movilizar los productos superando el punto más alto del trayecto ubicado en la canastilla de Urbina.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Seleccionar el método de control más adecuado que permita gobernar de forma estable el sistema de bombeo para los diferentes productos limpios que se transportan por el poliducto.
- ✓ Especificar el sistema de instrumentación y equipos más adecuados según las condiciones de proceso, que permitan controlar de manera eficaz el sistema de bombeo.
- ✓ Seleccionar y diseñar el tipo de controlador más adecuado que permita obtener el mejor resultado, minimizando la desviación del punto de operación.
- ✓ Evaluar el desempeño eléctrico de los equipos instalados y comparar con los valores permitidos por la CONELEC respecto a la distorsión de armónicos en la red eléctrica.
- ✓ Estimar el ahorro económico y tiempo de abastecimiento que el Poliducto Ambato-Riobamba representa para la empresa EP Petroecuador durante la operación continua versus el uso de autotanques.
- ✓ Determinar la susceptibilidad de la tubería enterrada a lo largo del tramo Ambato-Riobamba a perturbaciones de presión generadas por cambios en las condiciones ambientales.

1.4 ALCANCE

El objetivo principal es realizar el control del sistema de bombeo redundante, el cual lo conforman 2 bombas multietapa que se utilizan para el transporte de productos derivados de petróleo desde la estación de rebombeo en Ambato hasta la estación reductora y de almacenamiento en Riobamba; ambas propiedad de EP Petroecuador y en una distancia de 50 kilómetros. Para iniciar el proyecto, el SKID de bombas, sus accesorios, el sistema de tuberías y todos sus periféricos deberán estar instalados y listos para ser puestos en marcha. Esta actividad correrá por cuenta de la empresa contratista con lo que brindará las condiciones iniciales requeridas por los tesistas para poder empezar el proyecto. La primera actividad de los estudiantes será la especificación de instrumentación: sensores de presión, caudal y temperatura con sus respectivos transmisores y las válvulas motorizadas encargadas del alineamiento del tren de funcionamiento. Se contará con los valores de diseño de presiones, temperatura y caudal del proceso. También, según las características de la bomba, se utilizará variadores de frecuencia para el control de velocidad de las mismas. Una vez seleccionados y especificados los instrumentos y equipos necesarios para la estación de bombeo, se diseñará el controlador, determinando primero el método de control más adecuado para posteriormente, realizar el cálculo y simulación del mismo. Una vez desarrollado el estudio técnico, se instalarán, configurarán y calibrarán los instrumentos y equipos. Las pruebas finales del sistema de bombeo se realizarán integrándolo a un HMI desarrollado en paralelo por un equipo de ingenieros dentro del proyecto.

1.5 IMPORTANCIA DE LA AUTOMATIZACIÓN EN EL SKID DE BOMBEO

Hoy en día es de mucha importancia el hecho que las industrias automaticen sus procesos y más aún cuando se trata de procesos críticos y de sumo cuidado como en el presente proyecto, que trata sobre el transporte de productos derivados del petróleo. La automatización en este proyecto

aumenta el rendimiento del mismo, a la vez que permite anticipar problemas como una operación tardía frente a una condición de sobre presión en el poliducto o una operación equivocada en el alineamiento de válvulas, reduciendo el riesgo de operación.

La automatización en el SKID de bombeo se ha tornado necesaria dentro del proyecto para garantizar un umbral correcto de funcionamiento dentro del cual todos los elementos que conforman el conjunto de bombas estarán operando bajo condiciones seguras y no exigentes alargando la vida útil de dichos elementos, a la vez que se consigue excluir al ser humano de tareas repetitivas y peligrosas. Para conseguir este objetivo fue necesario instalar 4 válvulas de bola, 1 de 6 pulgadas para la succión y 1 de 4 pulgadas para la descarga por cada grupo de bombeo, controladas por actuadores eléctricos, transmisores e indicadores electrónicos los cuales nos permiten monitorear el proceso desde un cuarto de control de manera óptima.

La automatización se realiza mediante un controlador lógico programable PLC, que está encargado de manejar todo el proceso y comunicar toda la información a una interfaz Humano – Máquina, HMI.

Las partes más importantes dentro de la automatización en el SKID de bombeo se ven detalladas a continuación:

- **Instrumentación.** Parte muy relevante dentro del proyecto son los elementos que se utilizan para medir las variables físicas más importantes del proyecto. Se han instalado instrumentos para medir básicamente presión, temperatura y flujo que son los datos más importantes del proceso y que están basados en el protocolo de comunicación 4-20 mA + HART.
- **Monitoreo.** Dentro del cuarto de control, mediante las ventanas interactivas del HMI del proyecto se puede visualizar gráficamente los datos más relevantes del proceso e incluso información de funcionamiento de las bombas.
- **Control del sistema.** Dentro del PLC del proceso residen las lógicas

de control programadas que ponen en funcionamiento a todos los elementos electrónicos, es decir, se adquieren datos de los transmisores y se envían datos hacia los actuadores.

1.5.1 IMPORTANCIA DE AUTOMATIZAR LAS VÁLVULAS

Las razones más relevantes por las cuales es necesaria la automatización de las válvulas son las siguientes:

- Excluir al ser humano de una tarea repetitiva y relativamente peligrosa dentro de un área clasificada.
- Centralizar el control del proceso.
- La automatización permite que un solo operario pueda manejar de manera remota y simultánea varios actuadores a la vez reduciendo el tiempo en el que se toma una acción sobre el proceso.

1.5.2 IMPORTANCIA DE AUTOMATIZAR LAS BOMBAS

Las razones más importantes por las cuales es necesaria la automatización de los grupos de bombeo son las indicadas a continuación:

- Excluir al ser humano de una tarea repetitiva y relativamente peligrosa dentro de un área clasificada.
- La automatización permite tomar acciones inmediatas de manera remota en caso de un mal funcionamiento.
- Se puede realizar un control sobre el punto de operación requerido generando las mejores condiciones de funcionamiento para el proceso.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DEL SKID DE BOMBEO.

2.1 ESTACIÓN DE BOMBEO

La estación de bombeo está ubicada en la ciudad de Ambato, en el sector Huachi La Joya, a 2760 msnm, cuyas coordenadas geográficas son $01^{\circ}16'16.61''$ S y $78^{\circ}37'14.78''$ O, es parte del poliducto Ambato-Riobamba y corazón del proyecto, (OFFSHORE IN.DI.GI, 2009). En este lugar se encuentra instalado el Skid de bombeo.

Según el estudio hidráulico del poliducto Ambato – Riobamba, realizado por la empresa CONSPECCIME, cada producto requiere una presión mínima para llegar al punto más alto, ubicado en Urbina, a 3700 msnm (Figura 2). La presión mínima para el Diésel es de 10480 kPa (1520 psi) (Figura 3), para la Gasolina Extra es de 8860 kPa (1285 psi) (Figura 4) y para la Gasolina Súper es de 8894 kPa (1290 psi) (Figura 5).

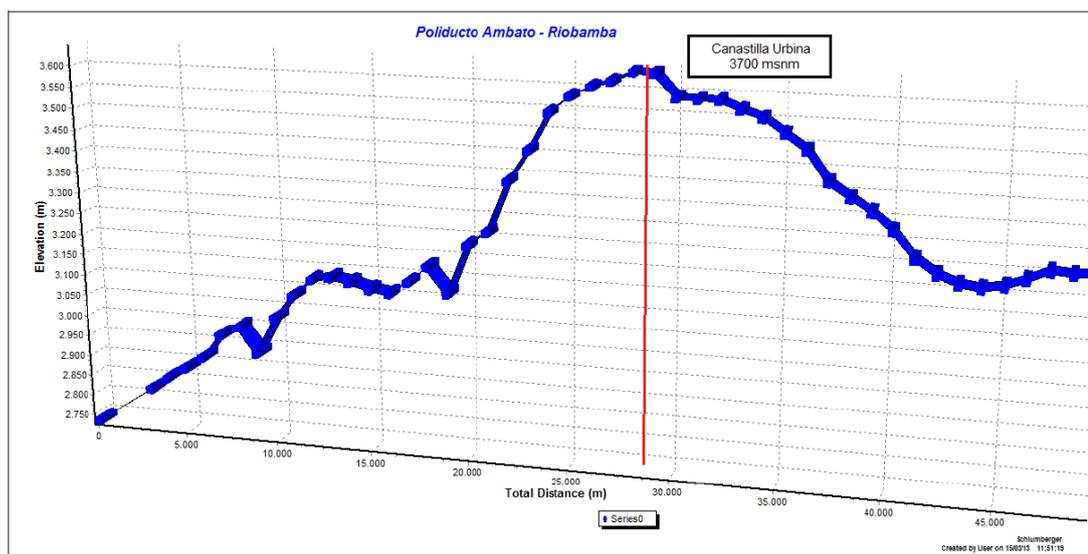


Figura 2. Perfil del poliducto Ambato-Riobamba.

Fuente: (CONSPECCIME, 2013)

Las figuras 3, 4 y 5 muestran el comportamiento de las presiones a lo largo del poliducto a diferentes caudales de prueba. Estas imágenes nos brindan información clave de los requerimientos de presión para la operación.

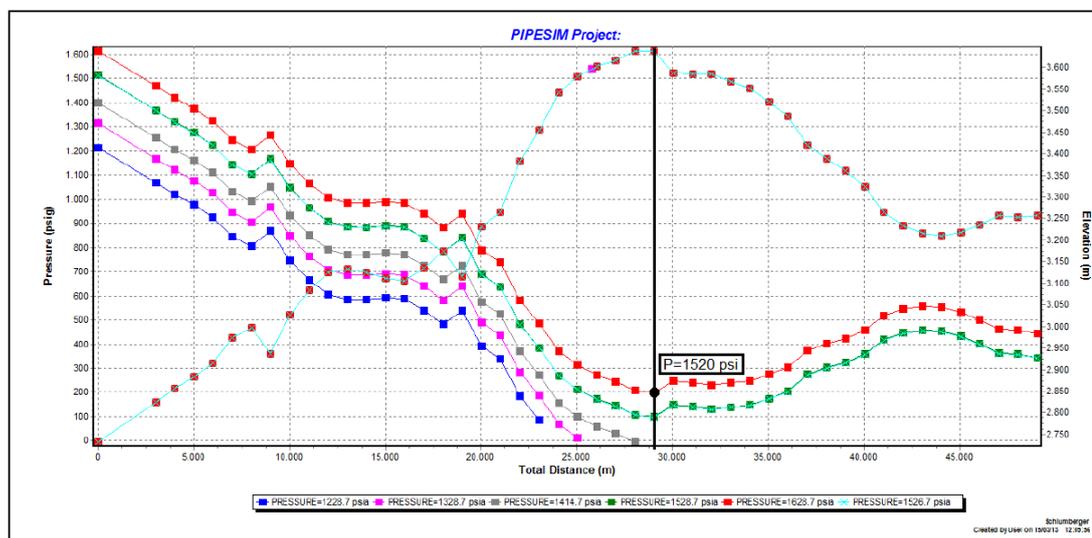


Figura 3. Perfil de presión para el Diésel.

Fuente: (CONSPECCIME, 2013)

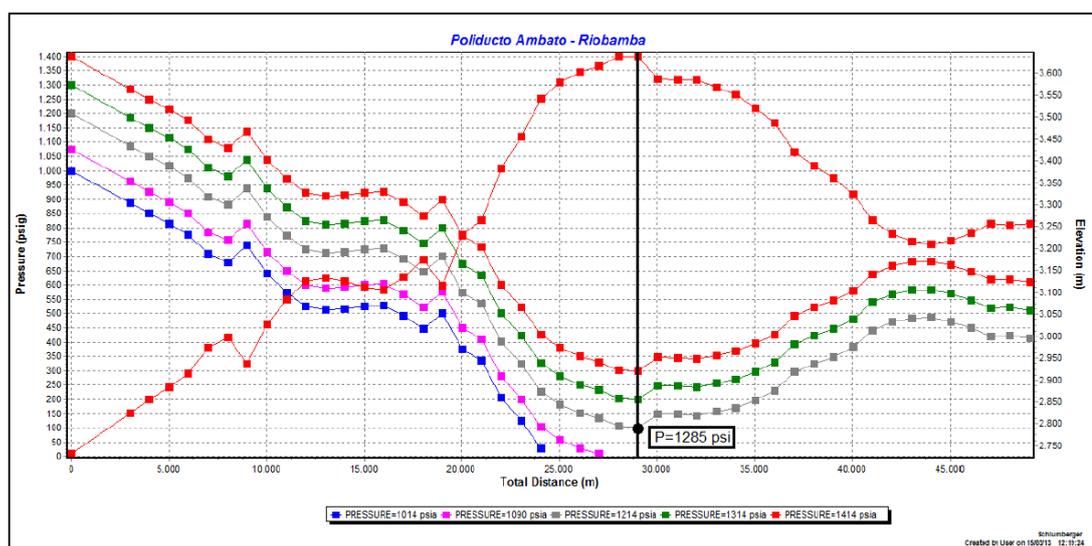


Figura 4. Perfil de presión para la Gasolina Extra.

Fuente: (CONSPECCIME, 2013)

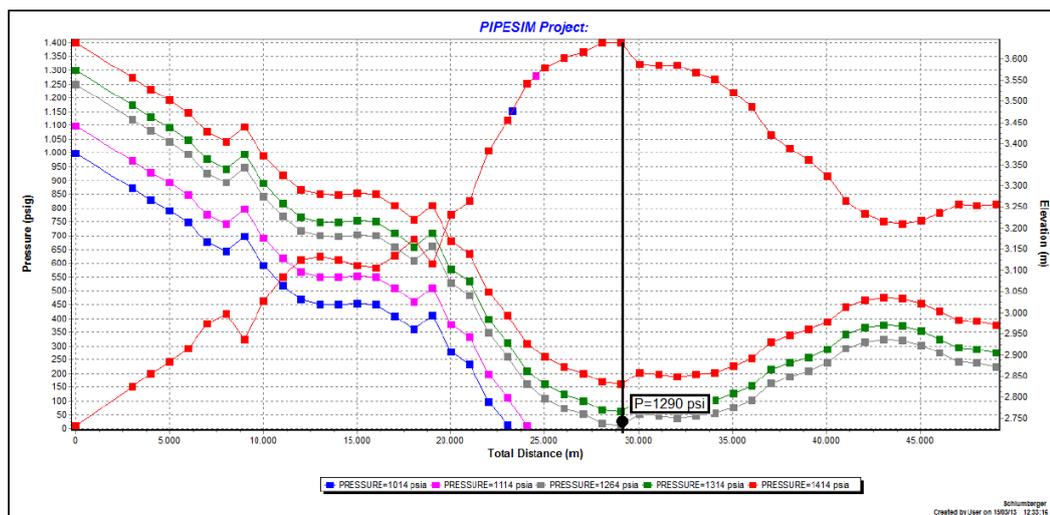


Figura 5. Perfil de presión para la Gasolina Súper.

Fuente: (CONSPECCIME, 2013)

2.1.1 PRODUCTOS LIMPIOS

Los productos limpios, llamados así por las comercializadoras de combustibles como una convención en el ámbito de los hidrocarburos, no son nada más que los combustibles refinados de petróleo, que serán transportados mediante el poliducto, es decir, las gasolinas Extra y Súper; y Diésel Premium.

2.1.2 SISTEMA DE BOMBEO REDUNDANTE



Figura 6. SKID de bombeo redundante.

La estación de bombeo de Ambato cuenta con un sistema de dos bombas que trabajan en paralelo, llamado este un sistema redundante; en dicho sistema, cuando una de las bombas deja de funcionar por fallas en la misma, por mantenimiento programado o por factores externos dañinos a la misma, la segunda bomba entra en operación; de esta manera, el poliducto podrá operar en todo momento.

2.2 DESCRIPCIÓN DEL SKID DE BOMBEO



Figura 7. SKID de bombeo. Bomba centrífuga.

La estación de bombeo Ambato es la que recibe el combustible limpio del poliducto Quito-Ambato a una presión normal de 2068 kPa (300 psi) y es la encargada de rebombear este producto a través del poliducto Ambato-Riobamba a una presión normal de aproximadamente 10480 kPa (1520 psi) para el Diésel Premium, 8860 kPa (1285 psi) para Gasolina Extra y para la Gasolina Súper es de 8894 kPa (1290 psi). El SKID de bombeo está conformado por dos bombas centrífugas instaladas en paralelo. Cada bomba consta con su propio tren de funcionamiento, es decir, existen dos sistemas de válvulas y tuberías que permiten el funcionamiento independiente de cada bomba según se requiera. Dichos trenes constan de válvulas motorizadas MOV encargadas de alinear el sistema y válvulas de alivio PSV que liberarán

el exceso de presión en un punto de seteo, además para labores de monitoreo y control del proceso, se tienen instrumentos de medición de presión, temperatura y flujo. Las bombas centrífugas constan de instrumentos independientes del proceso que nos permiten medir temperatura, presión y vibración propias del conjunto bombas con la finalidad de visualizar si estas funcionan correctamente.

2.2.1 BOMBAS

Existen dos bombas centrífugas, las cuales generan las condiciones necesarias de presión y caudal capaces de transportar los derivados de petróleo desde la estación Ambato hasta el terminal Riobamba a través del poliducto en una distancia de 50 kilómetros.

Especificaciones técnicas de la bomba, (Flowserve Corporation, 2010) (ver anexo 2):

Tipo: Bomba centrífuga de 14 etapas de flujo axial.

Capacidad= $0,022 \text{ m}^3 / \text{s}$ (350 GPM)

Altura Dinámica= 1278 m (4195 FT)

Presión de descarga= 12514 kPa (1815 PSI)

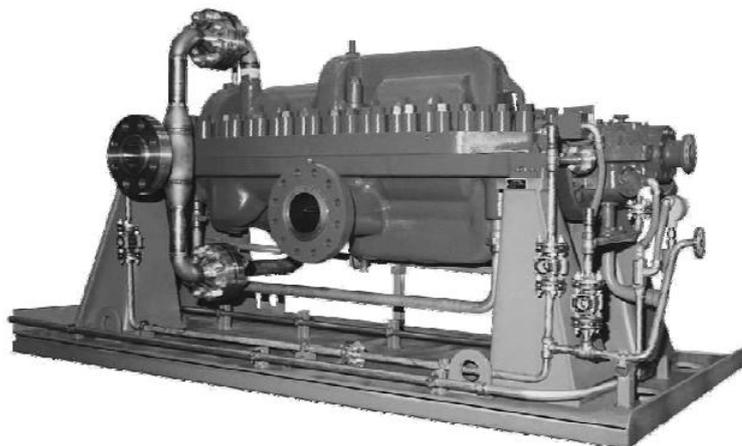


Figura 8. Bomba centrífuga.

Fuente: (Flowserve Corporation, 2010)

Especificaciones técnicas del motor eléctrico de inducción,
(Emerson Motor Company, 2010) (ver anexo 3):

Potencia= 600HP

Voltaje= 460VAC

Fases= 3

Frecuencia= 60Hz

Corriente nominal= 450 A

Corriente de arranque= 900 A

Tipo de arranque: Variador de frecuencia.

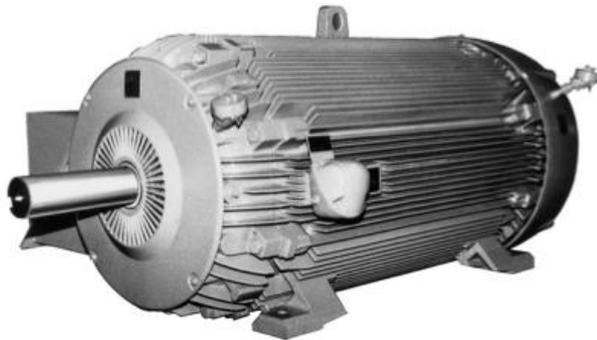


Figura 9. Motor eléctrico de inducción tipo jaula de ardilla.

Fuente: (Emerson Motor Technologies, 2010)

2.2.2 VÁLVULAS

Dentro del SKID de bombeo se utilizan dos válvulas MOV por cada tren: una de 6 pulgadas y con rango de control de apertura de 0% al 100% es la encargada de alinear el sistema para que el producto llegue a la succión de las bombas, y una de 4 pulgadas y con rango de control de apertura de 0% al 100% encargada de alinear el sistema para que el producto continúe el proceso después de la descarga de las bombas. Estas válvulas trabajarán solo en sus límites de operación, es decir, 0% y 100% apertura. Se utilizan un total de cuatro válvulas MOV.

Especificaciones técnicas del actuador eléctrico (FLOWSERVE, 2003):

Voltaje= 460 VAC trifásico.

Corriente= 1,5 A

Potencia= $\frac{3}{4}$ HP.

Torque= 705 Nm (520 lb.ft).

Tipo de encapsulado= Nema 3, 4, 4x, 6, IP68.

Tiempo de transición 90°= 23 seg



Figura 10. Actuador eléctrico.

Fuente: (FLOWSERVE, 2003)

Especificaciones técnicas de la válvula:

Diámetro= 4" – 6"

Clase: ASME/ANSI 900

Temperatura operativa= -46°C a 121°C

Tipo: válvula de bola.



Figura 11. Válvula de bola.

Fuente: (CAMERON, 2008)

De igual manera, se tiene una válvula PSV por cada tren para el alivio de presión ubicada a la descarga de cada bomba seteadas a un valor de 14479 kPa (2100 psi). Se utilizan un total de dos válvulas PSV.

Especificaciones técnicas:

Diámetro de entrada= 1" NPT

Diámetro de salida= 1" NPT

Clase: ASME/ANSI 900

Temperatura de operación= -40°C a 150 °C

Tipo de carga: Resorte



Figura 12. Válvula de seguridad de presión PSV.

Fuente: (LESER, 2014)

2.2.3 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN Y EQUIPOS

Dentro del SKID de bombeo se utilizan varios tipos de instrumentos de medición para el control los cuales son analógicos o digitales.

2.2.3.1 Presión

Como instrumentos de presión se utilizan dos indicadores de presión tipo Bourdon, PI, por cada tren ubicados uno en la succión y otro en la descarga de cada bomba. Los rangos de medición son 0-8273 kPa (0-1200 psi) y 0-20684 kPa (0-3000 psi) respectivamente. Se usan cuatro PI en total.

Características técnicas:

Tamaño de máscara: 3"

Presión= 20684 kPa (3000 psi).

Tipo de conexión: ½" NPT

Material: Carcasa de aluminio.

Fluido de llenado: glicerina



Figura 13. Indicador de presión tipo Bourdon.

Fuente: (Instrumentos WIKA, 2008)

Asimismo, existen dos indicadores-transmisores de presión, PIT, por cada tren ubicados en la succión y descarga de cada bomba con rangos de medición de 0-8237 kPa (0-1200 psi) y 0-13789 kPa (0-2000 psi) respectivamente. Se usan en total cuatro PIT.

Especificaciones técnicas (Rosemount, 2007):

Tipo de señal: 4 – 20 mA

Voltaje: 10 a 28 VDC

Precisión: 0,04% del span

Clase: ASME/ANSI 900

Conexión al proceso= ½" NPT

Clasificación: Para área explosiva



Figura 14. Indicador-transmisor de presión PIT.

Fuente: (Rosemount, 2007)

Dentro del conjunto bombas se encuentran en total cuatro transmisores de presión PT, los cuales miden la presión tanto en la brida de succión como en la brida de descarga de cada bomba.

Especificaciones técnicas (Foxboro, 2005):

Tipo de señal: 4 – 20 mA

Voltaje: 10 a 30 VDC.

Precisión: 0,025% del span

Clase: ASME/ANSI 900

Conexión al proceso= ½" NPT

Clasificación: Para área explosiva



Figura 15. Transmisor de presión PT.

Fuente: (Foxboro, 2005)

2.2.3.2 Temperatura

En el SKID de bombeo se utilizan dos indicadores-transmisores de temperatura en total: uno en la descarga de cada bomba con un rango de medición de 0°C - 100°C.

Especificaciones técnicas (Rosemount, 2014):

Tipo de señal: 4 – 20 mA.

Voltaje: 11 a 30 VDC

Precisión: 0,02% del span

Sensor: RTD (PT100) a 3 hilos.

Rango: -200°C A 850°C

Conexión al proceso: ½" NPT

Carcasa: Tipo nema 4X, protección IP 66, IP 68



Figura 16. Indicador-transmisor de temperatura TIT.

Fuente: (Rosemount, 2014)

Dentro del conjunto bombas, existen seis elementos primarios de temperatura TE por cada bomba, con un rango de 0°C - 100°C mediante los cuales se mide la temperatura de los rodamientos y del motor de las bombas centrífugas. Se utilizan en total doce TE.

Características técnicas:

Tipo: RTD

Rango= -50°C a 260°C

Presión: hasta 1379 kPa (200 psi).

Conexión: ½" NPT

Certificación: A prueba de explosiones



Figura 17. Sensor de temperatura RTD.

Fuente: (MINCO, 2014)

2.2.3.3 Vibración

Dentro del conjunto bomba, existen elementos primarios de vibración que están encargados de medir la vibración que produce todo el conjunto de bombas sobre su estructura de soporte.

Especificaciones técnicas:

Tipo de señal: 4 – 20 mA

Precisión: 2%

Respuesta de frecuencia: hasta 1500 Hz

Voltaje: 11 a 30 VDC

Temperatura de servicio: -40°C a 100°C



Figura 18. Sensor de vibración VE.

Fuente: (METRIX Instrument, 2004)

2.2.3.4 Switches

Existen en total cuatro switches de presión PS y cuatro switches de nivel LS.

Especificaciones técnicas de switch de nivel:

Conexión al proceso: ½" NPT

Switch= 5A a 125VAC.

Temperatura operativa: -40°C a 189 °C

Número de operaciones: 10.000.000

Presión de operación: 10342 kPa (1500 psi)

Carcasa: A prueba de explosiones

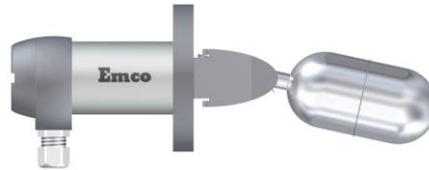


Figura 19. Switch de nivel.

Fuente: (WellMark CEMCO, 2002)

Especificaciones técnicas de switch de presión:

Conexión al proceso: ½" NPT

Switch= 3A a 125VAC.

Rango de presión: 6 – 49 kPa (1 a 26 psi).

Temperatura operativa: -40°C a 189 °C



Figura 20. Switch de presión PS.

Fuente: (Neo-Dyn, 2010)

2.2.3.5 Variador de Frecuencia

El variador de frecuencia, VFD, es un equipo electrónico mediante el cual se puede controlar la potencia eléctrica variando la frecuencia de la

corriente AC. Dentro del SKID de Bombeo es un equipo esencial ya que mediante éste se realizará el control de velocidad de cada bomba.

Especificaciones técnicas (Rockwell Automation, 2013):

Voltaje: 460 VAC – trifásico.

Corriente: 900 A.

Tecnología: rectificador de 6 pulsos.

Entradas analógicas: 2 AI. 4 – 20 mA.

Entradas digitales: 5 DI.

Comunicación: Modbus TCP/IP



Figura 21. Variador de frecuencia.

Fuente: (Allen Bradley, 2013)

2.2.4 SISTEMA DE TUBERÍAS

La tubería a lo largo de todo el poliducto está hecha de acero al carbono tipo API 5L x46. Soporta hasta 15306 kPa (2220 psi), clasificada como ANSI 900lb. La capacidad de la tubería desde Ambato hasta Riobamba es de 931,67 m^3 (246120 gal) de volumen.

La línea principal del proceso tiene un diámetro de 6 pulgadas en la succión de las bombas y de 4 pulgadas en la descarga de las mismas (ver anexo 1). Para el drenaje existen varias líneas de diferentes diámetros: la línea

principal es de 4 pulgadas, las líneas secundarias son de 2 pulgadas y los drenajes de las bombas son de $\frac{3}{4}$ pulgadas.

2.3 CONSIDERACIONES BÁSICAS PARA EL PROYECTO

Los productos limpios Gasolina Extra, Gasolina Súper y Diésel Premium son combustibles que se usan básicamente para el abastecimiento de automóviles. Las gasolinas son los primeros productos obtenidos del fraccionamiento del petróleo. Los elementos que presentan son un grupo de compuestos hidrocarbonados.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMBUSTIBLES.

De un informe de ensayo de control de calidad de los combustibles, realizado en el Terminal Beaterio de EP Petroecuador, se extraen las siguientes tablas con las características más relevantes sobre cada uno de los productos limpios:

Tabla 1.

Características Gasolina Extra

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
NÚMERO OCTANO RESEARCH	87,1	RON
DESTILACIÓN		
10%	55	°C
50%	105	°C
90%	168	°C
PUNTO FINAL	206	°C
RESIDUO	0,8	% VOL
RELACIÓN VAPOR/LOQUID A 60 °C	13	V/L
PRESIÓN DE VAPOR	50,89	kPa
CORROSIÓN LAM COBRE (3h y 50°C)	1a	CLASIF.
CONT. GOMAS	0,4	mg/100cm ³
CONT. AZUFRE	394	PPM
CONT. AROMÁTICOS	22,8	% VOL
CONT. BENCENO	0,68	% VOL
CONT. DE OLEFINAS	10,30	% VOL
ESTABILIDAD A LA OXIDAC.	> 240	min
CONTENIDO DE OXÍGENO	0,07	% PESO
CONTENIDO DE PLOMO	ND	mg/l
CONTENIDO DE MANGANESO	ND	mg/l
CONTENIDO DE HIERRO	ND	mg/l
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 60/60 °F	0,7416	
GRAVEDAD API, 60/60 °F	59,3	° API

Fuente: (EP Petroecuador, 2013)

Las características presentadas en las tablas muestran los valores obtenidos en un ensayo de laboratorio dentro de los estándares de calidad que maneja la empresa EP Petroecuador.

Tabla 2.
Características Gasolina Súper.

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
NÚMERO OCTANO RESEARCH	92,5	RON
DESTILACIÓN		
10%	53	°C
50%	102	°C
90%	172	°C
PUNTO FINAL	212	°C
RESIDUO	1	% VOL
RELACIÓN VAPOR/LOQUID A 60 °C	15	V/L
PRESIÓN DE VAPOR	51,21	kPa
CORROSIÓN LAM COBRE (3h y 50°C)	1a	CLASIF.
CONT. GOMAS	0,6	mg/100cm ³
CONT. AZUFRE	529	PPM
CONT. AROMÁTICOS	27	% VOL
CONT. BENCENO	0,77	% VOL
CONT. DE OLEFINAS	13,1	% VOL
ESTABILIDAD A LA OXIDAC.	> 240	min
CONTENIDO DE OXÍGENO	0,14	% PESO
CONTENIDO DE PLOMO	ND	mg/l
CONTENIDO DE MANGANESO	ND	mg/l
CONTENIDO DE HIERRO	ND	mg/l
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 60/60 °F	0,7459	
GRAVEDAD API, 60/60 °F	58,2	° API

Fuente: (EP Petroecuador, 2013)

Tabla 3.
Características Diésel Premium.

CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
PUNTO DE INFLAMACIÓN	75	°C
AGUA Y SEDIMENTO	< 0,05	%VOL
RESIDUO CARBONOSO SOBRE EL 10% DEL RESIDUO DE LA DESTILACIÓN	0,010	%PESO
CENIZAS	0,00	%PESO
DESTILACIÓN		
10%	210	°C
50%	264	°C
90%	330	°C
VISCOCIDAD CINEMÁTICA A 40.0 °C	2,8	mm ² /s
AZUFRE	0,0081	%PESO
CORROSIÓN LAM COBRE	1a	
INDICE DE CETANO CALCULADO	50	
GRAVEDAD ESPECÍFICA, 60/60 °F	0,8388	
DENSIDAD API, 60/60 °F	37,2	°API

Fuente: (EP Petroecuador, 2013)

2.3.2 CONCEPTOS DE SEGURIDAD PARA LA SELECCIÓN DE EQUIPOS E INSTRUMENTOS

Todos los equipos e instrumentos deben estar regidos según las normas de seguridad, acorde a la API 500 o API 505 de la “*American Petroleum Institute*”. O a su vez, deben estar correctamente clasificados según la norma NFPA 70 de la “*National Fire Protection Association*”.

Clasificación de áreas eléctricas con atmósfera peligrosa.

Cuando se pone en funcionamiento material eléctrico en un ambiente inflamable, todos los instrumentos y equipos deberán ser capaces de proporcionar la energía suficiente para no encender dicho ambiente. Es por esto que todos los equipos eléctricos/electrónicos dentro del proyecto deberán ser seleccionados acorde a la clasificación del área eléctrica. Esta puede ser clasificación por divisiones como lo regula la NEC (*National Electrical Code*) o por zonas, según la IEC (*International Electromechanical Commission*). A nivel sudamericano, la clasificación más utilizada dentro del sector hidrocarburífero es por divisiones; pero por pedido de EP Petroecuador, se realizará la clasificación de áreas eléctricas por divisiones y zonas.

2.3.2.1 Clasificación por divisiones

Para una adecuada selección del equipo e instrumentos que se instalarán en el presente proyecto, se requiere clasificar el área dentro de lugares donde exista presencia de vapores o líquidos inflamables, los cuales estén siendo producidos, procesados, manipulados o almacenados en condiciones normales o anormales de operación, con el fin de garantizar la seguridad de todo el personal e instalaciones.

Clasificación según el tipo de material Combustible

La NEC, en el artículo 500, clasifica el área según 3 categorías: Clase I, Clase II y Clase III.

2.3.2.1.1 Áreas Clase I

El material presente es gas o vapor inflamable. Esta área generalmente se asigna al sector hidrocarburífero. Las áreas de Clase I a su vez se subcategorizan en divisiones: Clase I División I, Clase I División II.

a) **Clase I, División 1:** Donde el material combustible está presente de manera formal o frecuente y además de encontrarse bajo las siguientes condiciones:

- i. Concentraciones de encendido de gases o vapores inflamables bajo condiciones normales de operación.
- ii. Concentraciones de encendido de gases o vapores inflamables que puedan existir frecuentemente a causa de fugas por reparaciones o mantenimiento.
- iii. Avería o imperfecto de equipo o proceso que pueda liberar concentraciones de encendido de gases o vapores inflamables, además de causar simultáneamente falla del equipo eléctrico.

b) **Clase I, División 2:** Área donde existe falla de equipo no frecuente o contenedores donde el material combustible está presente, además de encontrarse bajo las siguientes condiciones:

- i. Cuando líquidos volátiles o gases inflamables estén siendo procesados o manipulados, pero en donde los líquidos, vapores o gases estarán normalmente almacenados dentro de contenedores cerrados o sistemas cerrados, y solo en caso de una ruptura accidental puedan escapar, o en el caso de una operación anormal del equipo.
- ii. Cuando concentraciones de encendido de gases o vapores inflamables estén protegidas normalmente por una buena ventilación mecánica pero pueda llegar a ser peligrosa a causa de una operación anormal o falla de la ventilación.

- iii. El área división 2 es adyacente al área división 1, y depende de cuanta concentración de gases o vapores pueden resaltar de la fuente de riesgo proveniente de la división 1.

2.3.2.1.2 Áreas Clase II

El material combustible presente es polvo.

a) **Clase II, División 1:** áreas donde:

- i. Cuando exista o pueda existir la presencia de polvo combustible en suspensión en el aire de manera continua, intermitente o periódica, y en condiciones normales de funcionamiento exista cantidad suficiente de polvo combustible como para producir mezclas inflamables o explosivas.
- ii. Cuando el mal funcionamiento de la maquinaria o equipo o un fallo mecánico pudiera producir mezclas inflamables o explosivas y al mismo tiempo proporcionar una fuente de ignición por fallo del equipo eléctrico y mal funcionamiento de los equipos de protección.
- iii. Puedan estar presentes polvos de naturaleza conductora de electricidad.

b) **Clase II, División 2:** área donde el polvo combustible no se encuentra normalmente en suspensión en el aire o no aparece en funcionamiento normal del equipo o aparato y en cantidad suficiente para producir mezclas explosivas, además de encontrarse bajo las siguientes condiciones:

- i. Cuando los depósitos o acumulaciones de polvo combustible no pueden ser suficientes para perturbar la disipación de calor del equipo o aparato eléctrico.
- ii. Cuando los depósitos o acumulaciones de polvo combustible están en el interior o en la vecindad de un equipo eléctrico y este

no pueda ser inflamado por arcos, chispas o material ardiente de dicho equipo.

2.3.2.1.3 Áreas Clase III

El material combustible presente son fibras o volátiles inflamables

- a) **Clase III, División 1:** áreas donde se fabriquen, manipulen o usen fibras fácilmente inflamables o materiales que produzcan volátiles combustibles.

2.3.2.2 Consideraciones para la clasificación de áreas peligrosas por divisiones

Dentro de la clasificación de áreas se deben considerar unos factores adicionales tales como la extensión del área hacia otras áreas adyacentes y también la ventilación dentro del área.

2.3.2.2.1 Ventilación de un espacio

Un área puede ser clasificada como División 1, 2 e incluso no clasificada según el grado de ventilación que tenga. En el caso de que se provea ventilación en un área con el fin de catalogarla como un área no clasificada, por ningún motivo podrá ser en un área donde se manejen hidrocarburos.

Ventilación adecuada se considera a aquella que permita prevenir la acumulación de cantidades significativas de mezclas de vapor combustible – aire en concentraciones por debajo del 25% de sus límites bajos de inflamabilidad, de acuerdo con la NFPA 30, o también cuando se tenga un promedio de cuatro cambios del volumen total de aire del cuarto o instalación por hora.

Todas las áreas deben estar totalmente ventiladas en especial cuando hay mucha concentración. Si las mezclas son pesadas se deberá

tener cuidado con las áreas del piso. Por otro lado, si las mezclas son livianas, se tendrá especial cuidado con las áreas superiores.

2.3.2.2.2 Extensión del área clasificada

Se debe clasificar un área solamente cuando se requiera para el diseño, selección e instalación de material y equipos eléctricos.

El volumen, temperatura y volatilidad del líquido o gas de descargo, la naturaleza de la fuga, el promedio de descargo son de extrema importancia en la determinación de la extensión del área clasificada.

2.3.2.2.3 Clasificación de accesorios

Equipos de proceso de venteo

Este criterio afecta la extensión del área clasificada alrededor de válvulas de alivio dentro de una zona no encerrada y debidamente ventilada. Se mantendrá como División 1 una distancia de 1.5 m alrededor de la boquilla de la tubería de venteo. Además, se mantendrá como División 2, 1.5 m después del término de la División 1. Estos equipos de venteo se instalan cuando se guardan materiales en contenedores bajo presión atmosférica y liberen vapores. Junto al SKID de bombeo se encuentra el tanque sumidero EA-TSU-002 (ver anexo 1. Implantación Estación Ambato) que trabajará bajo estas condiciones por lo que tendrá instalada una tubería de venteo.

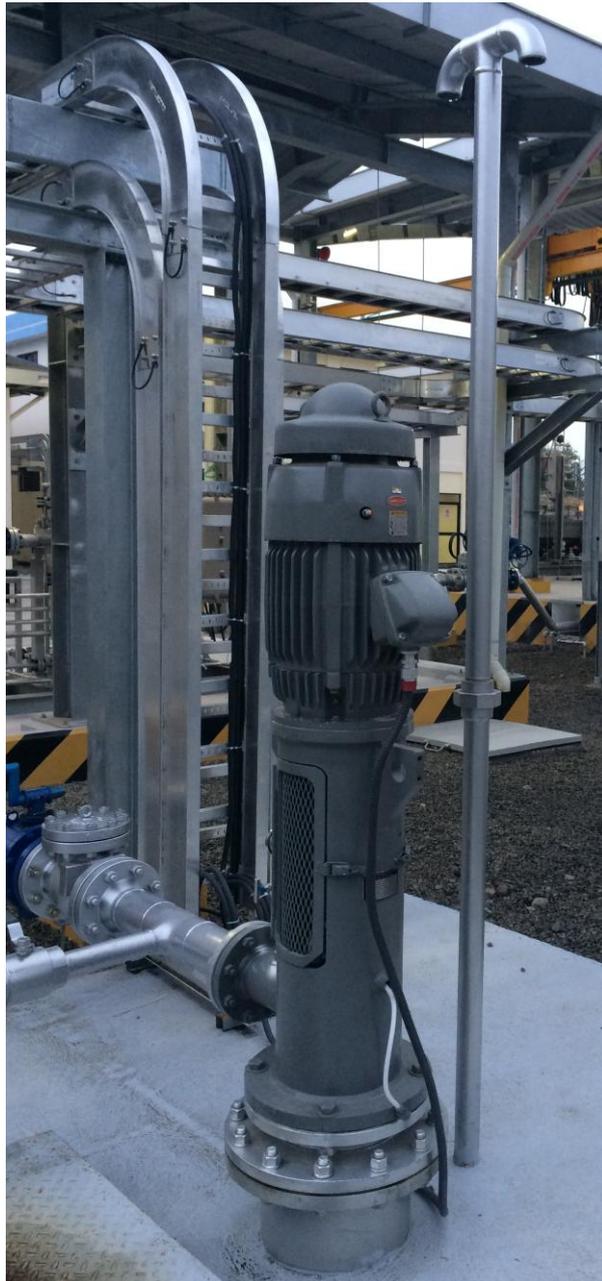


Figura 22. Tanque sumidero. Tubería de venteo.

Conexiones Atornilladas, Bridas, Válvulas, Actuadores.

Según la sección 10.15 de la API 500, se sugiere que se extienda el área clasificada a todas las válvulas que están en un sistema cerrado de tuberías. Para válvulas de venteo se considera como División 2 hasta un radio de 3m a partir de la boca de salida de la válvula.

Para áreas no encerradas y adecuadamente ventiladas, si se tiene conexiones atornilladas, bridas, válvulas o actuadores, el área alrededor no será clasificada mientras que para áreas no ventiladas adecuadamente, el área alrededor se considerará División 1.

Actuadores

Según la sección 10.15.4.1 de la API 500, si estos equipos usan aire, gas o líquido no inflamable se considerará como un área no clasificada. En el caso de usar material inflamable, los actuadores deberán ser clasificados según el área donde se los vaya a instalar.

2.3.2.3 Determinación del grupo

Para poder seleccionar un equipo de manera adecuada, es necesario ubicar las mezclas inflamables dentro de un grupo.

Las sustancias más relevantes dentro de cada grupo son los siguientes.

Grupo A.- Acetileno y aplica a selecciones del Grupo B y C.

Grupo B.- Hidrógeno.

Grupo C.- Etileno, Ethil y Ether.

Grupo D.- Propano, Acetona Benceno y Gasolina.

Para Áreas de Clasificación II se tiene los grupos E, F, G utilizado para los siguientes compuestos.

Grupo E.- Aluminio, magnesio o aleaciones.

Grupo F.- Carbón y Coque

Grupo G.- Harina, granos, madera, plástico y químicos.

2.3.3 SISTEMAS DE CONTROL

Un sistema de control es un conjunto de componentes relacionados entre sí, de manera que de forma automática e independiente (sin intervención

de agentes externos) puedan regular o dirigir su actuación corrigiendo el error respecto a una variable deseada.

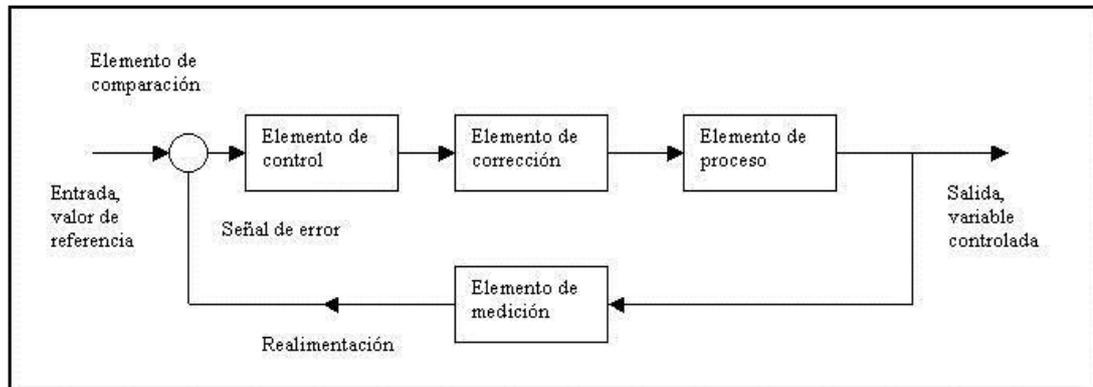


Figura 23. Diagrama de control general.

Fuente: (Bahon, 2004)

Como se puede ver en la Figura 23, los elementos del sistema de control son: el controlador, un elemento de corrección, el elemento de proceso también conocido como planta y el elemento de medición o sensores.

El controlador o elemento de control, después de recibir el valor de comparación, es el que envía la variable de control hacia el actuador o elemento de corrección.

2.3.3.1 Métodos de control

Existen varios métodos de control que se pueden definir teóricamente de los cuales los más comunes y utilizados a nivel industrial son los controladores clásicos proporcional (P), derivativo (D) e integral (I).

Es importante tener clara la acción que ejerce cada una de ellas para poder hacer una correcta elección de un controlador combinado entre sí. A nivel industrial, los controladores más comúnmente implementados son PI y PID.

Controlador P

Muchos procesos brindan la posibilidad de trabajar con una ganancia elevada sin tener ningún problema de estabilidad en el controlador. Dentro de este tipo de controlador caen los procesos que poseen una constante de tiempo dominante.

La función de transferencia en el dominio de la frecuencia es:

$$G_c(s) = k_p$$

Controlador PD

Este controlador es aplicable a procesos que incorporan un integrador como por ejemplo un proceso térmico con buen aislamiento, este funciona análogo a un integrador. Las pérdidas son consideradas despreciables y por lo tanto se asume que toda la energía es ocupada en elevar la temperatura. Además, en este tipo de procesos es factible trabajar con ganancias elevadas. Por otro lado, en procesos que tengan tiempos muertos muy grandes, la acción anticipativa del término derivativo deja de ser efectiva.

La función de transferencia en el dominio de la frecuencia es:

$$G_c(s) = k_p + k_d * s$$

Controlador PI

La inclusión de la acción integral es la mejor forma de eliminar el error en el régimen permanente. Es recomendable implementar este controlador cuando el proceso presenta retardos. Además, para procesos donde se introduce un desfase moderado es recomendable usar el controlador PI ya que el controlar PD amplifica el ruido.

La función de transferencia del controlador PI en el dominio de la frecuencia es:

$$G_c(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

Controlador PID

Este controlador es normalmente usado en procesos que no poseen grandes retardos pero si grandes desfases. Añadir la acción derivativa a un controlador PI permite aumentar las acciones proporcional e integral.

La función de transferencia de este controlador en el dominio de la frecuencia es:

$$G_C(s) = k_p + k_d * s + \frac{k_i}{s}$$

2.3.3.2 Elemento de corrección para el proceso

Existen varias técnicas para realizar el control de velocidad en un motor que para este caso en particular, permite el control de flujo en una bomba. Las soluciones a este problema requieren de un driver o también conocido como elemento de corrección dentro de un lazo de control como por ejemplo un variador de frecuencia.

El control de velocidad requerido básicamente es aplicar un control de potencia sobre el motor por lo que se puede aplicar cualquiera de las técnicas como por ejemplo mediante PWM que es el control mediante pulsos donde se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica, un dimmer que es el control de la señal AC mediante el recorte de la señal en el momento de la subida, un variador de frecuencia etc.

Debido a la extensa información que existe sobre variadores de frecuencia y a la gran aplicación que tienen estos equipos para este caso en particular, se convierte en la opción más adaptable a nuestro sistema, basado en los fundamentos teóricos de los motores asíncronos, como es el caso de las bombas que se utilizan en el SKID de bombeo.

Los motores asíncronos requieren de corriente alterna, la cual al circular por los bobinados del estator, genera un campo electromagnético que induce corriente en el rotor produciendo el par de torsión capaz de mover el eje del motor.

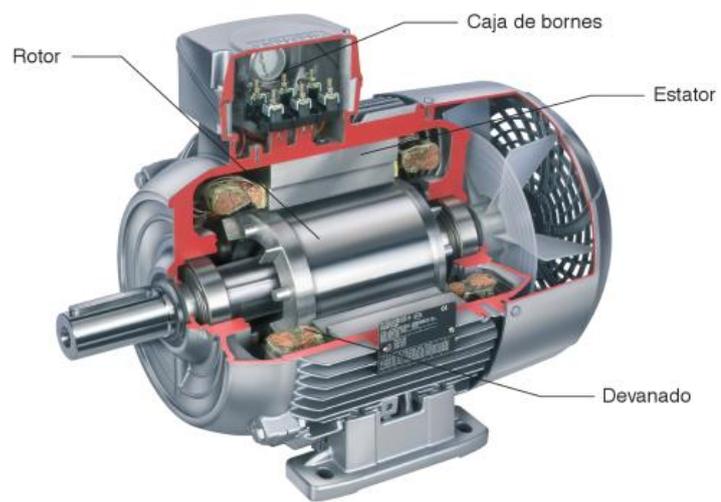


Figura 24. Motor asíncrono. Partes

Fuente: (Martín, 2009)

CAPITULO III

CONFIGURACIÓN DE INSTRUMENTOS Y EQUIPOS.

El primer paso para el diseño de un sistema de control es definir los instrumentos y equipos necesarios y suficientes para cumplir el objetivo que es controlar la variable del proceso que es la presión de descarga.

Para facilitar el estudio de los principales parámetros aplicado al SKID de bombeo del Poliducto Ambato – Riobamba se ha separado el análisis de los instrumentos y los equipos.

3.1 DIVISIÓN DE EQUIPOS

Los equipos que se necesitan para el desarrollo del proyecto son los siguientes.

3.1.1 MECÁNICOS

Los equipos mecánicos que se necesitan son los siguientes:

- Válvulas de seguridad PSV.
- Válvulas de bola.
- Válvulas de galleta.
- Válvulas de bloqueo y purga.
- Bomba centrífuga.

Los equipos antes mencionados serán provistos por el área mecánica del proyecto, por lo tanto, no es necesario realizar alguna selección y especificación. Ver anexo 8 para más información.

3.1.2 ELÉCTRICOS

Los equipos eléctricos que se requieren son:

- Variador de Frecuencia.

- Filtro para distorsión de armónicos.
- Centro de control de motores.
- Breaker motorizado.
- Motores eléctricos

De esta sección, los equipos que serán seleccionados por los autores del proyecto son: el variador de frecuencia y el filtro para distorsión de armónicos. Para más información, ver anexo 8.

3.1.3 ELECTRÓNICOS

Los equipos electrónicos necesarios son:

- Transmisor-indicador de presión.
- Transmisor-indicador de temperatura.
- Actuadores para válvulas.
- Controlador PAC de Foxboro.
- Servidores y Estaciones de trabajo

El controlador PAC será provisto por EP Petroecuador. Los demás ítems son especificados en las secciones siguientes. Ver anexo 8 para más información.

3.2 INSTRUMENTACIÓN

Debido a que este proyecto consiste en bombear combustible a través de tubería, las variables más importantes y que deben ser monitoreadas son las presiones de la bomba.

Se requiere medir la presión de succión y descarga en cada stream. Es importante conocer en primer lugar la presión de succión para poder saber si se cumple el mínimo requerido para el correcto funcionamiento de la bomba y en segundo lugar debemos leer la presión de descarga que es la que nos

indica si podemos sobrepasar el punto más alto del poliducto logrando así que se reciba el combustible en el terminal de Riobamba. Esta presión de descarga será la variable de control.

3.2.1 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

El cliente final, **EP Petroecuador**, después de largos años y proyectos, ha trabajado con diversas marcas en todos sus equipos e instrumentos, las cuales han ido generando confianza debido a su buen funcionamiento. EP Petroecuador ha definido los requerimientos de marcas para la siguiente instrumentación para el presente proyecto:

- Manómetros: **Ashcroft o Wika.**
- Transmisores de presión: **Rosemount.**
- Transmisores de temperatura: **Rosemount.**

3.2.2 CONDICIONES GENERALES

Debido a que se conoce la clase de la tubería, se puede definir cuál es la presión máxima que puede soportar la tubería, y por lo tanto cual es la presión mínima que deben soportar los instrumentos instalados en campo. Tanto la succión como la descarga son clase ANSI 900lb, por lo tanto soportan una presión hasta 15306 kPa (2220 psi) a una temperatura de proceso para el poliducto de aproximadamente de 22°C.

3.2.3 CLASIFICACIÓN DE SEGURIDAD

Como se analizó en la sección 2.3.2.1; la clasificación de zona obedece a la clase I, división 1 y al grupo D según se revisó en la sección 2.3.2.3 (ver anexo 1 – Clasificación de área).

3.2.4 MANÓMETROS

Se requieren en total cuatro manómetros: un para medir la presión de succión y uno para medir la presión de descarga por cada uno de los dos grupos de bombeo.

3.2.4.1 Condiciones de proceso en la succión

Según las curvas de la bomba proporcionadas por el fabricante, la presión mínima requerida para que exista una operación segura es de 276 kPa (40 psi).

Según el estudio de proceso (CONSPECCIME, 2013), la presión de succión en operación normal será aproximadamente de 2068 kPa (300 psi).

3.2.4.2 Condiciones de proceso en la descarga

De igual manera se puede encontrar en el estudio del proceso (CONSPECCIME, 2013), los valores de presión a la descarga de los grupos de bombeo para cada producto:

- Gasolina extra y súper: aproximadamente 8860 kPa (1285 psi).
- Diésel Premium: aproximadamente 10480 kPa (1520 psi).

Estas presiones son valores teóricos, sin embargo, nos ayudarán a poder dimensionar los instrumentos en su rango y calibración.

La temperatura normal del proceso será de 22°C aproximadamente.

3.2.4.3 Rango de calibración

Tomando en cuenta las condiciones de proceso indicadas en los puntos anteriores, se determina que los manómetros deberán tener el siguiente rango:

- Succión: 0 – 4826 kPa (0 – 700 psi).
- Descarga: 0 – 13790 kPa (0 – 2200 psi).

3.2.4.4 Conexión al proceso

Todas las conexiones de los instrumentos serán instalados bajo el estándar ½ pulgada NPT.

3.2.4.5 Especificación

Después de definir los parámetros requeridos, y usando catálogos del fabricante (Ashcroft, 2013; WIKA, 2011) definimos los instrumentos a adquirir.

El manómetro ubicado en la succión de la bomba presenta las siguientes características según el *datasheet* del fabricante:

- Marca: Ashcroft
- TAG: PI 220A
- Ubicación: Bomba EA-B-220
- Servicio: Presión de succión.
- Tipo: Bourdon.
- Precisión: 1% del Span.
- Material del encapsulado: AISI 316L.
- Rango: 8273 kPa (0 – 1200 psi).
- Dial: 4 ½”
- Conexión al proceso: ½” – 14 NPT
- Grado de protección: IP 54

Para los demás manómetros requeridos se realizó el mismo procedimiento, dando como resultado la siguiente tabla:

Tabla 4.

Manómetros especificados

TAG	Ubicación	Servicio	Rango	Número de parte
PI 220A	EA-B-220	Presión de succión	0 – 1200 psi	451220SDO4L1200#
PI 220B	EA-B-220	Presión de descarga	0 – 3000 psi	233.5025300050
PI 221A	EA-B-221	Presión de succión	0 – 1200 psi	451220SDO4L1200#
PI 221B	EA-B-221	Presión de descarga	0 – 3000 psi	233.5025300050

3.2.5 TRANSMISORES INDICADORES DE PRESIÓN

Los transmisores de presión, básicamente se encuentran bajo los mismos requerimientos que los manómetros descritos en la sección 3.2.4 por lo que a continuación, solo se indicarán los valores.

Se requieren en total cuatro PIT: dos para la succión de cada bomba y dos para la descarga.

3.2.5.1 Condiciones de proceso en la succión

La presión de succión en operación normal será aproximadamente de 2068 kPa (300 psi).

3.2.5.2 Condiciones de proceso en la descarga

Los valores de presión a la descarga de los grupos de bombeo para cada producto:

- Gasolina extra y súper: aproximadamente 8860 kPa (1285 psi).
- Diésel Premium: aproximadamente 10480 kPa (1520 psi).

3.2.5.3 Rango de calibración

Los transmisores deberán tener el siguiente rango:

- Succión: 0 – 4826 kPa (0 – 700 psi).
- Descarga: 0 – 13790 kPa (0 – 2200 psi).

3.2.5.4 Conexión al proceso

Todas las conexiones de los instrumentos serán instalados bajo el estándar ½ pulgada NPT.

3.2.5.5 Requerimientos eléctricos – electrónicos

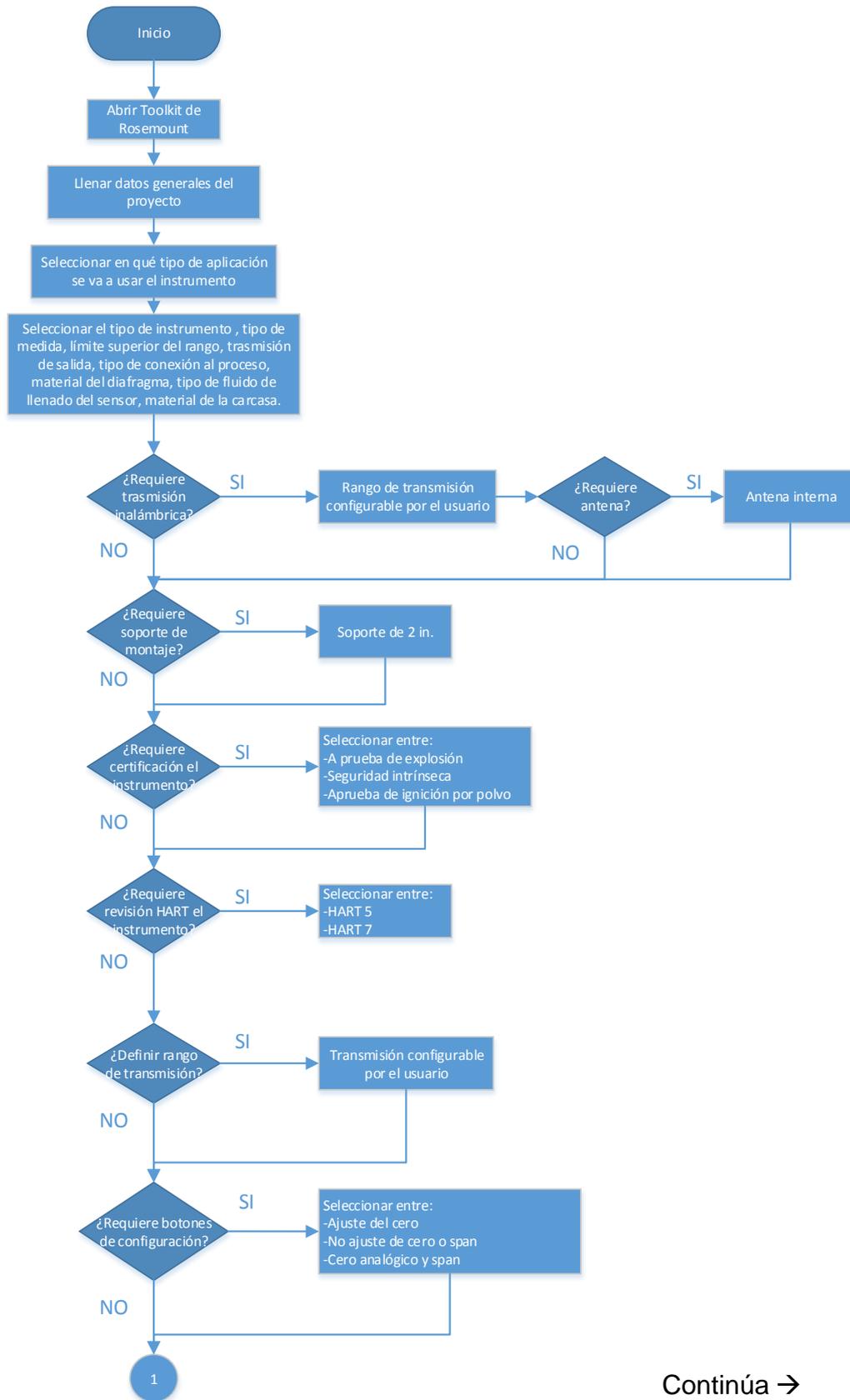
Los transmisores de presión deberán cumplir con las siguientes características:

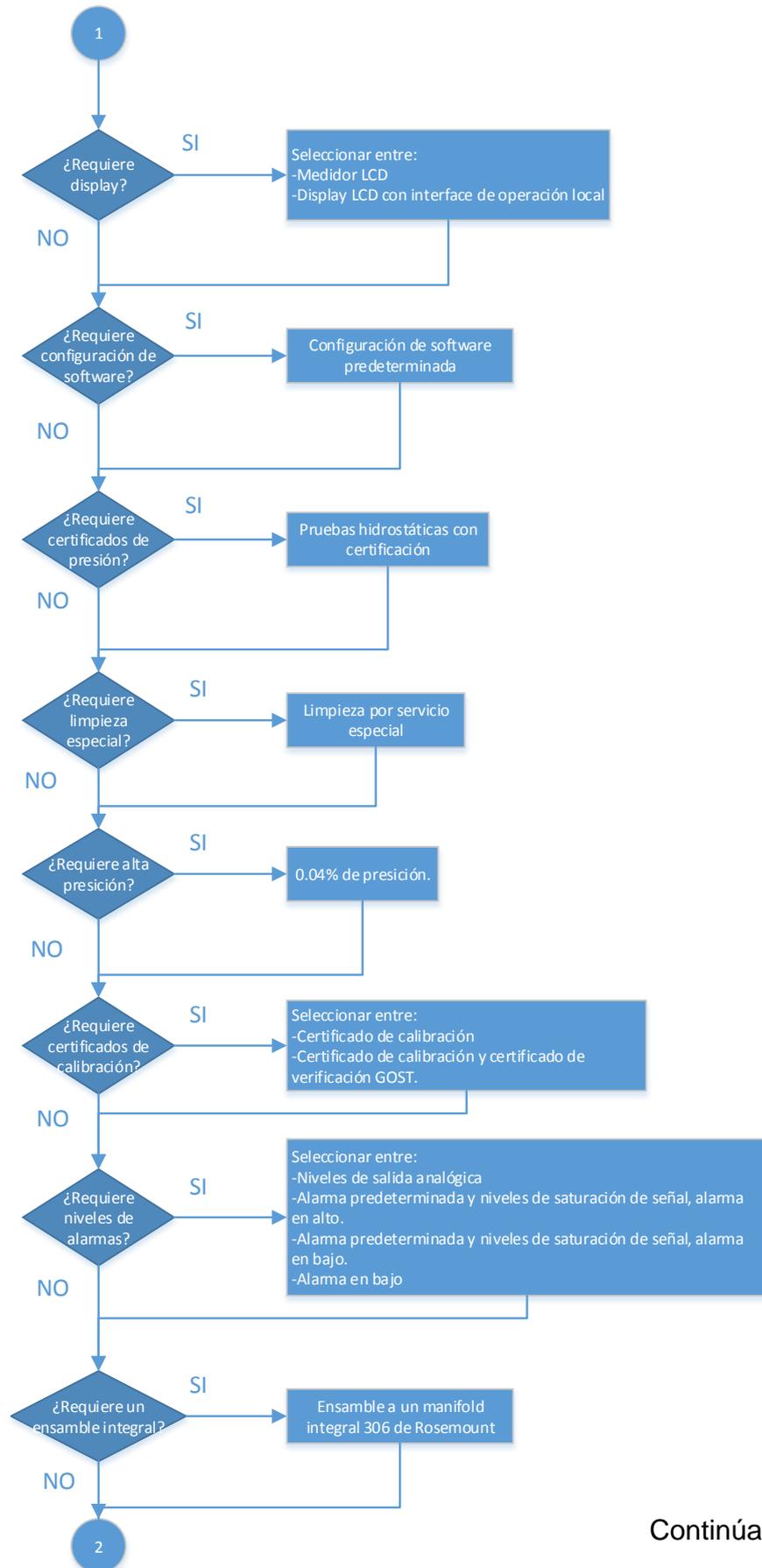
- Tipo de instrumento: Transmisor – indicador.
- Tipo de señal: 4 – 20 mA.
- Voltaje: 24 VDC

3.2.5.6 Especificación

Para la especificación de instrumentos transmisores – indicadores de presión se utiliza un software de la marca Rosemount denominado *Instrument Toolkit*. Este programa es gratuito y disponible para descarga en la página de la marca.

A continuación se presenta un diagrama de flujo que nos indica cómo utilizar el software para especificar instrumentos.





Continúa →

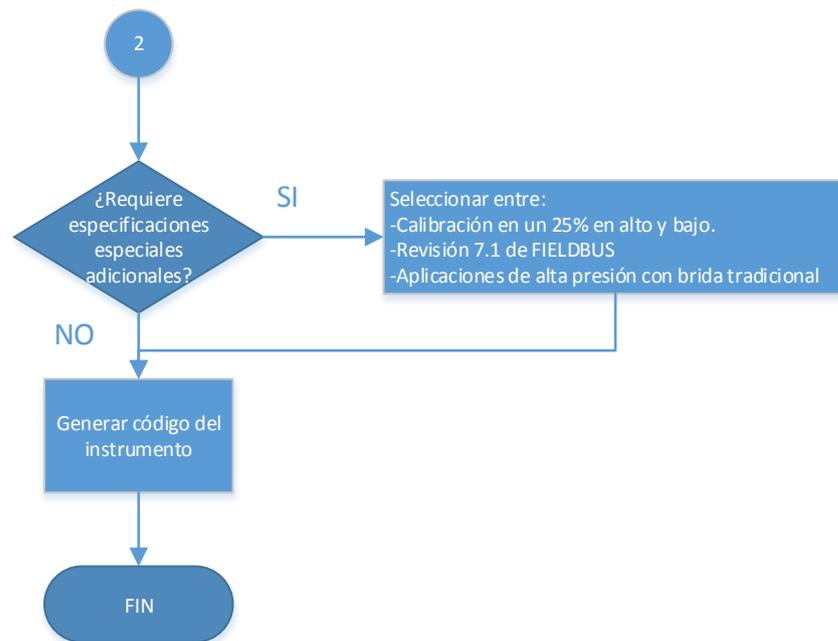


Figura 25. Especificación de transmisores de presión.

Después de culminar con el proceso de especificación del transmisor de presión, se obtiene el número de parte del instrumento y se genera el *datasheet*.

El transmisor ubicado en la descarga de la bomba presenta las siguientes características:

- Marca: Rosemount
- TAG: PIT 220B
- Ubicación: Bomba EA-B-220
- Servicio: Presión de descarga.
- Modelo: 3051T
- Tipo de sensor: Diafragma.
- Tipo de señal: 4 – 20 mA + HART.
- Voltaje: 10.5 – 42.4 VDC
- Precisión: 0.04% del span

- Material del encapsulado: Aluminio
- Rango: 15168 kPa (0 – 2200 psi).
- Display: Si
- Conexión al proceso: ½” – 14 NPT
- Grado de protección: IP 65.
- Protección contra explosiones: Si

Para los demás instrumentos, se sigue el mismo procedimiento mostrado en el diagrama de flujo, considerando los valores de diseño respectivos. Los números de parte de los instrumentos transmisores de presión obtenidos son los siguientes:

Tabla 5.

Números de parte de los instrumentos PIT de la sección de bombas

Instrumento	Ubicación	Número de parte
PIT 220A	EA-B-220	3051TG4A2B21AE5D4M5T1Q4S5QTHR5
PIT 220B	EA-B-220	3051TG4A2B21AE5D4M5T1Q4S5QTHR5
PIT 221A	EA-B-221	3051TG4A2B21AE5D4M5T1Q4S5QTHR5
PIT 221B	EA-B-221	3051TG4A2B21AE5D4M5T1Q4S5QTHR5

3.2.6 TRANSMISORES INDICADORES DE TEMPERATURA

Se instalarán dos transmisores de temperatura; uno a la descarga de cada bomba con la finalidad de tener siempre la medida de temperatura del fluido que circula

3.2.6.1 Condiciones de proceso

La presión de descarga de las bombas se comporta según el fluido que circula por la tubería, sin embargo, se dimensionará el transmisor de temperatura para que soporte como mínimo, la presión máxima de la tubería según su clase, es decir 15306 kPa (2220 psi).

La temperatura del fluido a través de la tubería, se estima que sea de aproximadamente 22°C.

3.2.6.2 Rango de calibración

Debido a que no existen cambios excesivos de temperatura en el fluido, el rango de los transmisores será de 0 - 100°C.

3.2.6.3 Conexión al proceso

Todas las conexiones de los instrumentos serán instalados bajo el estándar ½ pulgada NPT.

3.2.6.4 Requerimientos eléctricos – electrónicos

Los transmisores de presión deberán cumplir con las siguientes características:

- Tipo de instrumento: Transmisor – indicador.
- Tipo de señal: 4 – 20 mA.
- Voltaje: 24 VDC

3.2.6.5 Especificación

Para la especificación de instrumentos transmisores – indicadores de temperatura, de igual forma se utiliza un software de la marca Rosemount denominado *Instrument Toolkit*. Este programa es gratuito y disponible para descarga en la página de la marca.

A continuación se presenta un diagrama de flujo que nos indica cómo utilizar el software para especificar instrumentos.

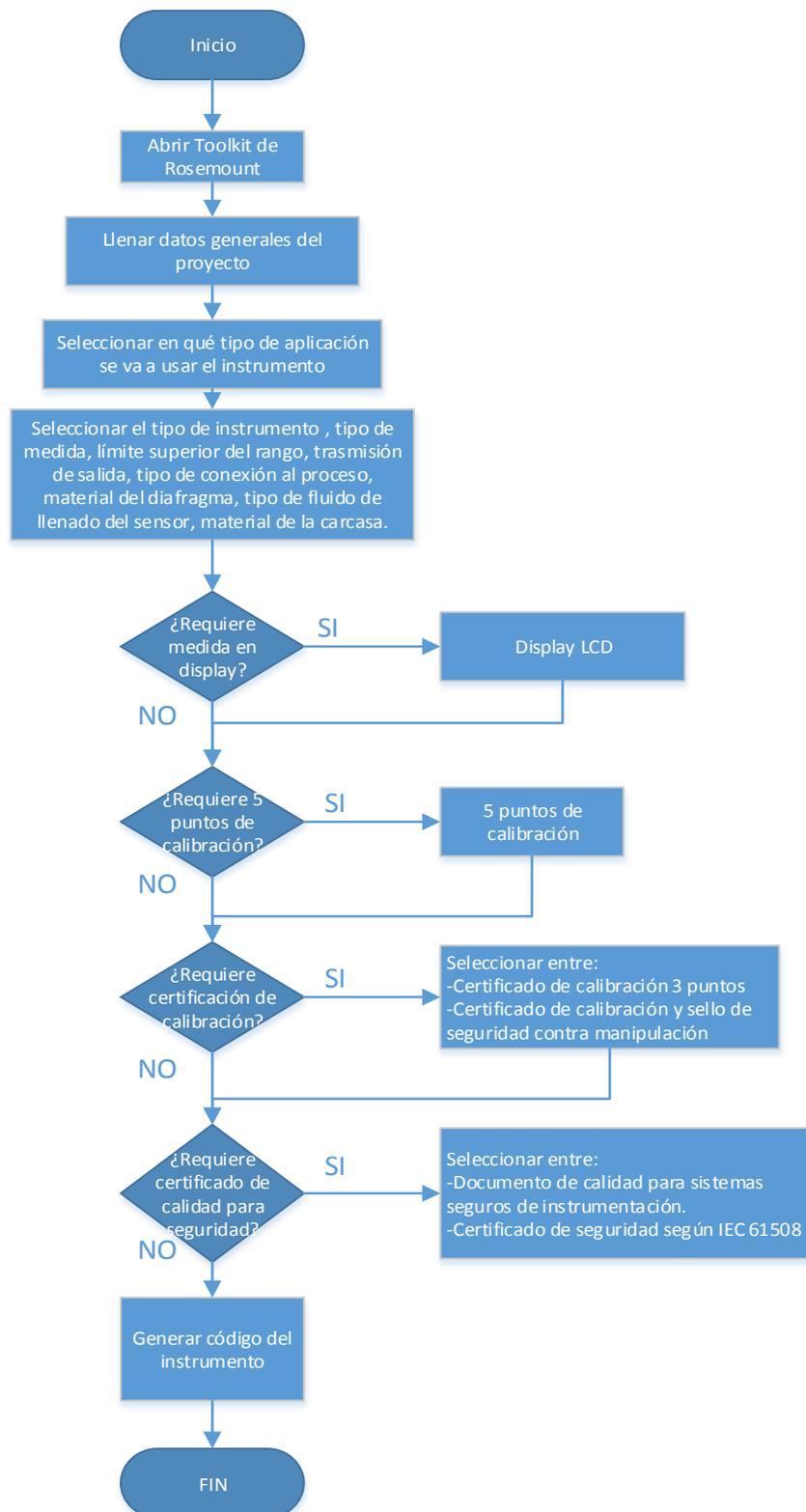


Figura 26. Especificación de transmisores de temperatura.

Después de culminar con el proceso de especificación del transmisor de temperatura, se obtiene el número de parte del instrumento y se genera el *datasheet*.

El transmisor ubicado en la descarga de la bomba presenta las siguientes características:

- Marca: Rosemount
- TAG: TIT 220B
- Ubicación: Bomba EA-B-220
- Servicio: Temperatura del fluido.
- Modelo: 3144
- Tipo de sensor: RTD (PT100).
- Tipo de señal: 4 – 20 mA.
- Voltaje: 11 – 30 VDC
- Precisión: 0.02% del span.
- Material del encapsulado: Aluminio
- Rango: 0 – 100°C
- Display: Si
- Conexión al proceso: ½” – 14 NPT
- Grado de protección: IP 65.
- Protección contra explosiones: Si

Para el siguiente instrumento, se sigue el mismo procedimiento mostrado en el diagrama de flujo para transmisores de temperatura, considerando los valores de diseño respectivos. Los números de parte de los instrumentos transmisores de temperatura obtenidos son los siguientes:

Tabla 6.

Números de parte de los instrumentos TIT de la sección de bombas

Instrumento	Ubicación	Número de parte
TIT 220B	EA-B-220	3144PD1A1E5M5G1C4Q4QTXA
TIT 221B	EA-B-221	3144PD1A1E5M5G1C4Q4QTXA

A continuación se muestra la lista final de instrumentos que serán instalados en el SKID de bombeo

Tabla 7.

Lista de instrumentos

Instrumento	Ubicación	Rango	Unidades
TIT 220B	EA-B-220	0 – 100	°C
TIT 221B	EA-B-221	0 – 100	°C
PIT 220A	EA-B-220	0 – 900	Psi
PIT 220B	EA-B-220	0 – 2200	Psi
PIT 221A	EA-B-221	0 – 900	Psi
PIT 221B	EA-B-221	0 – 2200	Psi
PI 220A	EA-B-220	0 – 1200	Psi
PI 220B	EA-B-220	0 – 3000	Psi
PI 221A	EA-B-221	0 – 1200	Psi
PI 221B	EA-B-221	0 – 3000	Psi
PS 220A	EA-B-220	0 – 1	N/A
PS 220B	EA-B-220	0 – 1	N/A
PT 220A	EA-B-220	10 – 250	Psi
PT 220B	EA-B-220	700 – 1500	Psi
TT 220A	EA-B-220	0 – 100	°C
TT 220B	EA-B-220	0 – 100	°C
TT 220C	EA-B-220	0 – 100	°C
TT 220D	EA-B-220	0 – 100	°C
TT 220E	EA-B-220	0 – 100	°C
TT 220F	EA-B-220	0 – 100	°C
TT 220G	EA-B-220	0 – 200	°C
TT 220H	EA-B-220	0 – 200	°C
TT 220I	EA-B-220	0 – 200	°C
LS 220A	EA-B-220	0 – 1	N/A
LS 220B	EA-B-220	0 – 1	N/A
VT 220A	EA-B-220	0 – 25	mm/s
VT 220B	EA-B-220	0 – 25	mm/s
PS 221A	EA-B-221	0 – 1	N/A
PS 221B	EA-B-221	0 – 1	N/A
PT 221A	EA-B-221	10 – 250	Psi
PT 221B	EA-B-221	700 – 1500	Psi
TT 221A	EA-B-221	0 – 100	°C
TT 221B	EA-B-221	0 – 100	°C
TT 221C	EA-B-221	0 – 100	°C
TT 221D	EA-B-221	0 – 100	°C
TT 221E	EA-B-221	0 – 100	°C

Continúa →

TT 221F	EA-B-221	0 – 100	°C
TT 221G	EA-B-221	0 – 200	°C
TT 221H	EA-B-221	0 – 200	°C
TT 221I	EA-B-221	0 – 200	°C
LS 221A	EA-B-220	0 – 1	N/A
LS 221B	EA-B-220	0 – 1	N/A
VT 221A	EA-B-220	0 – 25	mm/s
VT 221B	EA-B-220	0 – 25	mm/s

3.2.7 INSTALACIÓN DE INSTRUMENTOS

A continuación se describen los procedimientos de montaje para los instrumentos de presión y temperatura sobre la tubería de proceso.

3.2.7.1 Procedimiento de instalación de transmisor de presión

Para instalar el transmisor de presión se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Realizar una perforación de 1/2" sobre la tubería en el lugar donde se debe instalar el transmisor.
2. Soldar un threadolet de 1/2" en la perforación.
3. Instalar la válvula de bloqueo mecánico, esta es una válvula de bola de 1/2" operada manualmente en sitio.



Figura 27. Instalación de accesorios mecánicos.

4. Instalar la válvula "block & bleed" de 1/2" la cual permite realizar el bloqueo del producto hacia el instrumento y mediante la extracción de

un tornillo, se drena el producto restante de forma que se pueda realizar el mantenimiento del equipo sin peligro de derrames imprevistos.



Figura 28. Válvula de bloqueo y purga Rosemount.

5. Instalar el transmisor.



Figura 29. Instalación de accesorios mecánicos.

6. Conectar el cable armado de 2 pares número 16 AWG al instrumento usando el conector TMCX de ½”.



Figura 30. Conector TMCX.

Fuente: (Crouse - Hinds, 2012)



Figura 31. Cable armado 2Px16AWG. Apantallado.

7. Dentro del instrumento colocar terminales cerrados para los conductores número 16 AWG.
8. Finalmente conectar el par correspondiente en los terminales del transmisor.



Figura 32. Conexión de transmisor de presión.

Se debe considerar

- Tomar en cuenta que todos los accesorios y equipos deben soportar presiones de 41368 kPa (6000 psi).
- Verificar torques de ajuste recomendados para los equipos y accesorios instalados.
- Usar PTFE (teflón) para altas presiones en todas las uniones roscadas.
- Se debe tener cuidado en la instalación del TMCX ya que existe el riesgo de que se lastimen los conductores generando un corto circuito.

Para la instalación de los indicadores de presión, el procedimiento es exactamente el mismo obviando los puntos 6, 7 y 8.



Figura 33. PI y PIT montados en succión de bomba 220.



Figura 34. Montaje en derivación de PI y PIT en descarga de bomba 220.

3.2.7.2 Procedimiento de instalación de transmisor de temperatura

Para instalar el transmisor de temperatura se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Realizar una perforación de $\frac{1}{2}$ " sobre la tubería en el lugar donde se debe instalar el transmisor.
2. Soldar un threadolet de $\frac{1}{2}$ " en la perforación.



Figura 35. Threadolet de $\frac{1}{2}$ ".

3. Instalar el transmisor.

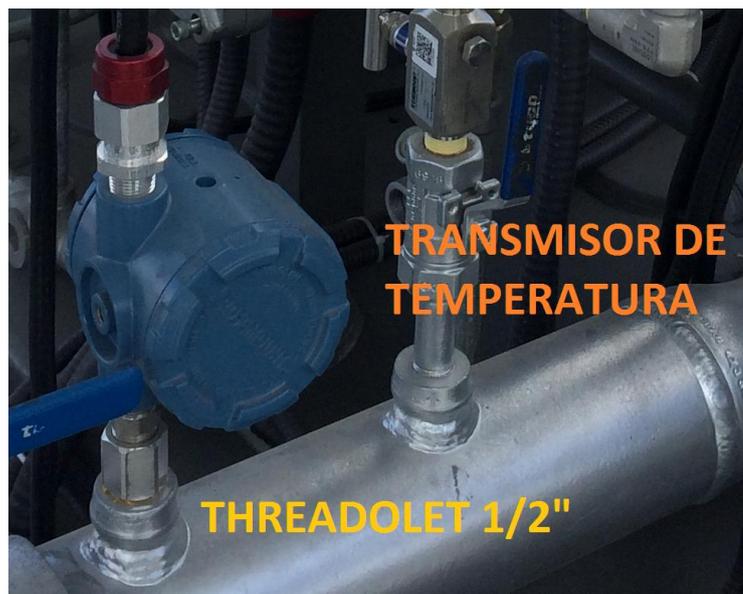


Figura 36. Instalación TIT en descarga de bomba 220.

4. Verificar la conexión de la triada a la RTD según el diagrama mostrado en la tapa del transmisor.

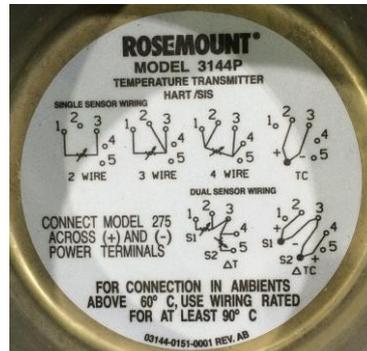


Figura 37. Configuraciones de conexión en TIT.

5. Conectar el cable armado de 2 pares número 16 AWG al instrumento usando el conector TMCX de 1/2".
6. Dentro del instrumento colocar terminales cerrados para los conductores número 16 AWG.
7. Finalmente conectar el par correspondiente en los terminales del transmisor.



Figura 38. Instalación completa TIT en descarga de bomba 220.

Se debe considerar

- Tomar en cuenta que todos los accesorios y equipos deben soportar presiones de 41368 kPa (6000 psi).
- Verificar torques de ajuste recomendados para los equipos y accesorios instalados.
- Usar PTFE (teflón) para altas presiones en todas las uniones roscadas.
- Se debe tener cuidado en la instalación del TMCX ya que existe el riesgo de que se lastimen los conductores generando un corto circuito.



Figura 39. Conexión de RTDs de los devanados del motor de la bomba 221.



Figura 40. Conexión de RTD de cojinete D.E. del motor de la bomba 221.

3.3 EQUIPOS

Debido a que el corazón del proyecto Poliducto Ambato – Riobamba son las bombas, se debe considerar un equipo para el control de las mismas. Dicho elemento que aplicará el control será un variador de frecuencia ya que por tratarse de un motor eléctrico de inducción, nos permite controlar la velocidad angular de una forma muy estable consiguiendo de esta forma el control de presión y caudal en la descarga de la bomba. Además se instalará un filtro RLC (ver anexo 8) por cada motor eléctrico con la finalidad de minimizar las corrientes parásitas y armónicos producidos por los motores eléctricos de las bombas logrando así poder proteger los equipos y alargar su vida útil.

Por otra parte, en cuanto al proceso se necesitarán válvulas motorizadas para alinear los dos trenes de funcionamiento.

3.3.1 REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE

El cliente final, EP Petroecuador debido a sus listas de proveedores calificados y en base a la experiencia laboral con las diferentes marcas del mercado ha solicitado las siguientes marcas para los equipos:

Válvulas motorizadas MOV: **Limitorque – Flowserve.**

VFD: **Allen Bradley – Rockwell Automation**

Filtros: **MTE Corp.**

Debido a que los equipos serán instalados en diferentes áreas del proyecto, las condiciones de proceso serán consideradas por separado.

3.3.2 VÁLVULAS MOTORIZADAS

Se instalarán 4 válvulas: una para la succión y otra para la descarga de cada bomba.

3.3.2.1 Requerimientos de proceso y localización

Las válvulas motorizadas MOV forman parte de la tubería por lo que se rigen a las condiciones de proceso indicadas en la sección 3.2.2 es decir, las válvulas tanto en la succión como en la descarga deberán ser categorizadas como ANSI 900. Las válvulas ubicadas en la succión serán de 6 pulgadas de diámetro y en la descarga serán de 4 pulgadas de diámetro. Además deberán brindar un funcionamiento normal con un caudal de $0,022 \text{ m}^3/\text{s}$ (350 gpm), sin embargo deberán soportar un flujo máximo de $0,036 \text{ m}^3/\text{s}$ (500 gpm) sin desgaste ni erosión de las paredes de la tubería cuando el poliducto se encuentre bombeando los productos limpios.

Debido a que las válvulas motorizadas están ubicadas a menos de 4 metros de distancia de una brida, es necesario que estos equipos sean a prueba de explosión (Explosion-Proof), así como todos los accesorios respectivos.

3.3.2.2 Funcionamiento

A continuación se analizan las opciones principales para seleccionar las válvulas motorizadas:

3.3.2.2.1 Tipo de válvula

Existen válvulas motorizadas que pueden ser del siguiente tipo:

- Compuerta
- Bola
- Lineales
- Pistón - Cremallera

Para una aplicación como el transporte de combustible por tubería, las válvulas más utilizadas son las de bola o de cuarto de vuelta ya que debido a su construcción mecánica ofrecen menor resistencia al paso del fluido reduciendo pérdidas de energía. Además debido a que el desplazamiento requerido para el cambio de estado de abierto a cerrado o viceversa es menor, el tiempo de transición requerido se reduce en comparación a los demás tipos de válvulas.

3.3.2.2.2 Modo de operación

El modo de operación puede ser:

- On-off
- Modulada

En el SKID de bombeo se requiere estrictamente válvulas de ON-OFF, es decir que funcionan solo en dos posiciones: 100% abierta y 100% cerrada ya que se necesita el alineamiento completo de uno de los trenes de funcionamiento para poder operar. No tendría sentido instalar válvulas que se pueda controlar un porcentaje de apertura por lo que se especificarán válvulas ON-OFF

3.3.2.2.3 Tiempo de operación

El tiempo de apertura y cierre de las válvulas no es un punto de extremo cuidado, sin embargo, en actuadores eléctricos se recomienda un tiempo de operación entre 25 y 40 segundos. Estos tiempos de operación no pueden ser modificados en actuadores eléctricos por lo que se deberá solicitar en fábrica la revisión de estos valores para no exceder a los límites recomendados.

3.3.2.2.4 Control y Comunicación

Las válvulas motorizadas deberán ser controladas de forma principal mediante comandos digitales (DO) enviados directamente del PLC del proceso. Además, éstas deberán proporcionar información adicional del estado de la válvula por lo que deberán manejar el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP, donde obtendremos estas variables.

3.3.2.3 Clasificación de seguridad

Para los equipos instalados en campo debemos tomar en cuenta la clasificación del área. Este aspecto es aplicado solo a las válvulas motorizadas las cuales deberán estar especificadas al menos para un área clase I, división 1, grupo D.

3.3.2.4 Especificación

La marca LIMITORQUE ofrece dos líneas de actuadores denominadas MX (multi-turn) y QX (quarter-turn). En el ámbito industrial a nivel nacional, EP Petroecuador no ha trabajado con la línea QX ya que es un producto relativamente nuevo por lo que los actuadores para válvulas que seleccionaremos serán de la línea MX. Dentro de esta línea se diferencian los diferentes modelos por su tamaño y su capacidad de carga como se indica en la figura:

MX-05		MX-10		MX-20		MX-40		MX-85		MX-140	
Torque de salida nominal											
libras-pie	N m	libras-pie	N m	libras-pie	N m	libras-pie	N m	libras-pie	N m	libras-pie	N m
55	75	125	170	225	305	440	597	N/A	N/A	N/A	N/A
55	75	125	170	225	305	440	597	850	1153	1500	2036
55	75	125	170	225	305	440	597	1225	1662	1700	2307
55	75	125	170	225	305	440	597	1150	1561	1600	2171
48	65	107	145	178	241	345	468	850	1153	1200	1628
39	53	89	121	148	201	286	388	600	814	739	1003
41	56	89	121	140	190	260	353	450	611	650	882
34	46	73	99	114	155	210	285	N/A	N/A	N/A	N/A

Figura 41. Tamaño y capacidad de carga de modelo MX de válvulas limitorque.

Fuente: (FLOWERVE, 2003)

Debido a las presiones que se van a manejar en la succión y la descarga de las bombas no es requerido un actuador de gran capacidad por lo que para los trenes de succión se especificarán actuadores MX-05 que son los de menor capacidad y para las válvulas de la descarga, se especificarán actuadores MX-10. Las válvulas de succión serán 6x900, es decir, diámetro de 6 pulgadas y ANSI900 mientras que las válvulas de descarga serán 4x900.

Para el aspecto de comunicación de estas válvulas la marca LIMITORQUE brinda una solución sencilla mediante un nuevo equipo denominado estación maestra (Master Station). Se adquirirá este equipo mediante el cual las válvulas del SKID de bombeo serán parte de una red de Modbus en anillo (ver anexo 1 – Red de comunicación de válvulas) que nos permitirán operar las válvulas remotamente, a la vez que se visualizarán datos adicionales como torque, porcentaje de apertura, alarmas, etc.

3.3.3 VARIADORES DE FRECUENCIA

3.3.3.1 Requerimientos de proceso y localización

Los VFD y filtros deberán cumplir con los parámetros eléctricos que requieren los motores de las bombas. Estos requerimientos son:

Potencia= 600HP

Voltaje= 460VAC

Amperaje= 627A

Fases= 3

Frecuencia= 0 - 60Hz

En cuanto a la ubicación de estos equipos en el proyecto, los variadores de frecuencia y filtros deberán ser instalados en un cuarto cerrado lejos del área clasificada por lo que no se requiere un grado de protección para exteriores ni un encapsulado (enclosure) a prueba de explosiones (Explosion-Proof).

3.3.3.2 Control y Comunicación

El variador de frecuencia deberá proporcionar varias vías de comunicación para realizar el control de los motores. Estos son:

- Señal analógica. Los VFD deberán tener una entrada analógica mediante la cual controlaremos el rango de 30-60 Hz enviando una señal analógica (AO) desde el PLC en el estándar 4-20 mA. Se dispondrá de cableado en duro para esta señal.
- Señal digital. Se deberá disponer de por lo menos dos entradas digitales mediando las cuales podremos arrancar y parar los variadores enviando comandos digitales (DO) desde el PLC del proceso. Se dispondrá de cableado en duro para estas señales.
- Señal de comunicación. Mediante el protocolo MODBUS TCP se hará el monitoreo de los parámetros eléctricos del variador como voltaje, corriente, frecuencia, etc.

3.3.3.3 Clasificación de seguridad

Los variadores deben cumplir con un área clasificada como Clase I, División (ver anexo 1 – clasificación de áreas).

3.3.3.4 Especificación

Allen Bradley ofrece una gama muy variada en cuanto a variadores de frecuencia para baja tensión en la línea denominada PowerFlex donde seleccionaremos el VFD que más se ajuste a nuestros requerimientos

PowerFlex 700

- Power ratings:
 - 200...240V: 0.37...75 kW / 0.5...100 Hp / 2.2...260 A
 - 380...480V: 0.37...500 kW / 0.5...700 Hp / 1.1...875 A
 - 500...600V: 0.75...132 kW / 1...150 Hp / 1.7...144 A
 - 690V: 45...132 kW / 50...150 Hp / 52...142 A
- Control V/Hz, control vectorial, control de flujo de vectores.
- Comunicación Common Industrial Protocol (CIP™) incluyendo DeviceNet™, ControlNet™, and EtherNet/IP™
- Programación y configuración mediante LCD keypad óptico, keypad remoto y software.
- Excelente producción de torque y rápida actualización para los tiempos de torque de entrada.
- 0.5 Hp...200 Hp at 480V input

PowerFlex 700S

- Clasificaciones de alimentación eléctrica
 - 200...240V: 0.75...66 kW / 1...100 Hp / 4.2...260 A
 - 380...480V: 0.75...800 kW / 1...1250 Hp / 2.1...1450 A
 - 500...600V: 0.75...1500 kW / 1...1600 Hp / 1.7...1500 A
 - 690V: 45...1500 kW / 50...1600 Hp / 77...1500 A
- Control V/Hz, control vectorial sin sensores, control vectorial de flujo.
- Programación y configuración mediante LCD keypad óptico, keypad remoto y software.
- Consta con librerías de funciones del usuario.
- Tiene un terminal block separable para conexiones de cableado.
- Bus de configuración común AC o DC

PowerFlex 700L

- Clasificaciones de alimentación eléctrica
 - 380...480V: 200...715 kW / 300...1150 Hp / 360...1250 A
 - 500...600V: 345...650 kW / 465...870 Hp / 425...800 A
 - 690V: 355...657 kW / 475...881 Hp / 380...705 A
- Comunicación Common Industrial Protocol (CIP™) incluyendo DeviceNet™, ControlNet™, and EtherNet/IP™
- Control de posición y velocidad de alta respuesta, desaceleración rápida y parada de altas cargas de inercia.
- Programación y configuración mediante LCD keypad óptico, keypad remoto y software.
- Convertidor activo de acuerdo a la IEEE-519 y regulaciones CE para reducción de armónicos

PowerFlex 700H

Este modelo brinda las siguientes características principales:

- Clasificaciones de alimentación eléctrica
 - 380...480V: 132...1200 kW / 200...1900 Hp / 261...2150 A
 - 500...600V: 160...2000 kW / 250...900 Hp / 261...820 A
 - 690V: 160...2300 kW / 150...2400 Hp / 170...2250 A
- Protección contra sobrecarga del variador, protección contra sobrecarga del motor.
- Programación y configuración mediante teclado LCD, teclado remoto y software.
- Módulo de interface de operador HIM.
- Baja distorsión de armónicos de 18 pulsos.
- Control de velocidad en lazo abierto con compensación de deslizamiento.
- Control V/Hz, control vectorial sin sensores y control PID.
- Comunicación mediante protocolo industrial común CIP incluyendo DeviceNet™, ControlNet™, and EtherNet/IP™

- Certificación ATEX para operación en ambientes explosivos.

Como se puede analizar en la información indicada en esta última parte, todos los modelos de variadores de frecuencia estudiados cumplen con los requerimientos eléctricos y además tienen todas las protecciones recomendadas. Sin embargo, el modelo **PowerFlex 700H** consta con la certificación ATEX que indica que el equipo está diseñado para operar en ambientes explosivos por lo que este modelo será seleccionado para esta aplicación al trabajar con productos limpios.

3.3.4 FILTROS

3.3.4.1 Tipo de filtro

El tipo de filtro eléctrico que se utiliza para garantizar la mayor reducción de distorsión total a plena carga, son los filtros RLC.

3.3.4.2 Control y comunicación

Los filtros deben tener una señal digital de salida mediante la cual se mandara a apagar los variadores. Esta señal es requerida en caso de sobre calentamiento de los terminales del filtro.

3.3.4.3 Clasificación de seguridad

Los filtros deben cumplir con un área clasificada como Clase I, División (ver anexo 1 – clasificación de áreas).

3.3.4.4 Especificación

Para especificar el filtro básicamente consideramos la corriente que este debe soportar a máxima carga, es decir, debemos considerar los 627A que requiere el motor eléctrico a máxima carga más la corriente que consumen los capacitores propios del filtro.

El modelo que más se ajusta según catálogo del fabricante es el MDG0970D ya que este provee una capacidad de corriente de 970A a plena

carga con una corriente de 320A de los capacitores con lo cual abasteceríamos al 100% al motor eléctrico de la bomba.

Especificaciones – Condiciones de servicio

- Carga: Solo para rectificador variable de 6 pulsos.
- Voltaje de entrada: 480 VAC +/-10%, sistema trifásico.
- Desbalance de voltaje de entrada: 1% máximo
- Factor de servicio: 1.00
- Sobrecarga: 150% por 1 minuto.
- Temperatura de ambiente: -40 hasta 40°C

A continuación se muestran las gráficas que describen el comportamiento del filtro frente a la carga aplicada y el espectro de armónicos al 100% de carga.

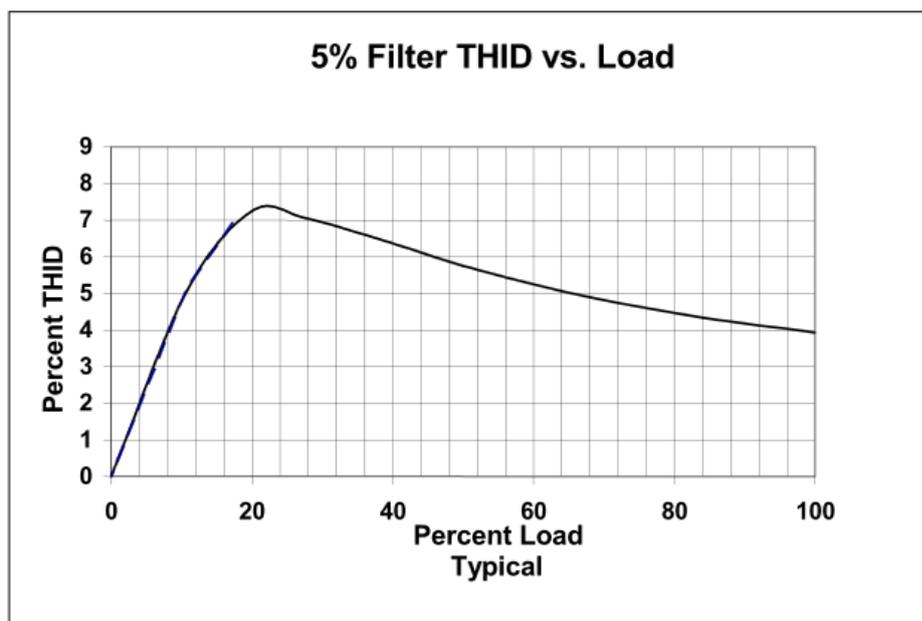


Figura 42. Efecto de la carga.

Fuente: (MTE Corporation, 2013)

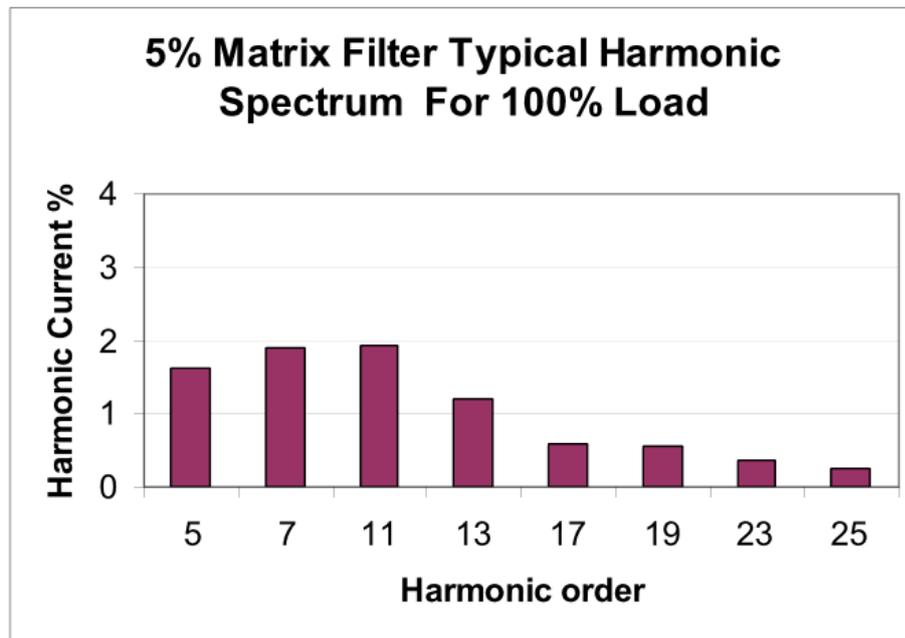


Figura 43. Espectro de armónicos a plena carga.

Fuente: (MTE Corporation, 2013)



Figura 44. Filtro RLC. Exterior

3.3.5 CONTROLADOR PAC T2750

El controlador lógico programable que se va a usar en este proyecto es de la marca Foxboro – Invensys. Estos controladores fueron provistos por el cliente final EP Petroecuador.



Figura 45. PAC T2750

Según la arquitectura de diseño (ver anexo 1 – arquitectura), se instalarán 2 controladores denominados PAC 1 y PAC 2. Estos controladores funcionarán en un sistema redundante.

Las principales características de los PAC son las siguientes:

Tabla 8.

Características PAC T2750

Característica	Descripción
CPU	Processor MPC8313
Tamaño del bus	32 bit
Frecuencia	333 MHz
Tarjeta de memoria	32 Mbytes
USB	2 puertos redundantes
Interruptor de control	En el panel frontal del procesador

La configuración de tarjetas y señales de los PAC son las siguientes:

Tabla 9.

Número de tarjetas PAC T2750

Tipo	PAC 1	PAC2
AI	10	11
AO	1	1
DI	3	2
DO	2	2

Tabla 10.

Número de señales PAC T2750

Tipo	PAC 1	PAC2
AI	30	33
AO	2	2
DI	48	32
DO	32	32

Para mayor información técnica acerca de los controladores y módulos revisar el anexo 7.

3.3.6 SERVIDORES Y ESTACIONES DE TRABAJO

La Estación de Bombeo Ambato manejará dos servidores y dos estaciones de trabajo. Además, estas máquinas alojarán el software necesario tanto para la adquisición de datos como para el control del proceso.

3.3.6.1 Hardware

El servidor SRV-001 será el encargado de manejar los datos de entrada y salida mientras que el servidor SRV-002 será el encargado de historizar los datos del proceso.

**Figura 46.** Servidores SRV-001 y SRV-002.



Figura 47. Estaciones de trabajo.

Las estaciones de trabajo (WorkStation) llevarán un programa cliente, mediante el cual se puede visualizar y controlar el proceso. Estas máquinas están destinadas para uso de los operadores.

Las especificaciones técnicas de las maquinas pueden ser observadas en el anexo 7.

3.3.6.2 Software

El sistema SCADA (sistema de adquisición de datos y control de supervisión) se creará sobre la plataforma ArchestrA de la marca comercial Wonderware – Invensys. Este programa tiene la capacidad de administrar todos los recursos del sistema SCADA, es decir que en una sola base de datos se podrá realizar o modificar la programación de los PAC, además se podrá realizar el dibujo e integración de pantallas HMI mediante el software Intouch.

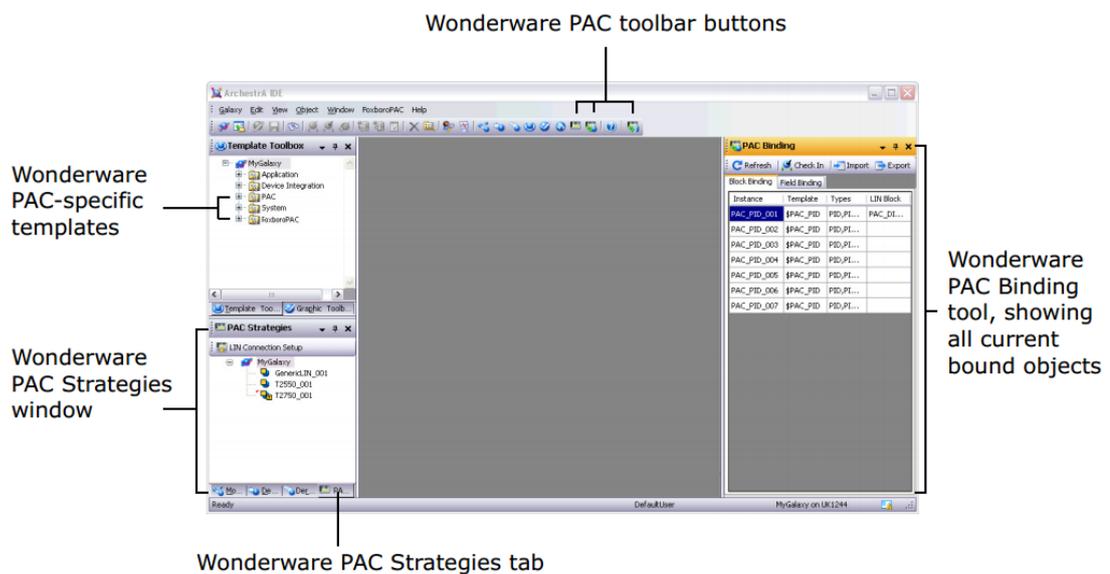


Figura 48. Ventana principal Archestra.

Fuente: (Invensys Systems, 2013)

El servidor SRV-000, que es una máquina virtual, llevará la plataforma Archestra que permite administrar todos los recursos del sistema.

El servidor SRV-001 contiene el I/O server para manejo de datos de entrada y salida.

El servidor SRV-002 llevará el software Historian Client que permite almacenar las variables en tiempo real.

Las estaciones de trabajo WS-001 y WS-002 llevarán el programa cliente Intouch y WindowViewer mediante el cual podemos visualizar y manejar la aplicación HMI creada.

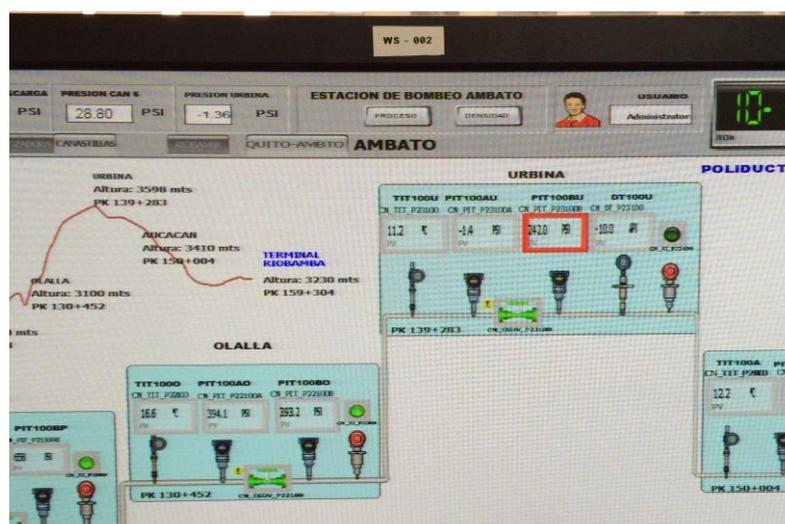


Figura 49. Pantalla de WS-002 en tiempo real. Software cliente

En la siguiente tabla se enlistan las licencias adquiridas y su distribución.

Tabla 11.

Distribución de licencias.

Tipo	SRV-000	SRV-001	SRV-002	WS-001	WS-002
Historian Server			X		
Historian Client	X	X		X	X
Archestra Platform	X				
DAServer		X			
Intouch4SP w	X	X	X	X	X

3.3.7 INSTALACIÓN DE EQUIPOS

3.3.7.1 Instalación de variadores de velocidad

Los variadores de velocidad básicamente requieren del conexionado de entrada y de salida según del plano de conexión del fabricante. Es importante realizar pruebas de megado y continuidad antes de energizar este equipo ya que podría ser una operación peligrosa debido a los altos valores de voltaje y corriente que manejan. El proceso de pruebas en cables es basado en un manual de Nexans (anexo 6), fabricante de los cables utilizados en el proyecto, acorde a la norma CSA C22.2 No. 2556 / UL 2556, "Wire and Cable Test Methods"

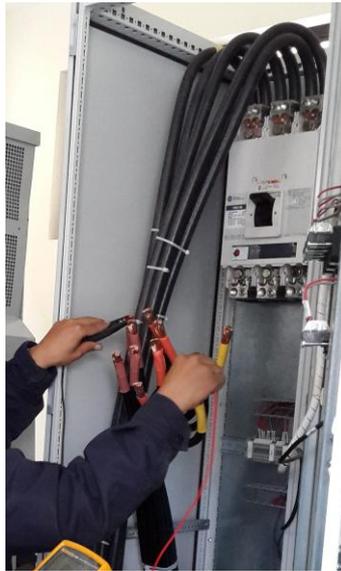


Figura 50. Pruebas de continuidad y megado de los variadores.

3.3.7.2 Procedimiento de instalación de válvulas MOV

Para instalar la válvula motorizada se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Alinear la válvula a las bridas de entrada y salida de la válvula mediante un tecele.
2. Colocar y ajustar los espárragos y tuercas. Entre las bridas se coloca un empaque ANSI 900 para evitar que el combustible transportado filtre.



Figura 51. Válvulas de succión y descarga del SKID de bombeo durante etapa de construcción.

3. Montar el actuador sobre la válvula y ajustar los pernos de sujeción. Se debe acoplar con cuidado el eje que transmite el movimiento a la válvula.
4. Conectar el cable armado de 12 conductores número 14 AWG a la válvula usando el conector TMCX apropiado. Este cable se utiliza para el control de la válvula.

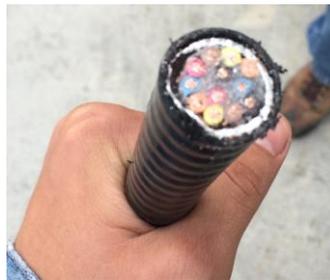


Figura 52. Sección transversal cable armado 12Cx14AWG.



Figura 53. Cable armado 12Cx14AWG.

5. Conectar el cable armado de 3 conductores número 12 AWG a la válvula usando el conector TMCX apropiado. Este cable se utiliza para energizar la válvula.
6. Conectar el cable armado de 2 pares número 18 AWG a la válvula usando el conector TMCX apropiado. Este cable se utiliza para la red de comunicación DDC de la válvula.



Figura 54. Cables conectados en válvula motorizada MOV.

7. Dentro del instrumento colocar terminales cerrados para todos los conductores.
8. Finalmente conectar los conductores correspondientes en las bornas del terminal block.



Figura 55. Conexión de válvula motorizada MOV.

Se debe considerar

- Verificar torques de ajuste recomendados para los equipos y accesorios instalados.
- Se debe tener cuidado en la instalación del TMCX ya que existe el riesgo de que se lastimen los conductores generando un corto circuito.



Figura 56. Instalación final del SKID de bombeo.

3.3.8 INTEGRACIÓN DE EQUIPOS A LA RED INDUSTRIAL Y PROGRAMACIÓN

3.3.8.1 Variadores de velocidad

En el poliducto Ambato Riobamba, para el control de las bombas se tiene dos variadores de velocidad, EA-VFD-220 y EA-VFD-221, que están conectados a cada una de las bombas de la estación Ambato, EA-B-220 y EA-B-22.

Para integrar los variadores a la red industrial, se cambia la dirección IP, subnet, y gateway; para lo cual, después de haber energizado el variador que se muestra a continuación, se cambia dichos valores en el display del mismo.



Figura 57. Variador de velocidad PowerFlex 700H del poliducto
Ambato - Riobamba

Tabla 12.

Dirección IP, Subnet y Gateway de los variadores

Variador	Dirección IP	Subnet	Gateway
EA-VFD-220	172.25.131.20	255.255.255.0	172.25.131.1
EA-VFD-221	172.25.131.21	255.255.255.0	172.25.131.1

3.3.8.1.1 Programación del variador de velocidad

Un variador de velocidad de nivel industrial tiene un sin número de parámetros configurables los cuales se deberán programar según la necesidad de este proyecto. Dentro de estos parámetros están los datos de placa del motor, además de tiempos de rampas de aceleración y desaceleración. También se debe establecer la comunicación con el PLC.

Tabla 13.

Parámetros del variador de frecuencia PowerFlex 700H

Variable	N° Parámetro	Set	Unidades
Voltaje de red	027	480	VAC
Amperaje	028	920	Amp
Tipo de motor	040	0	N/A
Voltaje de placa del motor	041	460	VAC
Frecuencia de placa del motor	043	60	Hz
RPM de placa del motor	044	3580	Hz
Potencia de placa del motor	045	600	HP
Velocidad mínima	081	30	Hz
Velocidad máxima	082	60	Hz
Tiempo de aceleración 1	140	30	seg
Tiempo de deceleración 1	142	10	seg
Valor de corriente limite	148	815	Amp
Modo de frenado A	155	1	N/A
Nivel de frenado DC	158	650	Amp
Tiempo de frenado DC	159	25	seg

El variador PowerFlex 700H consta con una tarjeta Modbus - TCP mediante la cual se enlaza con el sistema SCADA con los protocolos de comunicación. A través de esta tarjeta se monitorean los principales parámetros del variador de velocidad.

Mediante el selector Local / Remoto del variador de velocidad se selecciona los dos modos de operación. En local se comanda el VFD mediante el teclado local del variador y en modo remoto se controla la velocidad del motor mediante la entrada analógica donde 4 mA equivale a 30 Hz y 20 mA equivale a 60 Hz.

3.3.8.2 Controladores PAC T2750

De igual manera los controladores PAC T2750 deben estar dentro de una misma red para poder tener un enlace entre todos los equipos.

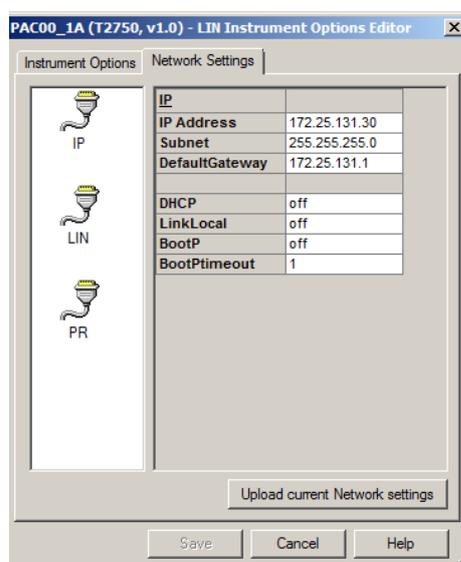


Figura 58. Cambio de dirección IP, Subnet y Gateway de los controladores.

Tabla 14.

Dirección IP, Subnet y Gateway de los controladores PAC T2750

Controlador	Dirección IP	Subnet	Gateway
PAC 1A	172.25.131.30	255.255.255.0	172.25.131.1
PAC 1B	172.25.131.31	255.255.255.0	172.25.131.1
PAC 2A	172.25.131.32	255.255.255.0	172.25.131.1
PAC 2B	172.25.131.33	255.255.255.0	172.25.131.1

3.3.8.3 Servidores y workstation

El servidor SRV 000 es una máquina virtual que contiene la plataforma de Orchestra en la cual está desarrollada la ingeniería del sistema SCADA y de control.

El servidor SRV 001 es el equipo en el cual llegan las señales del proceso de la estación Ambato.

El servidor SRV 002 es el equipo en el cual se almacenan en forma histórica los datos del proceso de la estación Ambato.

Las Workstation están destinadas a realizar el enlace entre el operador y los servidores, mostrando así los datos del proceso en pantallas que se encuentran en el cuarto de control de la estación.

Tabla 15.

Dirección IP, Subnet y Gateway de servidores

Servidores	Dirección IP	Subnet	Gateway
SRV 000	172.25.131.36	255.255.255.0	172.25.131.1
SRV 001	172.25.131.37	255.255.255.0	172.25.131.1
SRV 002	172.25.131.38	255.255.255.0	172.25.131.1

Tabla 16.

Dirección IP, Subnet y Gateway de workstation

Workstation	Dirección IP	Subnet	Gateway
WS 001	172.25.131.39	255.255.255.0	172.25.131.1
WS 002	172.25.131.40	255.255.255.0	172.25.131.1

3.3.9 PROGRAMACIÓN

El primer paso es crear la base de datos para lo cual se crea un bloque de tipo LIN Database el cual será la plataforma base de trabajo. En este bloque se crean los módulos de entradas y salidas para comunicarse con los instrumentos y equipos en campo mediante el controlador.

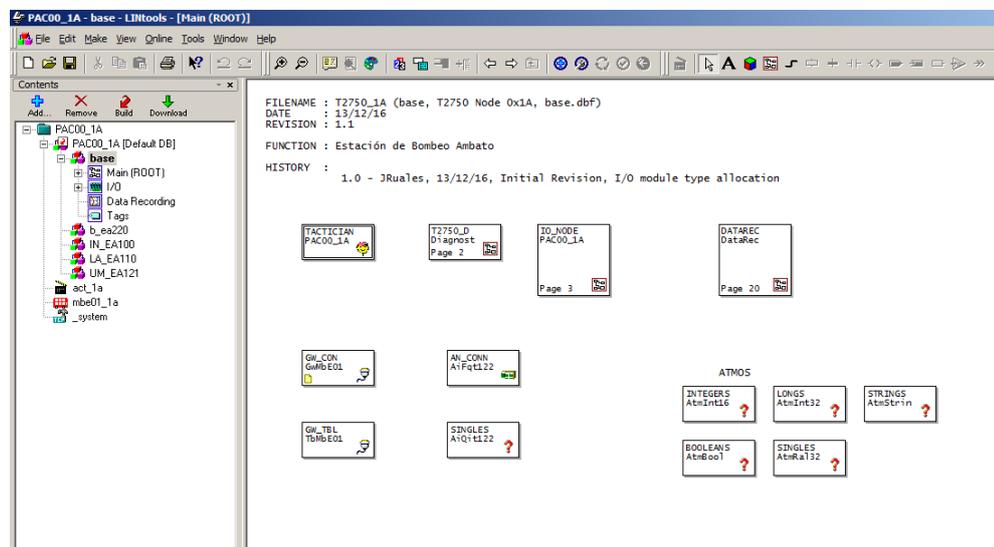


Figura 59. Bloque base del controlador número 1.

Al vincular el controlador PAC al sistema SCADA se crean automáticamente tantos bloques como módulos de entradas y salidas existan

en el controlador ya sean para señales analógicas o digitales. Dentro de cada módulo se crean las señales que se vayan a leer en campo.

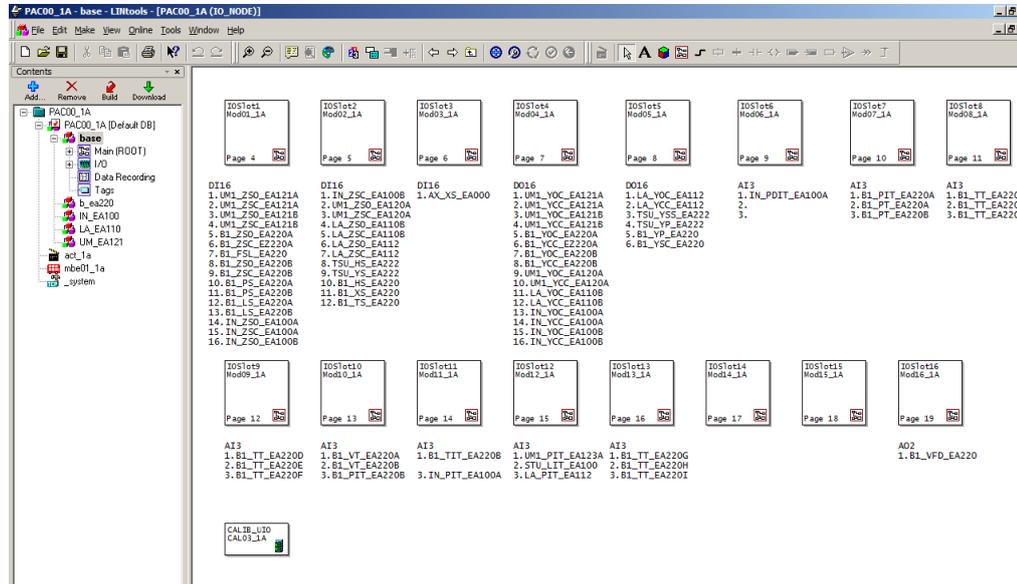


Figura 60. Bloques de entradas y salidas creadas.

Las señales que se van a crear dentro del PAC son las siguientes:

Tabla 17.

Lista de señales del PAC

Cuando abrimos los módulos creados en el programa de LIN Tools, podremos observar que existen espacios para ingresar nuestras variables.

Se selecciona una variable y se asigna el TAG de identificación. Posteriormente se realiza la configuración de la señal en la sección inferior donde se selecciona las unidades, límite superior e inferior de la medida, etc.

Tag De Campo	Tipo	Equipo	E/S	Rango	Descripción
B1_PIT_EA220A	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 900 PSI	Presión succión bomba 220
B1_PIT_EA220B	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 2000 PSI	Presión de descarga bomba 220
B2_PIT_EA221A	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 900 PSI	Presión succión bomba 221

Continúa →

B2_PIT_EA221B	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 2000 PSI	Presión de descarga bomba 221
B1_TIT_EA220	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura de fluido bomba 220
B2_TIT_EA221	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura de fluido bomba 221
B1_ZSO_EA220A	DI	PAC 1	E	0 – 1	Límite de abierto válvula MOV220A
B1_ZSC_EA220A	DI	PAC 1	E	0 – 1	Límite de cerrado válvula MOV220A
B1_YOC_EA220A	DO	PAC 1	S	0 – 1	Comando abrir válvula MOV220A
B1_YCC_EA220A	DO	PAC 1	S	0 – 1	Comando cerrar válvula MOV220A
B1_ZSO_EA220B	DI	PAC 1	E	0 – 1	Límite de abierto válvula MOV220B
B1_ZSC_EA220B	DI	PAC 1	E	0 – 1	Límite de cerrado válvula MOV220B
B1_YOC_EA220B	DO	PAC 1	S	0 – 1	Comando abrir válvula MOV220B
B1_YCC_EA220B	DO	PAC 1	S	0 – 1	Comando cerrar válvula MOV220B
B2_ZSO_EA221A	DI	PAC 2	E	0 – 1	Límite de abierto válvula MOV221A
B2_ZSC_EA221A	DI	PAC 2	E	0 – 1	Límite de cerrado válvula MOV221A
B2_YOC_EA221A	DO	PAC 2	S	0 – 1	Comando abrir válvula MOV221A
B2_YCC_EA221A	DO	PAC 2	S	0 – 1	Comando cerrar válvula MOV221A
B2_ZSO_EA221B	DI	PAC 2	E	0 – 1	Límite de abierto válvula MOV221B
B2_ZSC_EA221B	DI	PAC 2	E	0 – 1	Límite de cerrado válvula MOV221B
B2_YOC_EA221B	DO	PAC 2	S	0 – 1	Comando abrir válvula MOV221B
B2_YCC_EA221B	DO	PAC 2	S	0 – 1	Comando cerrar válvula MOV221B
B1_VFD_EA220	AO	PAC 1	S	4 – 20 mA 30 – 60 Hz	Comando de control de frecuencia del VFD 220
B2_VFD_EA221	AO	PAC 2	S	4 – 20 mA 30 – 60 Hz	Comando de control de frecuencia del VFD 221
B1_YP_EA220	DO	PAC 1	S	0 – 1	Permisivo de arranque para la bomba 220
B1_YSC_EA220	DO	PAC 1	S	0 – 1	Comando de arranque para la bomba 220
B2_YP_EA221	DO	PAC 2	S	0 – 1	Permisivo de arranque para la bomba 221
B2_YSC_EA221	DO	PAC 2	S	0 – 1	Comando de arranque para la bomba 221
B1_PT_EA220A	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 10 – 250 PSI	Presión succión bomba 220

Continúa →

B1_PT_EA220B	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 700 – 1500 PSI	Presión de descarga bomba 220
B2_PT_EA221A	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 10 – 250 PSI	Presión succión bomba 221
B2_PT_EA221B	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 700 – 1500 PSI	Presión de descarga bomba 221
B1_TT_EA220A	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura de la carcasa bomba 220
B1_TT_EA220B	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento D.E. bomba 220
B1_TT_EA220C	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento N.D.E. bomba 220
B1_TT_EA220D	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura sello N.D.E. bomba 220
B1_TT_EA220E	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento D.E. motor 220
B1_TT_EA220F	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento N.D.E. motor 220
B1_TT_EA220G	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 200 °C	Temperatura devanado fase 1 motor 220
B1_TT_EA220H	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 200 °C	Temperatura devanado fase 2 motor 220
B1_TT_EA220I	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 200 °C	Temperatura devanado fase 3 motor 220
B2_TT_EA221A	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura de la carcasa bomba 221
B2_TT_EA221B	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento D.E. bomba 221
B2_TT_EA221C	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento N.D.E. bomba 221
B2_TT_EA221D	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura sello N.D.E. bomba 221
B2_TT_EA221E	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento D.E. motor 221
B2_TT_EA221F	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 100 °C	Temperatura rodamiento N.D.E. motor 221
B2_TT_EA221G	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 200 °C	Temperatura devanado fase 1 motor 221
B2_TT_EA221H	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 200 °C	Temperatura devanado fase 2 motor 221

Continúa →

B2_TT_EA221I	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 200 °C	Temperatura devanado fase 3 motor 221
B1_VT_EA220A	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Detector de vibración D.E. bomba 220
B1_VT_EA220B	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Detector de vibración N.D.E. bomba 220
B1_PS_EA220A	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de presión reservorio API D.E. bomba 220
B1_PS_EA220B	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de presión reservorio API N.D.E. bomba 220
B1_LS_EA220A	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de nivel reservorio API D.E. bomba 220
B1_LS_EA220B	AI	PAC 1	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de nivel reservorio API N.D.E. bomba 220
B2_VT_EA221A	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Detector de vibración D.E. bomba 221
B2_VT_EA221B	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Detector de vibración N.D.E. bomba 221
B2_PS_EA221A	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de presión reservorio API D.E. bomba 221
B2_PS_EA221B	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de presión reservorio API N.D.E. bomba 221
B2_LS_EA221A	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de nivel reservorio API D.E. bomba 221
B2_LS_EA221B	AI	PAC 2	E	4 – 20 mA 0 – 25 mm/s	Switch de nivel reservorio API N.D.E. bomba 221

<u>Node</u>			
	Name	Type	Hardware Snapshot
	PAC00_1A	T2750-16w	?
<u>Module</u>			
Slot	Name	Type	Hardware Snapshot
6	Mod06_1A	AI3	?
<u>Channels</u>			
Channel	Name	Type	Hardware Snapshot
AI 1	FDIT100A	AI	?
AI 2		AI	?
AI 3		AI	?

Figura 61. Ingreso de TAG de variables.

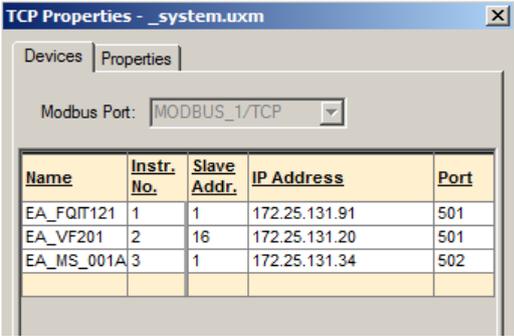
Block: IN_PDIT_EA100A		Comment	Connections		
TagName	IN_PDIT_EA100A			LIU Name	PDIT100A
Type	AI_UIO			DBase	<local>
Task	3 (110ms)			Rate	0
MODE	AUTO			Alarms	
Fallback	AUTO			Node	>00
				SiteNo	6
PV	0.000	PSI		Channel	1
HR	9.016	PSI		InType	mA
LR	0.000	PSI		HR_in	20.00 mA
				LR_in	4.00 mA
HiHi	100.0	PSI		AI	0.00 mA
Hi	100.0	PSI		Res	0.000 Ohms
Lo	0.000	PSI			
LoLo	0.000	PSI		CJ_type	Auto
Hyst	0.5000	%		CJ_temp	0.000
				LeadRes	0.000 Ohms
Filter	0.000	Secs		Emissiv	1.000
Char	Linear			Delay	0.000 Secs
UserChar				SBreak	None

Figura 62. Configuración de variables.

Una vez creadas las variables para trabajar con el PLC, se configuran parámetros de comunicación específicos. En este caso se parametrizarán los bloques de las válvulas MOV para poder obtener datos mediante Modbus TCP/IP para lo cual primero se configuran los parámetros de comunicación como se indica en la siguiente figura.

3.3.10 CONFIGURACION DE COMUNICACIÓN MODBUS TCP/IP

Lo primero es crear un bloque Modbus dentro del cual se selecciona el tipo de comunicación Modbus TCP/IP. En la pestaña TCP se agregaron dos nuevos instrumentos con su respectiva dirección IP. Se debe verificar el puerto localmente en el instrumento así como también el número de esclavo para lograr alcanzar la comunicación. La configuración final es la que se muestran en la siguiente imagen:



Name	Instr. No.	Slave Addr.	IP Address	Port
EA_FQIT121	1	1	172.25.131.91	501
EA_VF201	2	16	172.25.131.20	501
EA_MS_001A	3	1	172.25.131.34	502

Figura 63. Configuración de instrumentos Modbus TCP/IP.

De esta forma se han agregado el Variador de Frecuencia y la Estación Maestra (Master Station) a la comunicación Modbus TCP/IP y ya se podrá monitorear los diferentes parámetros que necesitemos.

Las direcciones Modbus que se monitorean en el variador de frecuencia son las siguientes.

Tabla 18.

Mapa Modbus variador PowerFlex 700H

Variable	Dirección	Unidades
Frecuencia de salida	40001	Hz
Corriente de salida	40003	Amp
Voltaje de salida	40006	VAC
Valor Analógico 1	40016	mA
Fuente de referencia de velocidad	40213	N/A

Para el control de la planta de Ambato es importante tener sectorizadas las áreas de modo que la programación sea fácil y entendible.

Respecto a las válvulas podemos visualizar el porcentaje de apertura, valores de voltaje y torque de las 4 válvulas del SKID de bombas. Las direcciones Modbus TCP/IP son las siguientes.

Tabla 19.

Mapa Modbus Estación Maestra

Variable	Dirección	Valor
MOV220A – Posición	40005	0-100%
MOV220A – Estatus	40006	1 abierto – 2 cerrado
MOV220A – Voltaje	40007	0 – 460 VAC
MOV220A – Torque	40008	0 – 75 Nm
MOV220B – Posición	40001	0-100%
MOV220B – Estatus	40002	1 abierto – 2 cerrado
MOV220B – Voltaje	40003	0 – 460 VAC
MOV220B – Torque	40004	0 – 75 Nm
MOV221A – Posición	40013	0-100%
MOV221A – Estatus	40014	1 abierto – 2 cerrado
MOV221A – Voltaje	40015	0 – 460 VAC
MOV221A – Torque	40016	0 – 75 Nm
MOV221B – Posición	40009	0-100%
MOV221B – Estatus	40010	1 abierto – 2 cerrado

Continúa →

MOV221B – Voltaje	40011	0 – 460 VAC
MOV221B – Torque	40012	0 – 75 Nm

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

El objetivo del sistema de control es mantener constante la variable más importante del proceso que es la presión de descarga la cual nos permite sobrepasar el punto más alto del poliducto ubicado en la canastilla de Urbina. La presión a la descarga debe mantenerse a 10480 kPa (1520 psi) para el Diésel, para la Gasolina Extra en 8860 kPa (1285 psi) y para la Gasolina Súper en 8894 kPa (1290 psi), para lograr vencer la columna hidrostática y poder de esta manera mover el producto hasta la estación reductora Riobamba.

Existen dos métodos importantes para realizar el modelamiento de la planta: Identificación que consiste en el tratamiento de datos experimentales y el modelamiento matemática que requiere de conocimiento de leyes físicas y fórmulas matemáticas que describen el funcionamiento de cada elemento del sistema.

En la siguiente tabla se ha realizado una evaluación para determinar cuál de los métodos antes mencionados se ajusta de mejor manera a la aplicación siguiendo los pasos descritos:

1. En primer lugar se debe indicar las principales características que nos permitan comparar los métodos.
2. Se debe asignar un peso según sea la importancia de cada característica, sumando un total de 100 puntos.
3. Se debe asignar una calificación para cada método según sea el grado de cumplimiento de cada característica, indicando un valor de 0% al 100%
4. Se debe realizar una ponderación y así obtener una calificación en puntos.
5. Finalmente se debe sumar los puntajes obtenidos.

Tabla 20.

Matriz de ponderación para modelamiento de planta.

Item	Característica	Peso	Identificación		Modelamiento	
			Calif.	Pond	Calif.	Pond.
1	Disponibilidad de datos experimentales	40	100%	40	50%	20
2	Conocimiento teórico del sistema	20	80%	20	50%	10
3	Grado de validez del sistema	30	70%	21	85%	25,5
4	Necesidad de software específico	10	100%	10	60%	6
		100	91		61,5	

Como se puede ver en la matriz de ponderación, el método más óptimo en este caso en particular es el método de identificación. La característica principal es que gracias a la construcción de la planta, se puede poner en marcha el sistema de bombeo y adquirir las variables de interés para poder generar un modelo matemático.

El software utilizado para obtener la función de transferencia fue el programa **MATLAB** de **Mathworks**. Todos los trabajos en este software propietario fue desarrollado en los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, donde existe una licencia corporativa para 30 máquinas instaladas en un servidor que administra este servicio en tiempo real. La versión en la que se trabajó es Matlab 2014b.

4.1 MODELAMIENTO DE LA PLANTA Y DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para el modelamiento de la planta se usó el método de identificación. Para este método se requieren datos reales de entrada y salida de la planta, para los cuales se toman como entrada la corriente alterna que se inyecta a los motores y como salida la variable de control que es la presión de descarga.

Los datos obtenidos en el arranque son los mostrados en las siguientes gráficas:

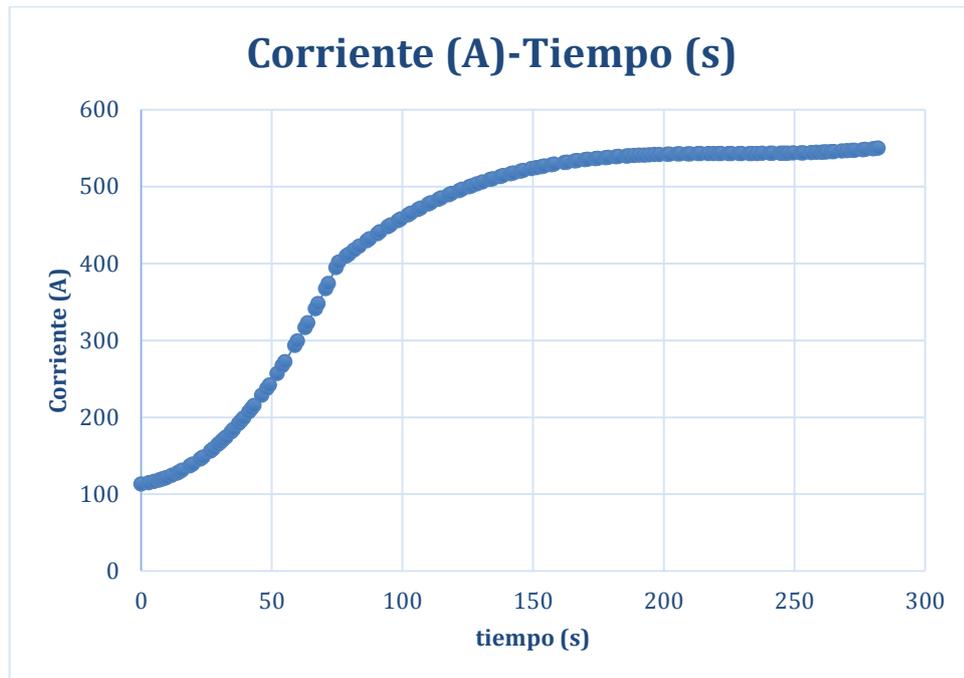


Figura 64. Datos de corriente vs tiempo obtenidos del arranque de las bombas a plena carga.

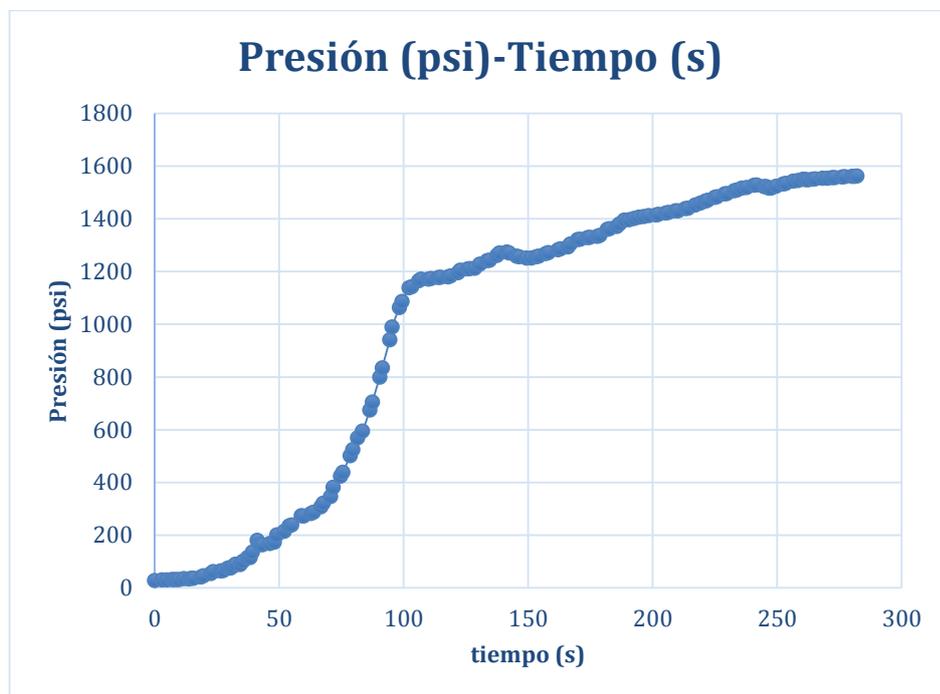


Figura 65. Datos de presión vs tiempo obtenidos del arranque de las bombas a plena carga.

4.1.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Al abrir *MATLAB*, en el *Workspace* se crean los vectores con los datos de entrada y salida obtenidos del arranque a plena carga, esto con motivo de realizar el modelamiento de la planta que representa al sistema.

El primer paso para el proceso de identificación de sistemas mediante la aplicación *MATLAB* es crear dos vectores que contengan los datos de entrada y salida de nuestro sistema.

El vector de entrada se denominará *amperios* y presenta los datos de corriente aplicada al motor. El vector de salida presenta los datos obtenidos de la presión de descarga de la bomba durante la operación; este vector será nombrado como *presion*.

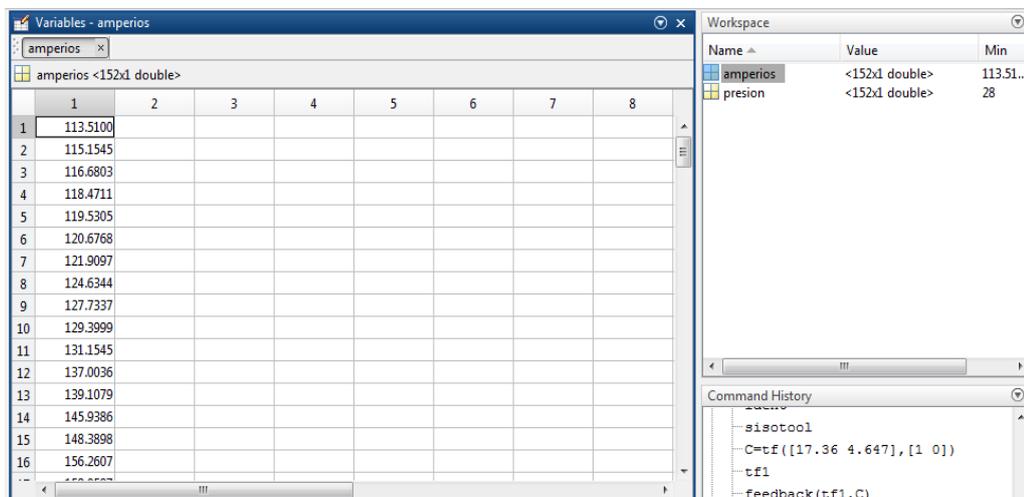


Figura 66. Ingreso de variables de entrada y salida del sistema en vectores.

Una vez creados los vectores se ejecuta el comando *ident* en el *Command Window* de *MATLAB*, se despliega una ventana donde se trabajará con los datos recolectados.

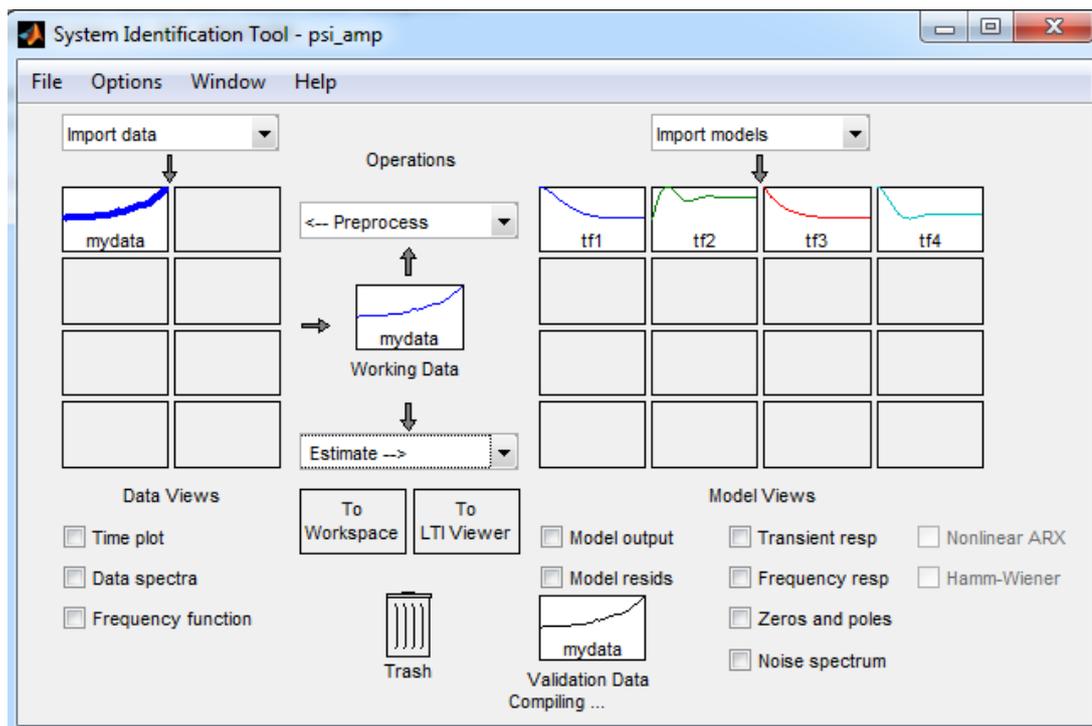


Figura 67. Herramienta de identificación de sistemas.

En importar datos (import data) se selecciona señales en el dominio del tiempo (Time-Domain Signals). Se abre una nueva ventana en la cual se escogen los vectores de datos. En entrada (Input) se escribe *amperios* y en salida (Output) se coloca *presion*; y se incluye el tiempo de muestreo con el que se obtuvieron los datos que es 1.86 segundos.

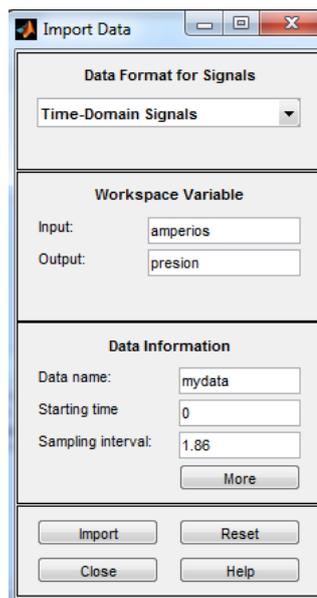


Figura 68. Ingreso de vectores de datos del arranque en el dominio del tiempo.

Después de tener los datos de entrada y salida se procede a obtener la función de transferencia para lo cual en estimar (estimate) se selecciona modelos de función de transferencia (Transfer Function Models). Se desplegará la ventana mostrada en la Figura 69.

Se crean distintos tipos de funciones de transferencia, con diferentes número de ceros y polos para escoger el modelo que mejor se ajuste al comportamiento real de la planta.

La función de transferencia que presenta un mejor ajuste es la que tiene dos polos y un cero. Una vez seleccionado el modelo, se exporta la fórmula matemática al *workspace* para poder realizar el controlador.

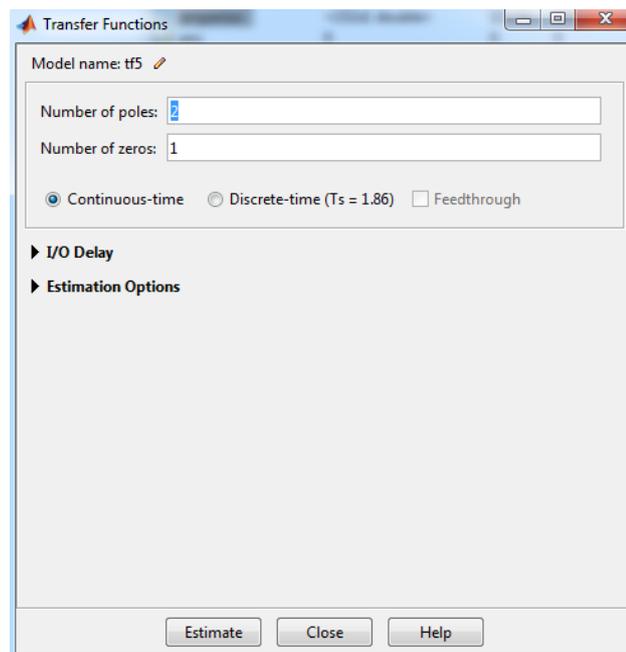


Figura 69. Creación de función de transferencia con escogiendo número de polos y ceros.

Escribiendo la función de transferencia obtenida tenemos lo siguiente:

$$G_P = \frac{0.06281s + 0.003476}{s^2 + 0.0591s + 0.001267}$$

4.1.2 ESTUDIO DE ESTABILIDAD DE LA PLANTA

Antes de diseñar el controlador debemos determinar si la planta que modelamos es estable y por lo tanto controlable, para lo cual usaremos el criterio de estabilidad de Routh.

Se dice que una planta es estable si cumple con los siguientes puntos:

- Todos los signos del polinomio de la ecuación característica de la planta deben ser iguales.

- Todos los signos de la primera columna de la tabla de Routh deben ser iguales.

La ecuación característica de la planta modelada es el denominador:

$$s^2 + 0.0591s + 0.001267 = 0$$

Se arma la tabla de Routh:

$$\begin{array}{c|cc} s^2 & 1 & 0.001267 \\ s & 0.0591 & 0 \\ s^0 & A & \end{array}$$

$$A = \frac{-\det \begin{vmatrix} 1 & 0.001267 \\ 0.0591 & 0 \end{vmatrix}}{0.0591}$$

$$A = \frac{-(-0.0591 * 0.001267)}{0.0591}$$

$$A = 0.001267$$

$$\begin{array}{c|cc} s^2 & 1 & 0.001267 \\ s & 0.0591 & 0 \\ s^0 & 0.001267 & \end{array}$$

Como se puede observar de los cálculos tenemos que, en primer lugar, todos los signos de la ecuación característica de la planta son positivos y que después de determinar la tabla de *Routh*, los valores de la primera columna también son positivos, por lo tanto, mediante este criterio podemos asegurar que la planta modelada es estable y por ende controlable.

4.1.3 DESARROLLO DEL CONTROLADOR

Con el modelo de planta creado, se procede con el diseño del controlador para tener la mejor respuesta al impulso unitario en lazo cerrado del sistema.

De igual forma que en el inicio de este capítulo, utilizaremos una matriz de ponderación para determinar en tipo de controlador que se ajusta de mejor manera a nuestro sistema de control.

Tabla 21.

Matriz de ponderación para controlador.

Item	Característica	Peso	PI		PD		PID	
			Calif.	Pond.	Calif.	Pond.	Calif.	Pond.
1	Tiempo de establecimiento	10	50%	5	85%	8,5	80%	8
2	Error en estado estable	40	100%	40	20%	8	85%	34
3	Reduce máximo pico	20	50%	10	80%	16	80%	16
4	Implementación	30	85%	25,5	85%	25,5	40%	12
		100		80,5		58		70

Según se puede observar en la Tabla 21, el controlador que más se ajusta a las necesidades del proyecto es el Proporcional – Integral. Básicamente, el punto más importante es el error en estado estable donde el controlador seleccionado muestra grandes ventajas, tomando en cuenta además de que otro parámetro muy importante para el control, como es el tiempo de establecimiento, no es de vital importancia en esta aplicación

Los requerimientos de comportamiento que se ha establecido para el diseño del controlador son un tiempo de establecimiento de 5 segundos y un máximo pico de 5%

$$\begin{cases} t_s = 5 \text{ seg} \\ Mp = 1\% \end{cases}$$

$$M_p = e^{-\frac{\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$\ln(M_p) = \frac{-\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\ln(0.01) = \frac{-\pi \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\therefore \xi = 0.826$$

$$M_F \approx 100\xi$$

$$\therefore M_F = 82.6^\circ$$

$$\frac{4}{\xi \cdot \omega_n} = t_s$$

$$\omega_n = \frac{4}{0.826(5)}$$

$$\omega_n = 0.969 \text{ rad/s}$$

Una vez obtenida la frecuencia natural ω_n , debemos determinar el valor del módulo y el ángulo de la función de transferencia determinada anteriormente para lo cual nos ayudamos con la herramienta *Sisotool* de *MATLAB*, así:

$$M_G = -23.8$$

$$\angle G_P = -89.8^\circ$$

$$20 \log |G_P| = M_G$$

$$20 \log |G_P| = -23.8$$

$$|G_P| = 0.0646$$

$$\theta = -180^\circ + M_F - \angle G_P$$

$$\theta = -180^\circ + 82.6^\circ - (-89.8^\circ)$$

$$\theta = -7.6^\circ$$

$$k_p = \frac{\cos(\theta)}{|G_p|}$$

$$k_p = \frac{\cos(-7.6)}{0.0646}$$

$$k_p = 15.34$$

$$k_d \cdot \omega_n - \frac{k_i}{\omega_n} = \frac{\sin(\theta)}{|G_p|}$$

El controlador que determinaremos es un PI, por lo tanto:

$$k_d = 0$$

$$-\frac{k_i}{\omega_n} = \frac{\sin(\theta)}{|G_p|}$$

$$k_i = -\sin(-7.6) \cdot \frac{0.969}{0.0646}$$

$$k_i = 1.98$$

$$\therefore G_C = k_p + k_d \cdot s + \frac{k_i}{s}$$

$$G_C = 15.34 + \frac{1.98}{s}$$

4.1.4 SIMULACIÓN DE LA PLANTA CON CONTROLADOR EN MATLAB

En el *command window* de *MATLAB*, se ejecuta el comando *sisotool*. En la ventana que se despliega podemos ver la arquitectura del sistema de control donde identificaremos los componentes:

- G: función de transferencia G_p determinada en la sección 4.1.1
- C: controlador G_C diseñado en la sección 4.1.3.
- H: es la realimentación que en este caso tiene valor de 1.

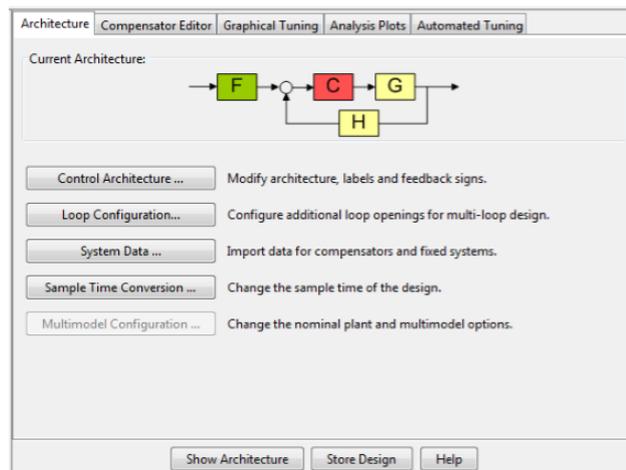


Figura 70. Arquitectura de control estándar. *SISOTOOL*.

Inicialmente los valores de estas componentes del sistema de control están con un valor igual a 1 dando como resultado las gráficas presentadas en la Figura 71.

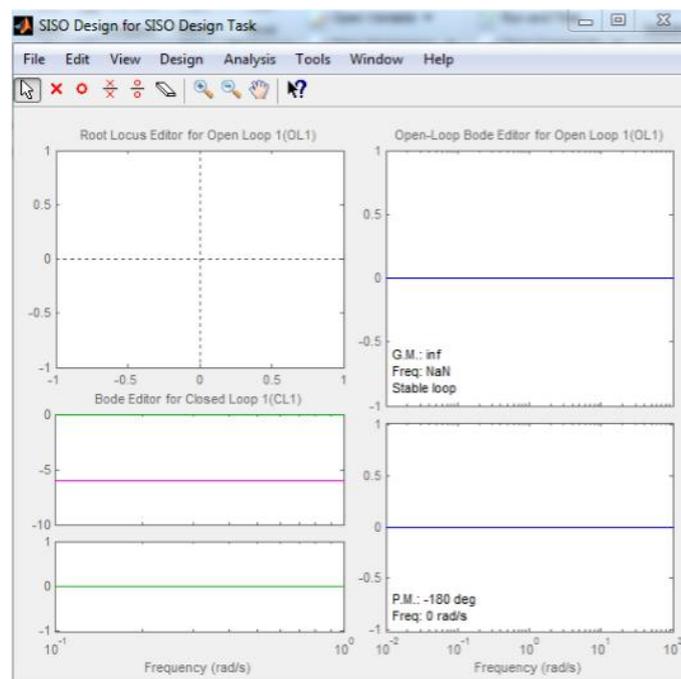


Figura 71. Ventana de análisis de plantas. *SISOTOOL*.

En el menú *File* se ingresan los nombres de las ecuaciones antes obtenidas de forma respectiva.

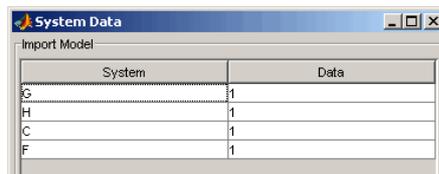


Figura 72. Ventana principal de *SISOTOOL*.

En la Figura 73 se muestra la planta de la bomba en lazo abierto sin controlador.

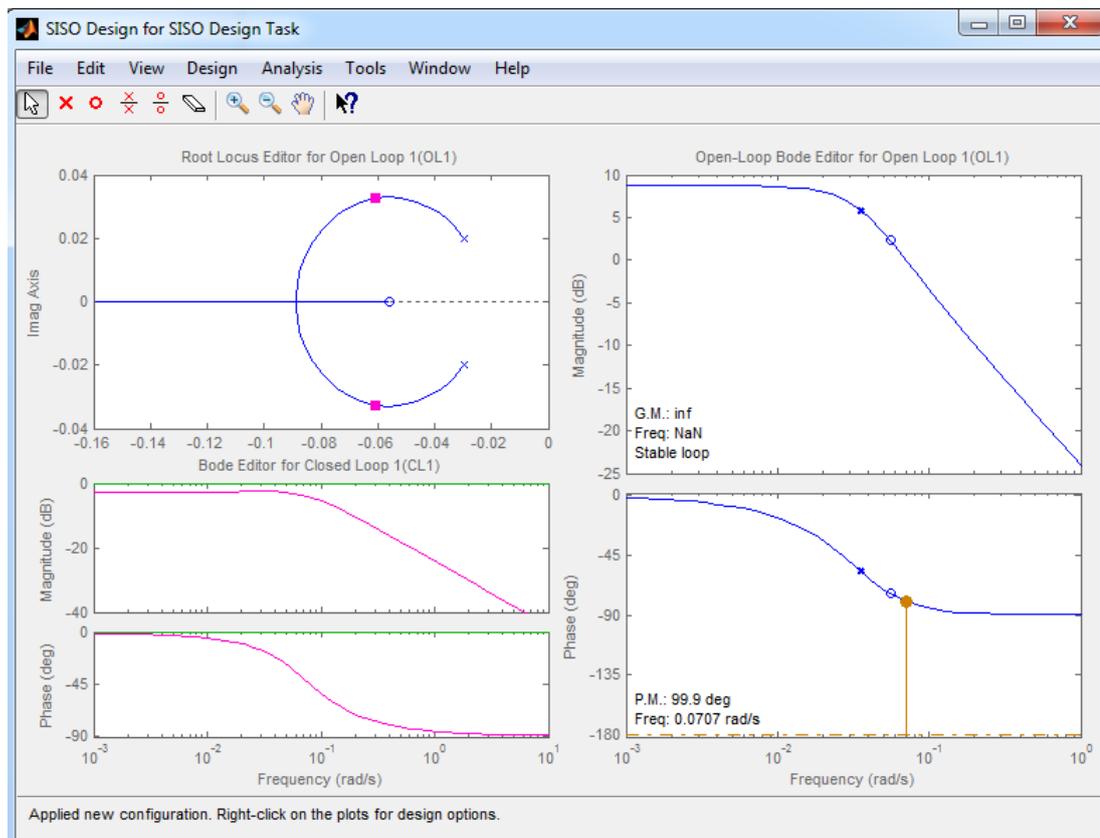


Figura 73. Resultados que muestra *SISOTOOL* al ingreso de la planta del sistema sin controlador.

De la Figura 73 podemos analizar dos puntos importantes del comportamiento de la planta aun sin aplicar el controlador.

- En el diagrama de Bode, el margen de fase MF es de 99.9° y el margen de ganancia MG es infinito, ambos positivos. Este hecho indica que la planta es estable.

- En el diagrama LGR, los polos están ubicados en el semiplano izquierdo del plano s lo cual indica estabilidad. Sin embargo, al tener 2 polos imaginarios conjugados, el sistema se vuelve oscilatorio en el régimen transitorio.

Una vez analizado el comportamiento propio de la planta, aplicamos el controlador diseñado para analizar la respuesta.

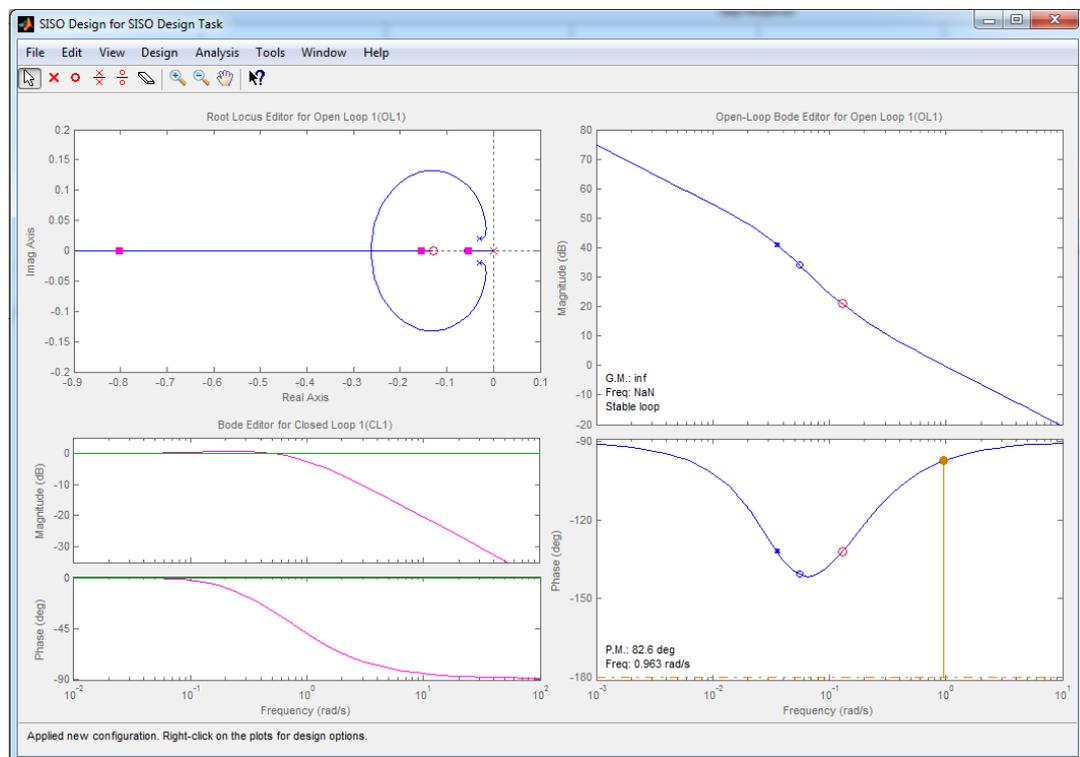


Figura 74. Resultados que muestra SISOTOOL al ingreso de la planta del sistema con controlador.

De la Figura 74 podemos analizar dos puntos importantes de mucho interés que son claros indicadores de estabilidad:

- Según se puede observar en el diagrama de Bode mostrado en la figura 84, el margen de fase MF es de 82.6° y el margen de ganancia MG es infinito, ambos positivos. Este hecho indica que la planta es estable.
- Como se puede observar del diagrama LGR, los polos después de aplicar el controlador se han acercado más al eje real, ubicados en el

semiplano izquierdo del plano s . Este movimiento de los polos complejos conjugados determina que el sistema gana estabilidad eliminando en gran parte las oscilaciones.

Con la ayuda de comandos de *sisotool*, se ingresa el controlador diseñado con anterioridad y se crea la respuesta a un impulso en lazo cerrado de un sistema controlado.

Como se puede observar en la Figura 75, existe un error de 8% como sobre impulso. Este valor no afecta nuestro control ya que no lo realizaremos en el régimen transitorio, sin embargo, se realiza una corrección con la finalidad de que el controlador cumpla con los mejores parámetros de control posible.

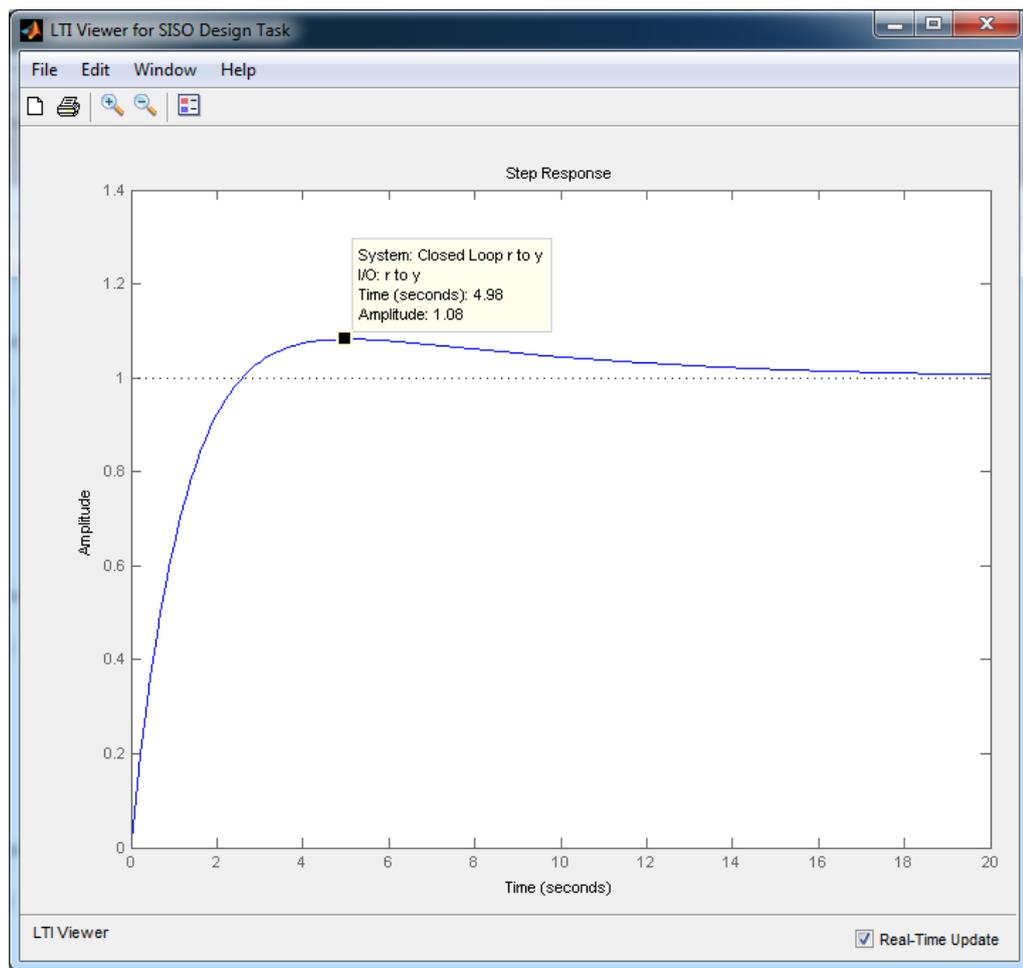


Figura 75. Respuesta de la planta a un impulso unitario con controlador en lazo cerrado.

Para reducir el sobre impulso variamos manualmente la constante k_p . En primera instancia aumentamos en 5 unidades la constante obteniendo esta respuesta.

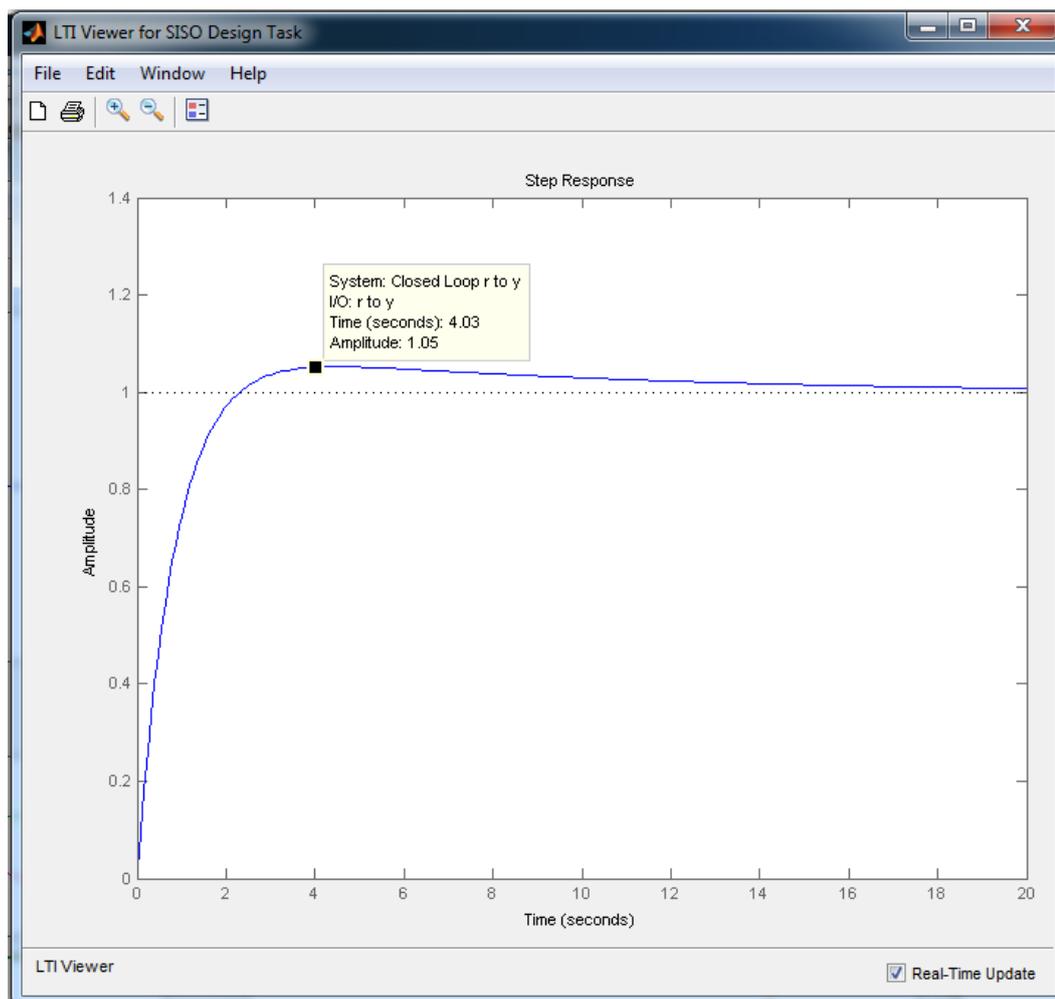


Figura 76. Respuesta de la planta a un impulso unitario con controlador corregido en lazo cerrado.

Como se puede observar en la gráfica, el error de sobrepico se ha reducido al 5%. Realizamos una nueva modificación aumentando el valor k_p en 5 unidades más. El resultado obtenido es el siguiente:

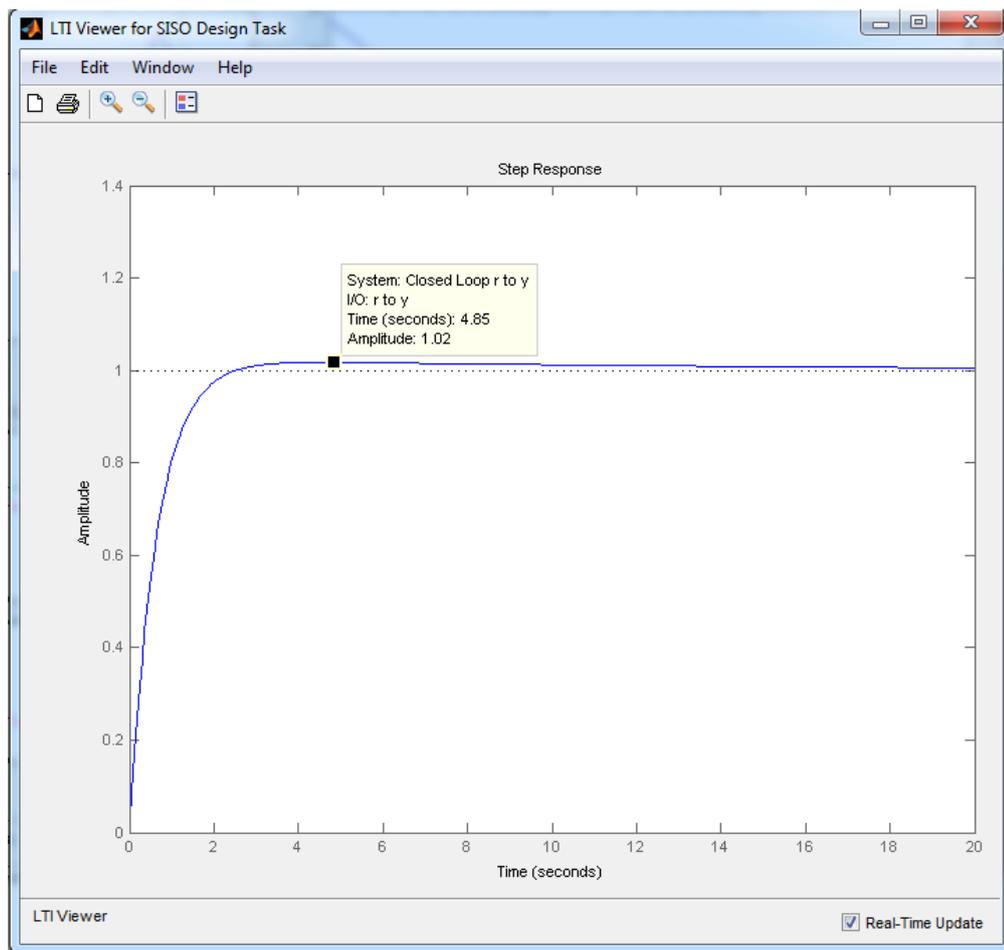


Figura 77. Respuesta de la planta a un impulso unitario con controlador corregido en lazo cerrado.

Con la última corrección el error ha alcanzado un 2% equivalente a 30 PSI. De esta forma concluimos con el diseño del controlador.

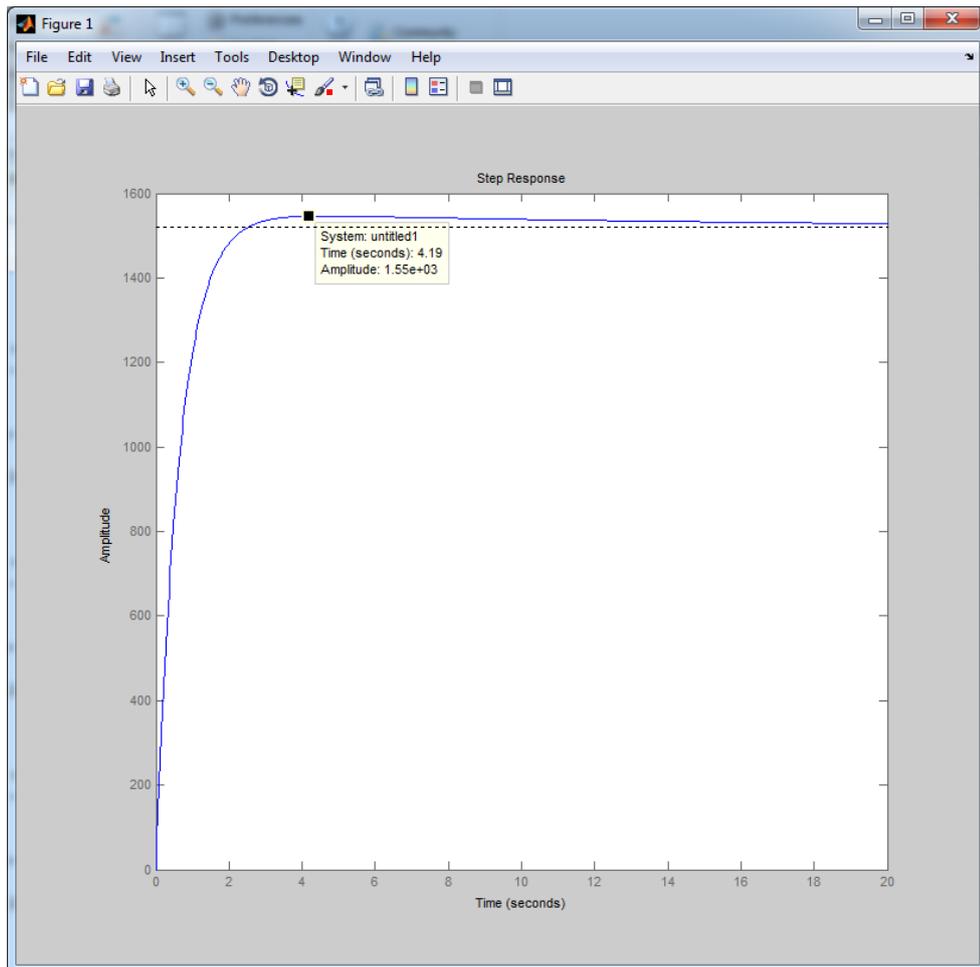


Figura 78. Respuesta de la planta a un impulso con valor del set point con controlador en lazo cerrado.

Las constantes obtenidas fueron:

$$k_p = 25,34$$

$$k_i = 1,98$$

Debido a que el procedimiento de operación indica que se operará automáticamente después de haber llegado al punto de operación, el valor más importante a considerar es el error en estado estacionario e_{SS} y como se puede observar en la simulación, este error está totalmente corregido con el controlador modelado.

4.2 PROGRAMACIÓN DEL PAC T2750 MEDIANTE LINTOOLS

La programación del PAC T2750 para realizar el control del poliducto Ambato Riobamba, se lo realiza mediante bloques, lenguaje característico de estos controladores siguiendo la lógica de control.

4.2.1 LÓGICA DE CONTROL

La puesta en marcha del sistema de bombeo se realizará en dos partes: la primera es el arranque donde se trabajará con una rampa de 30 segundos hasta llegar el punto de consigna que depende de cada combustible y una vez alcanzado este punto, se cambia a modo automático donde se mantendrá estable este punto de operación. En el anexo 6 se puede observar los diagramas de flujo que indican a detalle el uso de las señales del PLC.

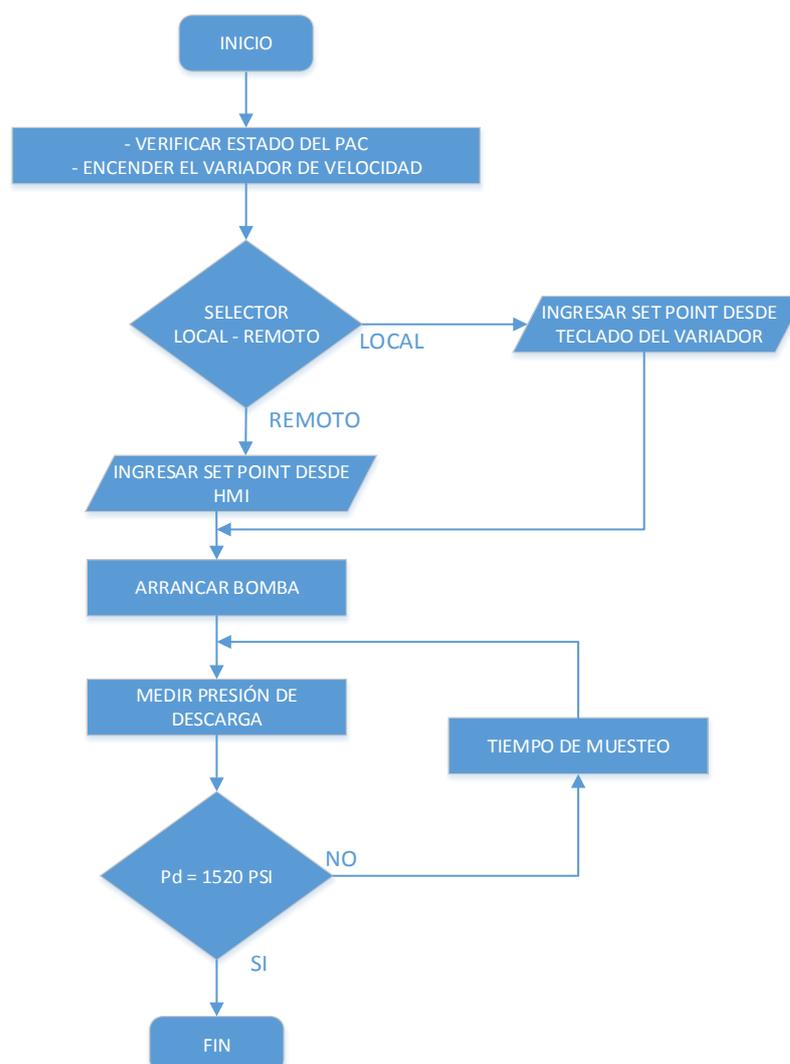


Figura 79. Diagrama de flujo del arranque de las bombas.

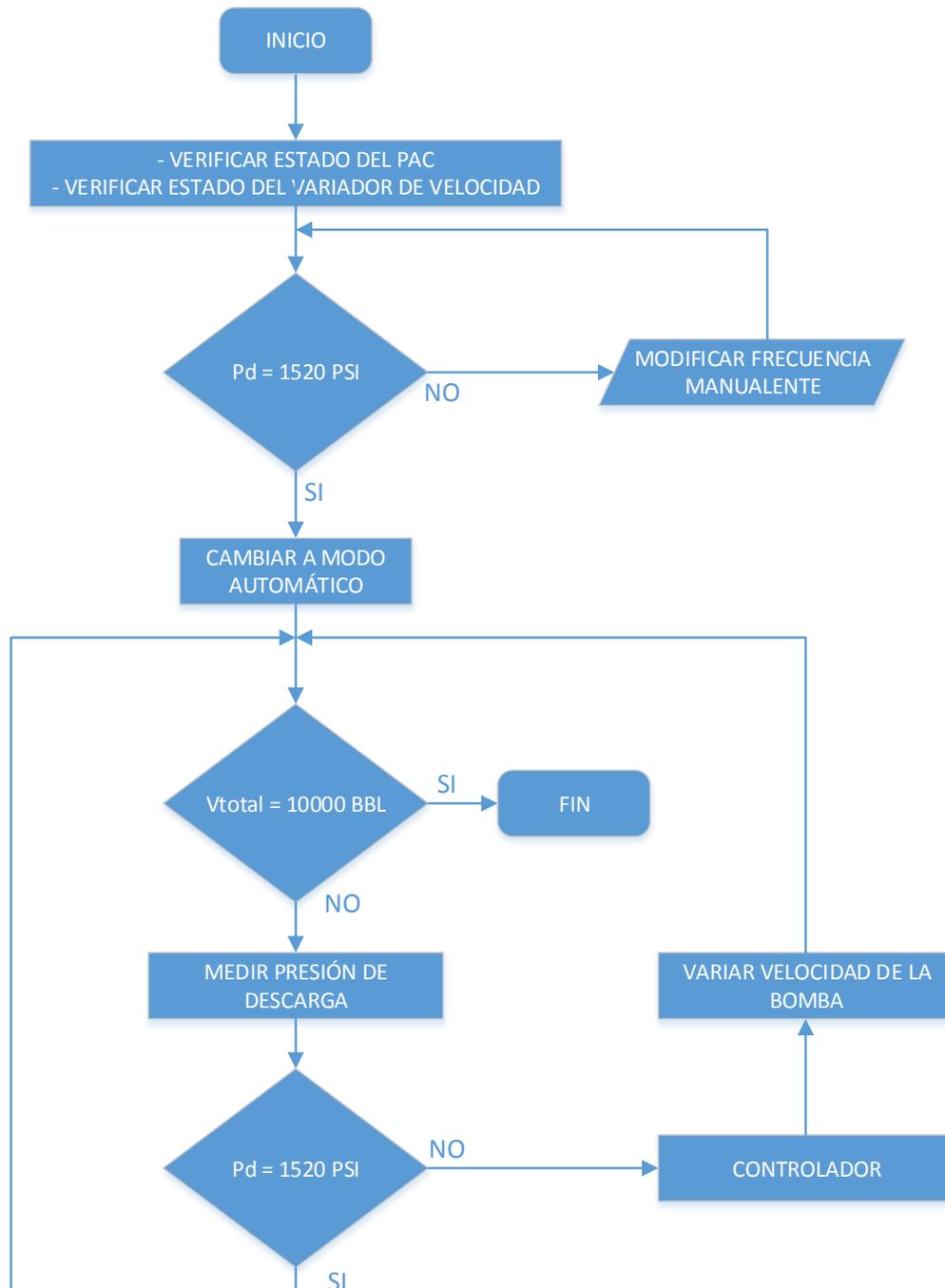


Figura 80. Lógica de control de presión.

4.2.2 PROGRAMACIÓN BLOQUE DE BOMBAS

Para la programación del control de las bombas primero creamos el bloque base donde se encontraran los bloques y lógicas de control

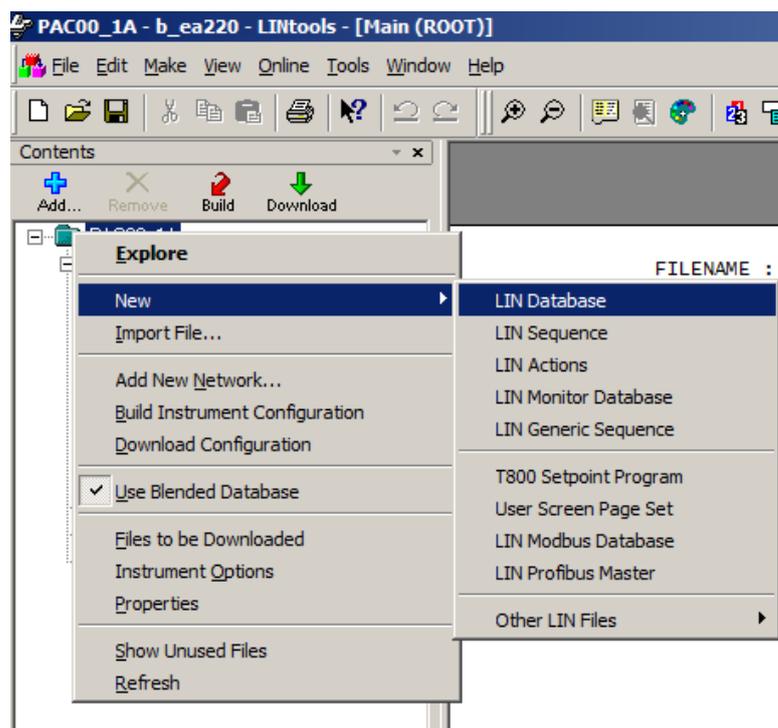


Figura 81. Creación de bloque.

Dentro del bloque creado b_ea220 se ingresa la lógica de control del tren de funcionamiento de la bomba 220, esto es las válvulas y el motor. Además se incluye el bloque del controlador PID que será configurado con las constantes calculadas en la sección 4.1.2.

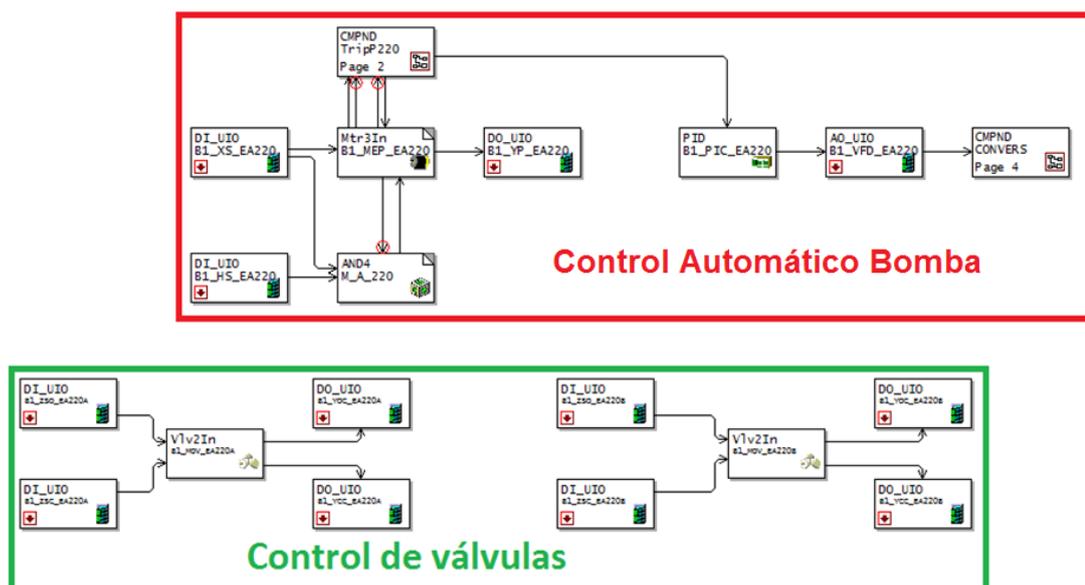


Figura 82. Programación de las bombas.

A continuación se muestran las propiedades de los bloques de programación del motor, el bloque PID y las válvulas.

Block: B1_MEP_EA220		Comment	Connections		
TagName	B1_MEP_EA220			LIN Name	MEP220
Type	Mtr3In			DBase	<local>
Task	3 (110ms)			Rate	0
Method	Template			Alarms	
Mode	Manual	AUTO		Demand	TRUE
ModeAct	00000000			DscrpTmr	0.000
				DscrpTim	20.00
→ Running	FALSE			PulseTmr	0.000
Ready	TRUE			PulseTim	5.000
→ Healthy	TRUE			State	Stopped
AutoDmnd	FALSE			StateAct	00000000
↔ IntlockP	00000000	ESD		Status	>0012
InkValP	FALSE			Hardware	00000000
↔ IntlockS	00000000			Options	>000C
InkValS	TRUE				

Figura 83. Propiedades del bloque de los motores de las bombas.

Block: B1_PIC_EA220		Comment	Connections		
TagName	B1_PIC_EA220			LIN Name	PIC220
Type	PID			DBase	<local>
Task	3 (110ms)			Rate	0
Mode	AUTO			Alarms	
FallBack	AUTO			HAA	100.0 Eng
→ PV	0.00	Eng		LAA	0.00 Eng
SP	0.00	Eng		HDA	100.0 Eng
OP	0.0	%		LDA	100.0 Eng
SL	0.00	Eng		TimeBase	Secs
TrimSP	0.00	Eng		XP	100.0 %
RemoteSP	0.00	Eng		TI	0.00
Track	0.0	%		TD	0.00
HR_SP	60.00	Eng		Options	01101100
LR_SP	0.00	Eng		SelMode	00000000
HL_SP	60.00	Eng			
LL_SP	0.00	Eng			

Figura 84. Propiedades del bloque PID.

Block: B1_MOV_EA220A		Comment	Connections		
TagName	B1_MOV_EA220A			LIN Name	MOV220A
Type	Vlv2In			DBase	<local>
Task	3 (110ms)			Rate	0
Method	Template			Alarms	Ver 6
Mode	Manual			Demand	TRUE
ModeAct	00000000			DscrpTmr	0.000 Secs
				DscrpTim	42.00 Secs
→ OpLimSw	TRUE			PulseTmr	0.000 Secs
→ CILimSw	FALSE			PulseTim	5.000 Secs
AutoDmnd	FALSE			State	Open
				StateAct	00000000
IntlockP	00000000			Status	>0000
InkValP	FALSE			Hardware	00000000
IntlockS	00000000			Options	>0018
InkValS	FALSE			Reset	FALSE
Claims	00000000				
Acks	00000000				

Figura 85. Propiedades del bloque de las válvulas.

El siguiente paso es determinar los permisos que harán que los motores de las bombas se detengan para evitar cualquier daño o mal funcionamiento en el proceso o equipos.

Los permisos son los siguientes:

- Temperaturas de los devanados de los motores menores a 90°C.
- Temperatura de los rodamientos de los motores menores a 120°C.
- Temperatura de los rodamientos de las bombas menores a 88°C.
- Encendido del sistema de refrigeración de las bombas. Siempre prendida.
- Caudal en la tubería no menor a 0,02 m³/s (320 GPM).
- Temperatura de filtros RLC menor a 180°C.

Con estos permisos, se procede a la programación de los mismos en LINTools como se muestra en la figura a continuación:

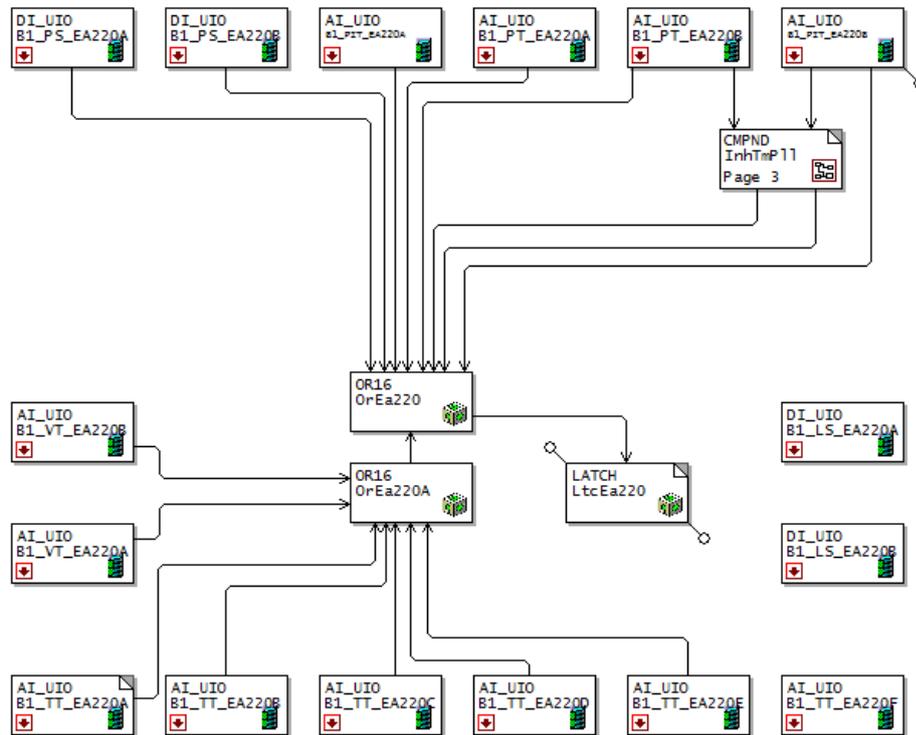


Figura 86. Permisivos para el control del motor de la bomba.

La programación de los permisos se puede observar en el diagrama de flujo del anexo 6.

4.2.3 PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR

El bloque de programación del controlador PID en el PLC requiere el ingreso de las constantes calculadas antes en el diseño. Sin embargo, estas constantes no se pueden ingresar sin antes operarlas para ajustarlas a los requerimientos del bloque.

Las constantes obtenidas fueron:

$$k_p = 25,34$$

$$k_i = 1,98$$

La ecuación del controlador diseñado en términos generales es

$$G_C = k_p + \frac{k_i}{s}$$

Sin embargo se debe realizar una conversión cumpliendo las siguientes ecuaciones

$$K = k_p \quad \Lambda \quad T_i = \frac{K}{k_i}$$

De modo que las constantes que ingresaremos en la programación del PLC serán:

$$K = XP = 25,34$$

$$T_i = 12,79$$

$$T_D = 0$$

TimeBase	Secs
XP	25.3
TI	12.79
TD	0.00

Figura 87. Configuración de constantes en bloque PID

CAPITULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo se describen las pruebas que se realizaron durante el desarrollo del proyecto y los resultados obtenidos. En primer lugar se ejecutaron las pruebas preliminares las cuales corresponden a pruebas individuales realizadas en los instrumentos y válvulas, además de las pruebas de comunicación entre el entorno ArchestrA con el PLC. Finalmente se realizaron pruebas del sistema de bombeo completo donde intervienen los instrumentos, bombas, PLC y demás equipos que aportan con datos de monitoreo y control.

5.1 PRUEBAS PRELIMINARES

Aquí se describen las pruebas individuales aplicadas a los instrumentos y equipos tales como pruebas de alimentación, pruebas de lazo y pruebas de comunicación.

5.1.1 INSTRUMENTACIÓN

Las pruebas aplicables a los instrumentos instalados en el proyecto entero son básicamente las pruebas de lazo y las pruebas de comunicación (para los equipos que apliquen). Toda la instrumentación y equipos fueron adquiridos con certificados de calibración (ver anexo 8) para los rangos de presión especificados en los datasheets (ver anexo 7) por lo que no es necesario un proceso de calibración y verificación para ninguno de ellos.

Las pruebas de lazo de instrumentación consisten, en primer lugar en verificar el correcto energizado y encendido de los mismos. Después se comprueba que las señales sean recibidas en el PLC y finalmente se verifica que los estados y medidas sean visualizados en el HMI.



Figura 88. Indicadores de estados en PAC T2750.



Figura 89. Transmisor de presión en pruebas de lazo. Lectura en campo

El resultado obtenido de estas pruebas se puede observar en la siguiente tabla:

		REGISTRO					RE-PRY-INS-002		
		PRUEBAS DE LAZO							
1 de 1							Revision 0		
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN POLIDUCTO AMBATO RIOBAMBA					FECHA: 28/01/2014				
UBICACIÓN: ESTACIÓN DE BOMBEO AMBATO					TAG/IDENTIFICACION: EA				
TAG INSTRUMENTO	INFORMACION DEL PROCESO	AREA	SEÑAL		DISTRIBUCION DE SEÑALES	SLOT	CANAL	CHECK	
	FUNCION		TIPO	SALIDA	PLC/RIO				
PIT 220AK	Transmisor Indicador de Presión	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_PIT_EA220A	9	1	OK	
PIT 220BK	Transmisor Indicador de Presión	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_PIT_EA220B	12	3	OK	
TIT 220BK	Transmisor Indicador de Temperatura	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_TIT_EA220B	13	1	OK	
PT 1.01A	Transmisor de Presión	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_PT_EA220A	9	2	OK	
PT 1.02A	Transmisor de Presión	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_PT_EA220B	9	3	OK	
TT 220A	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_TT_EA220A	10	1	OK	
TT 220B	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_TT_EA220B	10	2	OK	
TT 220C	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_TT_EA220C	10	3	OK	
TT 220D	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_TT_EA220D	11	1	OK	
TT 220E	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_TT_EA220E	11	2	OK	
TT 220F	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_TT_EA220F	11	3	OK	
VT 220A	Transmisor de Vibración	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_VT_EA220A	12	1	OK	
VT 220B	Transmisor de Vibración	Unidad de Bombas/220	AI	4-20 mA	B1_VT_EA220B	12	2	OK	

Continúa →

MOV 220AC	Status de apertura	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_ZSO_EA220A	3	5	OK
MOV 220AC	Status de cierre	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_ZSC_EA220A	3	6	OK
MOV 220BC	Status de apertura	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_ZSO_EA220B	3	8	OK
MOV 220BC	Status de cierre	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_ZSC_EA220B	3	9	OK
PS 220A	Switch de presión en la succión	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_PS_EA220A	3	10	OK
PS 220B	Switch de presión en la descarga	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_PS_EA220B	3	11	OK
LS 220A	Switch de nivel en el reservorio	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_LS_EA220A	3	12	OK
LS 220B	Switch de nivel en el reservorio	Unidad de Bombas/220	DI	0/1	B1_LS_EA220B	3	13	OK
MOV 220AC	Comando de apertura	Unidad de Bombas/220	DO	0/1	B1_YOC_EA220A	5	5	OK
MOV 220AC	Comando de cierre	Unidad de Bombas/220	DO	0/1	B1_YCC_EZ220A	5	6	OK
MOV 220BC	Comando de apertura	Unidad de Bombas/220	DO	0/1	B1_YOC_EA220B	5	7	OK
MOV 220BC	Comando de cierre	Unidad de Bombas/220	DO	0/1	B1_YCC_EZ220B	5	8	OK
	SUPERVISOR OFFSHORE INDIGI	QA/QC OFFSHORE INDIGI				CLIENTE EPPETROECUADOR		
NOMBRE:	Diego Lascano	Mónica Pazmiño				Fabricio Rosero		
FIRMA:								
FECHA:	28/01/2014	28/01/2014				28/01/2014		

 OFFSHORE IN.DI.GI.		REGISTRO						RE-PRY-INS-002	
		PRUEBAS DE LAZO						 EP PETROECUADOR	
1 de 1								Revision 0	
PROYECTO: CONSTRUCCIÓN POLIDUCTO AMBATO RIOBAMBA					FECHA: 28/01/2014				
UBICACIÓN: ESTACIÓN DE BOMBEO AMBATO					TAG/IDENTIFICACION: EA				
TAG INSTRUMENTO	INFORMACION DEL PROCESO		SEÑAL		DISTRIBUCION DE SEÑALES	SLOT	CANAL	CHECK	
	FUNCION	AREA	TIPO	SALIDA	PLC/RIO				
PIT 221AK	Transmisor Indicador de Presión	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_PIT_EA221A	9	1	OK	
PIT 221BK	Transmisor Indicador de Presión	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_PIT_EA221B	12	3	OK	
TIT 221BK	Transmisor Indicador de Temperatura	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_TIT_EA221B	13	1	OK	
PT 1.01B	Transmisor de Presión	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_PT_EA221A	9	2	OK	
PT 1.02B	Transmisor de Presión	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_PT_EA221B	9	3	OK	
TT 221A	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_TT_EA221A	10	1	OK	
TT 221B	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_TT_EA221B	10	2	OK	
TT 221C	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_TT_EA221C	10	3	OK	
TT 221D	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_TT_EA221D	11	1	OK	
TT 221E	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_TT_EA221E	11	2	OK	
TT 221F	Transmisor de Temperatura	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_TT_EA221F	11	3	OK	
VT 221A	Transmisor de Vibración	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_VT_EA221A	12	1	OK	

Continúa →

VT 221B	Transmisor de Vibración	Unidad de Bombas/221	AI	4-20 mA	B2_VT_EA221B	12	2	OK
MOV 221AC	Status de apertura	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_ZSO_EA221A	3	5	OK
MOV 221AC	Status de cierre	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_ZSC_EZ221A	3	6	OK
MOV 221BC	Status de apertura	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_ZSO_EA221B	3	8	OK
MOV 221BC	Status de cierre	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_ZSC_EA221B	3	9	OK
PS 221A	Switch de presión en la succión	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_PS_EA221A	3	10	OK
PS 221B	Switch de presión en la descarga	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_PS_EA221B	3	11	OK
LS 221A	Switch de nivel en el reservorio	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_LS_EA221A	3	12	OK
LS 221B	Switch de nivel en el reservorio	Unidad de Bombas/221	DI	0/1	B2_LS_EA221B	3	13	OK
MOV 221AC	Comando de apertura	Unidad de Bombas/221	DO	0/1	B2_YOC_EA221A	5	5	OK
MOV 221AC	Comando de cierre	Unidad de Bombas/221	DO	0/1	B2_YCC_EZ221A	5	6	OK
MOV 221BC	Comando de apertura	Unidad de Bombas/221	DO	0/1	B2_YOC_EA221B	5	7	OK
MOV 221BC	Comando de cierre	Unidad de Bombas/221	DO	0/1	B2_YCC_EA221B	5	8	OK
	SUPERVISOR OFFSHORE INDIGI	QA/QC OFFSHORE INDIGI				CLIENTE EPPETROECUADOR		
NOMBRE:	Diego Lascano	Mónica Pazmiño				Fabricio Rosero		
FIRMA:								
FECHA:	28/01/2014	28/01/2014				28/01/2014		

5.1.2 EQUIPOS

Para los equipos es importante realizar la prueba de alimentación, pruebas de lazo y comunicación.

5.1.2.1 Válvulas motorizadas

Las pruebas aplicadas a las válvulas motorizadas son las siguientes.

Energización

Las válvulas constan con un control electrónico que permite conectar las 3 fases de alimentación en cualquier orden y aun así obtener el mismo funcionamiento correcto en la válvula. La prueba de energización consiste en llevar el guardamotor al estado 1 y verificar que la válvula funcione correctamente. Es importante que antes de energizar la válvula se realicen mediciones de continuidad y de aislamiento para descartar un corto circuito en la alimentación eléctrica.



Figura 90. Válvula energizada y encendida.

Después de energizar, se verificó que las 4 válvulas están correctamente alimentadas. Se pudo observar en los displays la inicialización

de las válvulas y se comportaron acorde a las pruebas de apertura y cierre con el comando local.

Control

Después de confirmado que las señales están correctamente cableadas, se procedió con las pruebas de control para lo cual mediante el HMI desde el cuarto de control, se enviaron los comandos de abrir y cerrar a las 4 válvulas dentro del SKID de bombeo.

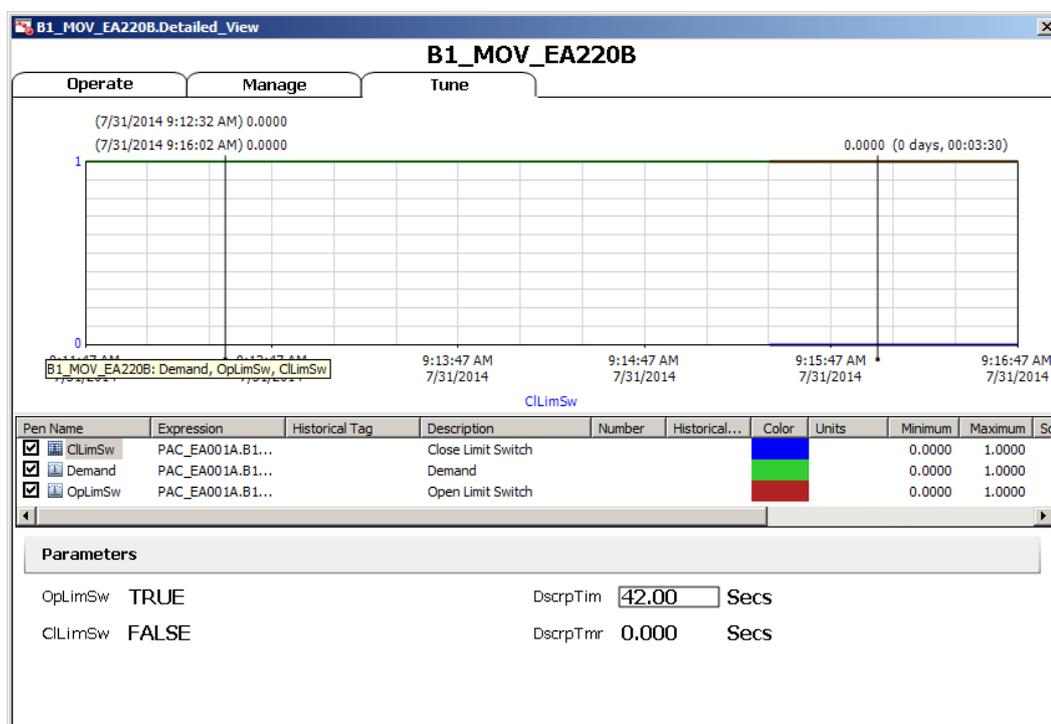


Figura 91. Pruebas de cambio de estados de válvula B1_MOV_EA220 en tiempo real.

El resultado obtenido fue que mediante la lectura de los estados de las válvulas, se evidenció el correcto funcionamiento tanto en apertura como en cierre de las mismas.

Tabla 22.

Pruebas de control de válvulas.

Válvula	Comando	Tiempo de transición	Status Registrado	Estado Válvula
MOV220A	Abrir	25 seg	Abierto	OK
	Cerrar	26 seg	Cerrado	OK
MOV220B	Abrir	26 seg	Abierto	OK
	Cerrar	26 seg	Cerrado	OK
MOV221A	Abrir	24 seg	Abierto	OK
	Cerrar	25 seg	Cerrado	OK
MOV221B	Abrir	27 seg	Abierto	OK
	Cerrar	28 seg	Cerrado	OK

Comunicación

La prueba de comunicación se realiza en primera instancia desde la Estación Maestra (Master Station). Una vez que se encuentre terminado el cableado y encendidas las válvulas se debe verificar el estado de las mismas en la pantalla táctil de la estación maestra.

El estado de la comunicación de la válvula se muestra en colores que indican lo siguiente:

- Verde. Canales A y B correctamente conectados.
- Amarillo. Solo disponible canal A.
- Azul. Solo disponible canal B.

En la siguiente fotografía se puede observar que todas las válvulas se encuentran en correcto estado.

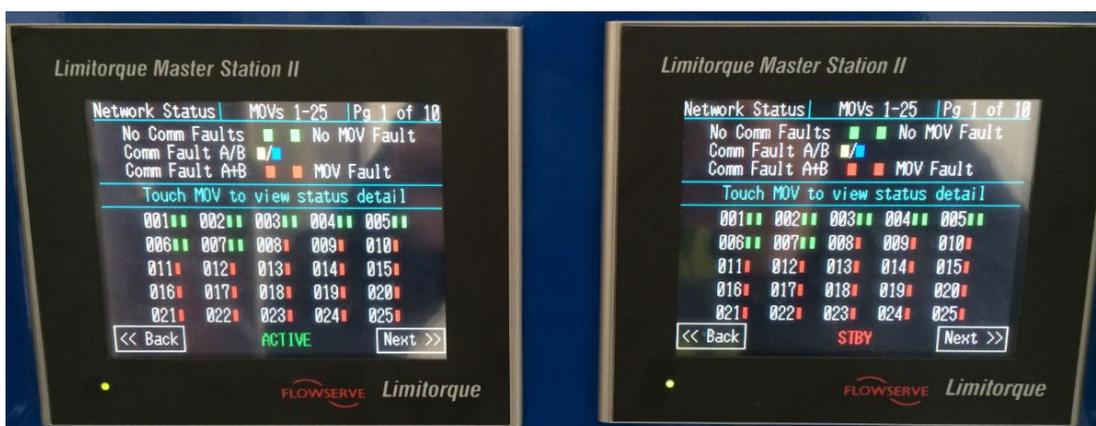


Figura 92. Status de comunicación de válvulas en Master Station

Una vez verificada la comunicación de las válvulas con la estación maestra (Master Station), se procedió a establecer la comunicación con el entorno Archestra. Mediante Modbus TCP/IP se accede a las direcciones antes mencionadas que nos permitirán visualizar diferentes parámetros como porcentaje de apertura, estado de la válvula, etc.

Data Table Example - Modbus Fc 03			
Reg. #	MOV#	Meaning	Reg. # MOV# Meaning
40001	1	Torque	40007 2 Torque
40002	1	Volts	40008 2 Volts
40003	1	AI #1	40009 2 AI #1
40004	1	AI #2	40010 2 AI #2
40005	1	Pos	40011 2 Pos
40006	1	Status	40012 2 Status

Figura 93. Mapa Modbus Estación Maestra

Se pudo observar mediante comunicación Modbus TCP/IP como variaba el estado de las válvulas en el rango 0-100% mientras estas se encontraban en la etapa de transición.

5.1.2.2 Variadores de velocidad

Una vez que los variadores están conectados a la red principal mediante sus respectivas protecciones (breaker motorizado, $I_{max} = 1000A$) es necesario realizar pruebas de arranque y de los parámetros programados en vacío, es decir, sin estar conectados a los motores eléctricos.

El procedimiento de arranque en vacío es el que se muestra en el anexo 6.

Después de aplicar este procedimiento y tomar las mediciones antes indicadas se puede observar que los voltajes entre fases fueron los esperados. Se obtuvo 460 VAC a la salida del variador, valor el cual es seteado en los parámetros según requerimiento de placa del motor eléctrico. Además se pudo comprobar que los parámetros de tiempo tales como rampas de aceleración y deceleración son exactamente los seteados en los parámetros respectivos. Estos valores fueron medidos por instrumentos externos tales como multímetros y cronómetros.

Mediante la lectura del parámetro 16 del variador que muestra la lectura de la entrada analógica 1, se pudo observar que el variador de frecuencia incrementa su frecuencia de salida de forma lineal, es decir, 4 mA corresponden a 30 Hz y 20 mA a 60 Hz.

Finalmente, mediante Modbus TCP/IP se pudo comprobar en las estaciones de trabajo (WorkStation) que la comunicación con los VFD está correctamente configurada ya que se puede leer los parámetros deseados tales como corriente o frecuencia de salida.

5.1.2.3 Pruebas de motores eléctricos

Una vez que se tienen conectados los motores a los variadores, es importante realizar la prueba de sentido de giro del motor en vacío ya que una vez que se instala el matrimonio con la bomba, no se puede mover la bomba en sentido contrario.

Para realizar la prueba del sentido de giro lo único que se debe hacer es arrancar los motores y verificar que la rotación del motor sea el indicado en la bomba para lo cual aplicamos el procedimiento de verificación de sentido de giro indicado en el anexo 6. En caso de que el sentido de giro no sea el requerido, se puede intercambiar 2 de las 3 fases que van hacia el motor lo cual invertiría el sentido de giro.

Después que se ha probado el sentido de giro de los motores, se debe realizar la prueba de operación desde el cuarto de control para lo cual seguimos el procedimiento de arranque en vacío indicado en el anexo 6.

Se observó que el motor puede ser arrancado y detenido sin ningún inconveniente desde el cuarto de control. Además, el comportamiento del motor es el esperado ya que se pudo comprobar que la frecuencia seteada en marcha desde el computador variaba la velocidad del el motor según lo requerido.



Figura 94. Prueba de arranque de motor en vacío. Verificación de parámetros

5.2 SISTEMA DE CONTROL

Las pruebas fueron realizadas con la bomba EA_B_220. Para medir el resultado del sistema de control se tomaron los datos históricos en el software *Historian Client* de *Woderware*. Todas las variables se encuentran historizadas en el servidor número 2.

Para cada prueba se ha tomado un período de tiempo sobre el cual se analizó el comportamiento.

Es importante recalcar que para poder medir el desempeño del sistema de control, se debe obtener un error el cual será determinado con la lectura de la variable de control obtenida y el valor de presión requerido para cada combustible. Como se indica en la sección 2, estos seteos fueron extraídos del estudio hidráulico del proceso (CONSPECCIME, 2013).

5.2.1 DIESEL PREMIUM

Los datos obtenidos se presentan en dos vectores como se indica en la siguiente muestra de datos:

Tabla 23.

Muestra de datos obtenidos para el Diésel Premium.

Tiempo	Presión [psi]
7:16:00.000	369
7:16:06.016	367
7:16:06.999	366
7:16:12.912	364
7:16:13.910	363
7:16:19.822	361
7:16:20.805	360
7:16:24.752	359
7:16:25.735	359
7:16:26.718	360
7:16:32.536	390
7:16:33.519	407
7:16:39.354	503
7:16:40.336	520

De los datos obtenidos se obtiene la siguiente figura, donde se puede ver como evoluciona en el tiempo la variable B1_PIT_EA220B, que es la presión de descarga. Además se identifica en color verde el set point para el combustible Diésel Premium que es de 10480 kPa (1520 psi).

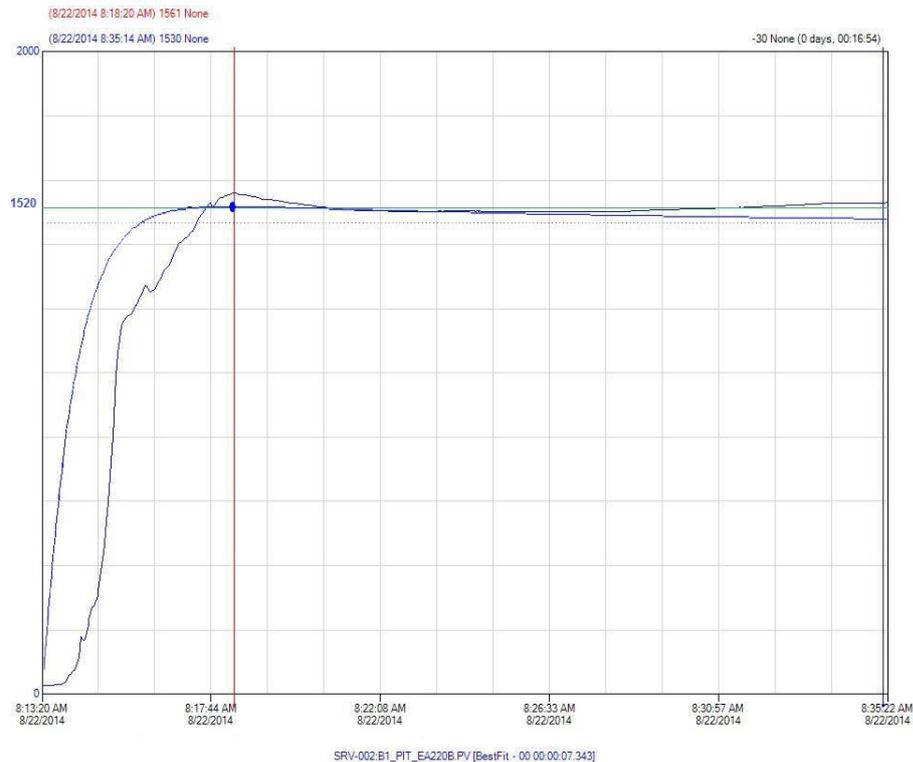


Figura 95. Presión de descarga con Diésel Premium

Para medir el resultado de nuestro controlador implementado, se debe analizar el comportamiento de la presión de descarga de la bomba en operación.

Como se puede observar en la Figura 95, se presentan puntos donde la presión difiere del setpoint, sin embargo se puede ver que mientras el tiempo transcurre, la variable alcanza la estabilidad en un valor aproximado al setpoint.

Los errores más notables se presentan el momento en que se cambia de control manual a control automático. Determinaremos el porcentaje de error tomando como puntos de medición, los valores que se pueden observar en la leyenda de la imagen en la esquina superior izquierda. Se

muestra en color rojo tanto el texto como la línea que indica el punto máximo de presión y de color azul, el texto y la línea que indica el estado estable.

Se determinó el error relativo según la siguiente fórmula:

$$e_1 = \frac{SP - P_d}{SP} * 100$$

Donde:

SP : setpoint o punto de deseo (1520 psi para Diésel).

P_d : Presión de descarga. Medida real

El error obtenido en la presión máxima medida es:

$$e_1 = \frac{(1520 - 1561) \text{ psi}}{1520 \text{ psi}} * 100$$

$$e_1 = -2.70\%$$

El error obtenido en estado estable es:

$$e_2 = \frac{SP - P_d}{SP} * 100$$

$$e_2 = \frac{(1520 - 1530) \text{ psi}}{1520 \text{ psi}} * 100$$

$$e_2 = -0.66\%$$

5.2.2 GASOLINA EXTRA

La siguiente muestra de datos es la obtenida en la prueba con gasolina extra:

Tabla 24.

Muestra de datos obtenidos para la Gasolina Extra.

Tiempo	Presión
7:05:00.000	184
7:05:00.257	184
7:05:01.255	184
7:05:05.187	184

Continúa →

7:05:07.152	184
7:05:10.038	184
7:05:12.940	213
7:05:13.923	219
7:05:19.819	277
7:05:20.802	277
7:05:25.732	303
7:05:26.715	305
7:05:32.627	327
7:05:33.610	332
7:05:38.539	376

En la siguiente figura generada con los datos obtenidos en el historiador, se observa la tendencia de la presión de descarga de la bomba. De color naranja se presenta el set point para la Gasolina Extra que es de 8860 kPa (1285 psi).

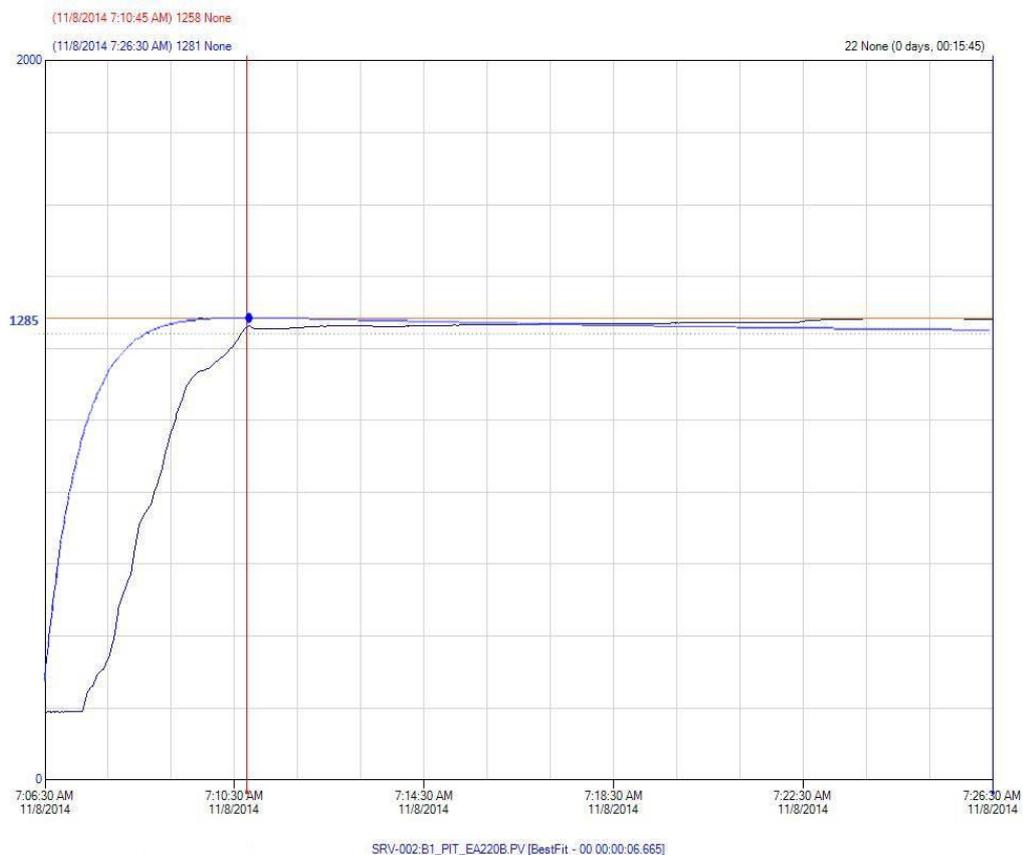


Figura 96. Presión de descarga con Gasolina Extra

En la Figura 96 se puede observar el comportamiento de la variable de control a lo largo del tiempo. Se puede ver que mientras el tiempo transcurre, la variable alcanza la estabilidad y se iguala con el setpoint.

Se determina el porcentaje de error tomando los puntos de medición con más importancia, que se pueden observar en la leyenda de la imagen en la esquina superior izquierda. Se muestra en color rojo tanto el texto como la línea que indica el punto máximo de diferencia de presión y de color azul, el texto y la línea que indica el valor de estado estable.

Se determinó el error relativo según la siguiente fórmula:

$$e_1 = \frac{SP - P_d}{SP} * 100$$

Donde:

SP : setpoint o punto de deseo (1285 psi para Gasolina Extra).

P_d : Presión de descarga. Medida real.

El máximo error obtenido en la medida es:

$$e_1 = \frac{(1285 - 1258) \text{ psi}}{1285 \text{ psi}} * 100$$

$$e_1 = 2,1\%$$

El error en estado estable obtenido es:

$$e_2 = \frac{SP - P_d}{SP} * 100$$

$$e_2 = \frac{(1285 - 1281) \text{ psi}}{1285 \text{ psi}} * 100$$

$$e_2 = 0,31\%$$

5.2.3 GASOLINA SUPER

Gracias a la disponibilidad de combustible, se pudieron realizar dos pruebas con Gasolina Súper.

5.2.3.1 Prueba 1

La siguiente muestra de datos es la obtenida en la primera prueba con gasolina súper:

Tabla 25.

Muestra de datos obtenidos para la Gasolina Súper. Prueba 1.

Tiempo	Presión
7:11:33.385	543
7:11:39.937	622
7:11:41.076	651
7:11:46.505	698
7:11:47.628	700
7:11:53.071	727
7:11:54.164	731
7:11:59.640	750
7:12:00.715	752
7:12:01.855	755
7:12:05.084	751
7:12:06.208	752
7:12:07.284	753
7:12:12.760	830
7:12:13.882	845

En la siguiente figura se puede identificar de color naranja, el set point para la Gasolina Extra que es de 8894 kPa (1290 psi). De azul se muestra el comportamiento de la presión de descarga de la bomba.

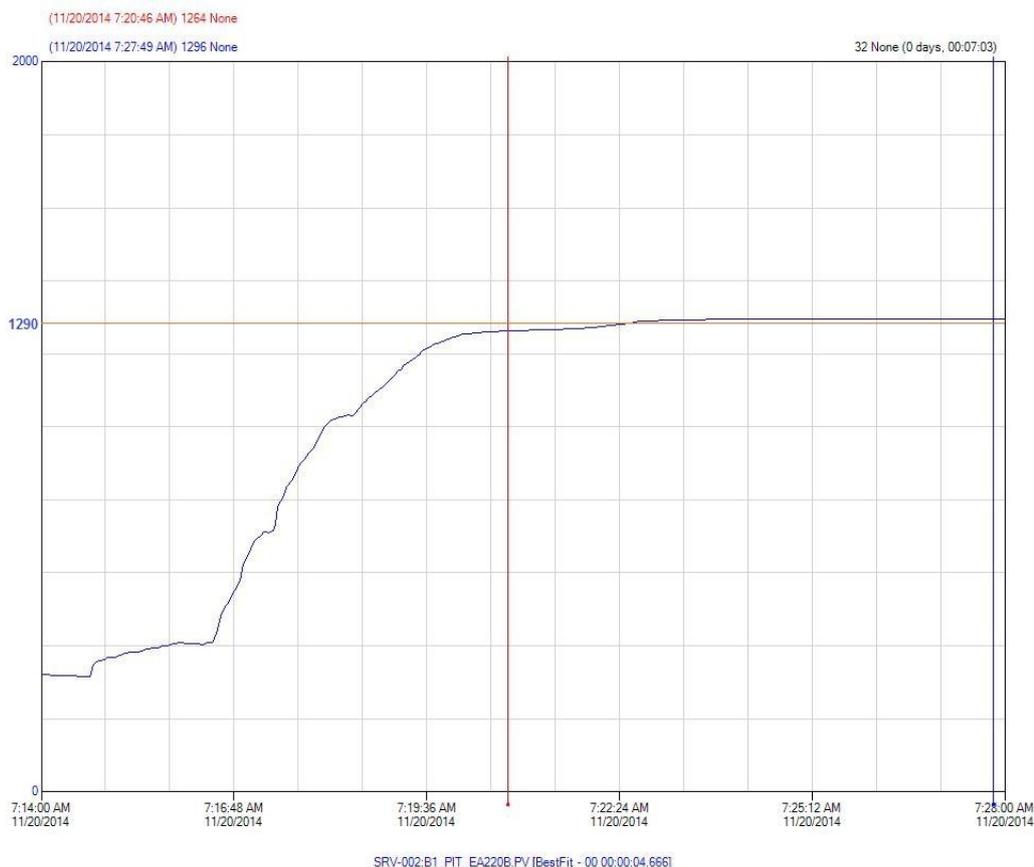


Figura 97. Presión de descarga con Gasolina Súper. Prueba 1

De igual forma que el diésel y la gasolina extra, la Figura 97 muestra el comportamiento de la variable de control a lo largo del tiempo. Se puede ver que mientras el tiempo transcurre, la variable alcanza la estabilidad y se iguala con el setpoint.

Se determina el porcentaje de error tomando los puntos de medición con más relevancia, que se pueden observar en la leyenda de la imagen en la esquina superior izquierda. En color rojo se indica el punto máximo de diferencia de presión respecto al setpoint y de color azul se indica el valor de estado estable.

Se determinó el error relativo según la siguiente fórmula:

$$e_1 = \frac{SP - P_d}{SP} * 100$$

Donde:

SP : setpoint o punto de deseo (1290 psi para Gasolina Extra).

P_d : Presión de descarga. Medida real

El máximo error obtenido en la medida es:

$$e_1 = \frac{(1290 - 1264) \text{ psi}}{1290 \text{ psi}} * 100$$

$$e_1 = 2,02\%$$

El error en estado estable obtenido es:

$$e_2 = \frac{SP - P_d}{SP} * 100$$

$$e_2 = \frac{(1290 - 1296) \text{ psi}}{1290 \text{ psi}} * 100$$

$$e_2 = -0,47\%$$

5.2.3.2 Prueba 2

La siguiente muestra de datos es la obtenida en la segunda prueba con gasolina súper:

Tabla 26.

Muestra de datos obtenidos para la Gasolina Súper. Prueba 2.

Tiempo	Presión
7:02:44.711	348
7:02:45.788	352
7:02:49.064	363
7:02:50.140	367
7:02:54.549	433
7:02:55.617	446
7:02:58.891	473
7:03:00.014	489
7:03:04.367	552
7:03:05.443	566
7:03:09.842	624
7:03:10.918	645

Continúa →

7:03:14.194	678
7:03:15.317	681
7:03:19.686	693

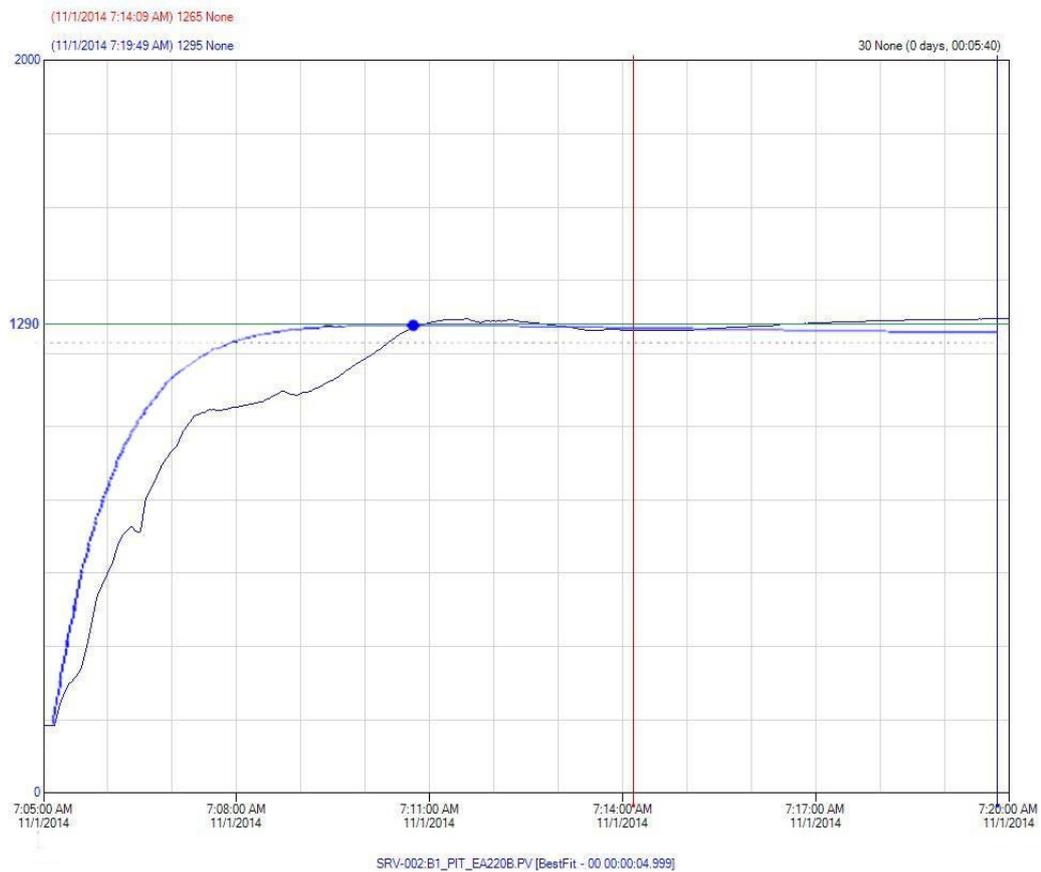


Figura 98. Presión de descarga con Gasolina Súper. Prueba 2

La Figura 98 muestra el comportamiento de la variable de control a lo largo del tiempo. Se puede ver que mientras el tiempo transcurre, la variable alcanza la estabilidad y se iguala con el setpoint.

Nuevamente determinamos el porcentaje de error tomando los dos puntos de medición antes mencionados, que se pueden observar en la leyenda de la imagen en la esquina superior izquierda.

El máximo error obtenido en la medida es:

$$e_1 = \frac{(1290 - 1265) \text{ psi}}{1290 \text{ psi}} * 100$$

$$e_1 = 1,94\%$$

El error en estado estable obtenido es:

$$e_2 = \frac{SP - P_d}{SP} * 100$$

$$e_2 = \frac{(1290 - 1295) \text{ psi}}{1290 \text{ psi}} * 100$$

$$e_2 = -0,39\%$$

5.2.4 RESUMEN

A continuación se muestra una tabla y gráficos sobre los errores obtenidos con cada producto, tanto el error máximo cuando se cambia de modo de operación y el error de estado estable que es el más importante:

Tabla 27.

Errores obtenidos en las pruebas.

Producto	Error máximo	Error Estado Estable
Gasolina Extra	2,10 %	0,31 %
Gasolina Súper Prueba 1	2,02 %	0,47 %
Gasolina Súper Prueba 2	1,94 %	0,39 %
Diésel Premium	2,07 %	0,66 %

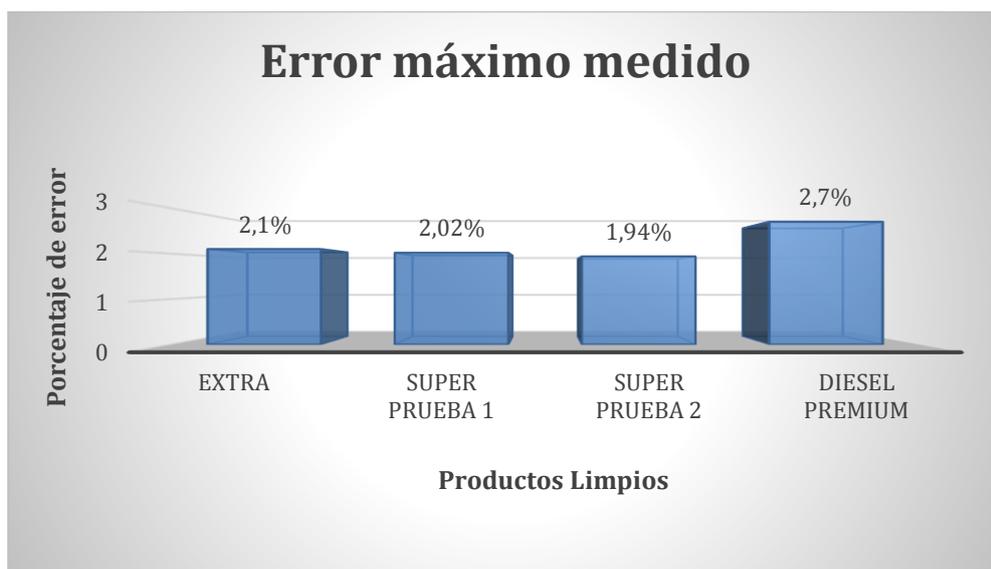


Figura 99. Error medido en las pruebas con producto.

En el este gráfico se puede observar que el error máximo obtenido es cuando se trabaja con Diésel Premium y el error más pequeño es cuando se trabaja con Gasolina Súper. Cabe recordar que este gráfico muestra los errores máximos obtenidos.

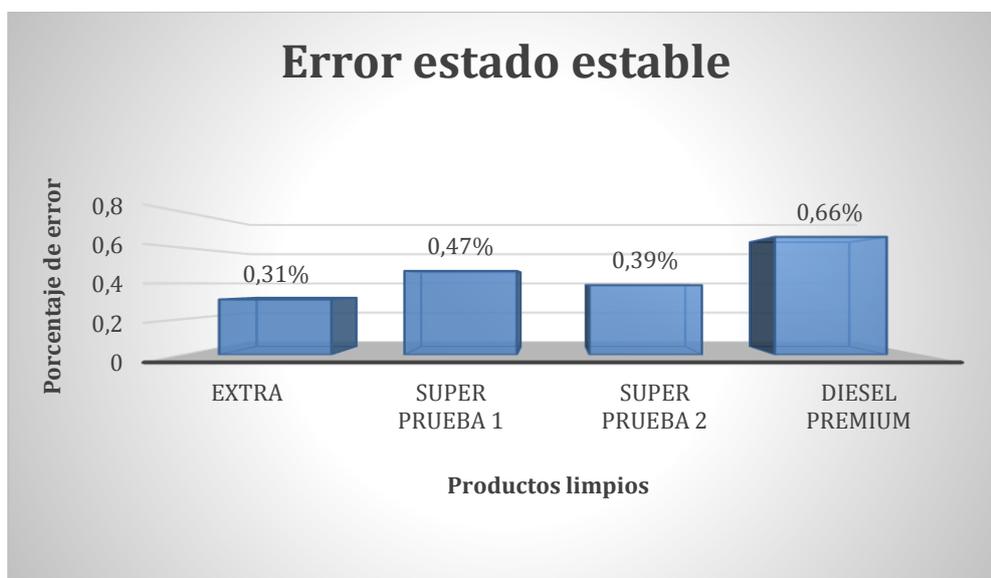


Figura 100. Error en estado estable obtenido en las pruebas

El error más relevante para nuestro control es el de estado estacionario. Como se puede observar en la imagen, los errores en estado estable son muy

pequeños dando como error máximo un 0,66% con Diésel Premium que equivale a 69 kPa (10 psi). El error más pequeño se encontró cuando se estaba bombeando Gasolina Extra. Este error de 0,31% equivale a 28 kPa (4 psi).

Con estos resultados obtenidos se consiguió que el poliducto Ambato - Riobamba opere de forma satisfactoria. Controlando la presión de descarga de la bomba dentro de los parámetros antes demostrados, se logró transportar los productos limpios de forma continua y segura a lo largo de los 50km que comprende el poliducto.

5.3 COSTOS OPERATIVOS

Una vez que el Poliducto Ambato – Riobamba se ha puesto en operación, ha sido posible hacer una comparativa de costos de operación.

Antes del PAR (Poliducto Ambato – Riobamba), el transporte de combustibles entre estas dos ciudades se lo realizaba mediante autotankers alquilados por EP Petroecuador. El costo del viaje de un autotanker de 10000 gls tiene un costo de aproximadamente 200 dólares y el volumen de producto a transportar por semana es de 1590 m^3 (420000 gls)

De los datos anteriores podemos obtener los siguientes resultados:

Tabla 28.

Costo mensual operativo con autotankers

Capacidad autotanker	Costo por viaje	Volumen mensual	Autotankers requeridos	Costo total
10000 gls	\$ 200	1680000 gls	168	\$ 33600



Figura 101. Isla de carga actual Estación Ambato.



Figura 102. Autotanque de 10000 gls. Estación Ambato.

Tabla 29.

Costo mensual operativo poliducto Ambato - Riobamba

Item	Rubro	Cantidad	Valor unitario	Costo mensual
1	Operadores	2	\$ 1800	\$ 3600
2	Limpieza	1	\$ 500	\$ 500
3	Energía	1	\$ 3000	\$ 3000
				\$ 7100

Un punto importante es mencionar que el tiempo de abastecimiento de combustible en el Terminal Riobamba se reduce de 5 días con autotanques a 1 día de operación continua del Poliducto.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- ✓ El sistema de control implementado en el SKID de bombeo redundante de productos limpios desde la estación de bombeo Ambato hasta la estación reductora Riobamba cumple satisfactoriamente los requerimientos de EP Petroecuador para movilizar los productos limpios de manera confiable.
- ✓ El sistema de control implementado es un sistema confiable durante la operación, gobierna de forma estable el sistema en jornadas de hasta 16 horas continuas de operación respondiendo a perturbaciones como los cambios de presión a lo largo del poliducto desde Quito hasta Riobamba, este sistema de control funciona automáticamente a partir del punto de operación ya que para el arranque se hace necesario aplicar el control a los motores de la estación cabecera Quito - Beaterio de EP Petroecuador.
- ✓ El sistema de instrumentación y los equipos instalados permiten controlar el sistema de bombeo de manera eficaz, proporcionando datos confiables en tiempo real sobre los cuales se toman las acciones de control sobre el sistema.
- ✓ El controlador proporcional – integral diseñado e implementado cumple con los resultados esperados con un error máximo de 3%, equivalente a 310 kPa (45 psi).
- ✓ La evaluación del desempeño eléctrico en la estación de Bombeo Ambato muestra un porcentaje de armónicos en la línea trifásica de 3% como máximo, cumpliendo con la Regulación N° CONELEC – 004/01 en que la suma de total de distorsión de armónicos no debe superar el 3%.

- ✓ El transporte de combustibles limpios desde Ambato hasta Riobamba mediante el poliducto representa un ahorro estimado de USD 26 600 mensuales, en costos operativos para la empresa EP Petroecuador; además permite reducir los tiempos de abastecimiento al terminal Riobamba en un 80%.
- ✓ La tubería enterrada no presenta variaciones representativas de presiones por efectos de temperatura reduciendo el uso de protecciones como válvulas de alivio generando un ahorro económico en los costos de operación y del proyecto total.

6.2 RECOMENDACIONES

- ✓ La operación del sistema de bombeo de productos limpios de Ambato a Riobamba se realice con personal calificado en las estaciones, por las variaciones que pueda presentar el sistema, y la sensibilidad de la tubería que es muy alta a la presión que en cuestión de segundos se puede elevar a valores críticos y peligrosos.
- ✓ En un futuro proyecto se integre este sistema de control con uno de mayor alcance que comande las operaciones en el poliducto Quito – Ambato - Riobamba y así garantice las presiones requeridas en los puntos más altos que son la canastillas ubicadas en el Cotopaxi y en Urbina.
- ✓ Se realice un estudio técnico de factibilidad de generar energía eléctrica a partir de la columna hidráulica de combustible empaquetada en el tramo Urbina – Riobamba.

REFERENCIAS

- ACADEMIC. (2013). *ACADEMIC*. Obtenido de <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/1195035>.
- ACRODYNE. (2010). *ACRODYNE*. Obtenido de <http://www.acrodyne.com.au/products/electric/electric-quarter-turn/limitorque-qx-intelligent-series/>
- Allen Bradley. (Agosto de 2013). PowerFlex 700H Adjustable Frequency AC Drive. Milwaukee, Estados Unidos.
- API. (2002). API RECOMMENDED PRACTICE 500 II EDITION. Washington D.C.: API Publishing Services.
- API. (2013). API RECOMMENDED PRACTICE 505 I EDITION. Washington D.C.: API Publishing Services.
- Ashcroft. (Junio de 2013). Type 1220 General Service Pressure Gauge. Stratford, Connecticut, Estados Unidos.
- ATMOSFERIS. (2011). *ATMOSFERIS*. Obtenido de <http://www.atmosferis.com/valvulas-de-seguridad/>
- Bahon, C. A. (2004). *Tecnología de sistemas de control*. Cataluña: Edicions UPC.
- BASESISTEMAS. (2012). *BASESISTEMAS*. Obtenido de http://www.basesistemas.com/instrumentacion_de_proceso.html.
- BESTA. (2010). Obtenido de <http://www.bestach.es/productos/trimod-besta-interruptor-de-nivel/interruptor-de-nivel-ex/interruptor-de-nivel-ex.html>
- CAMERON. (Junio de 2008). Fylly Welded Ball Valves. Houston, Texas, Estados Unidos.
- CONSPECCIME. (2013). *Perfil del Poliducto Ambato-Riobamba*. Quito.
- Creus, A. (2011). *INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL*. Barcelona: Marcombo S.A.
- Crouse - Hinds, C. (2012). *Terminator™ II TMCX Series Armoured Barrier and Non-armoured Barrier Gland*. Obtenido de http://www.cooperindustries.com/content/public/en/crouse-hinds/products/fittingsglands/cable_glands_andcableaccessories/cable_glands_-_northamericanstandards/terminator_ii_tmcx_series_armouredbarrierandnon-armouredbarriergland.html

- Direct INDUSTRY. (2013). *Direct INDUSTRY*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/siemens-sensors-and-communication/transmisores-de-temperatura-robustos-18343-934437.html>.
- Emerson Motor Company. (2010). *DATOS Y PLANOS DEL MOTOR*. Buenos Aires.
- Emerson Motor Technologies. (2010). *Installation, operation and maintenance manual*. Saint Louis.
- EP Petroecuador. (2013). *CC GASOLINAS*. Quito.
- FARCOM. (2011). *FARCOM*. Obtenido de <http://www.farcomindustrial.com/transmisores-2/>
- FLOWSERVE. (2003). *Limitorque Actuation Systems*. Texas.
- Flowserve Corporation. (2010). *REPORTE DE ENSAYOS_BOMBAS 09AE0123-09AE0124*. Mendoza.
- Flowserve Corporation. (2010). *User Instructions: DMX centrifugal pumps*. Mendoza.
- Foxboro. (2005). *The Innovative, Reliable Foxboro Pressure Transmitter Family*. Estados Unidos: Invensys PLC.
- HEATING AND CONTROL SYSTEMS. (2010). *HEATING AND CONTROL SYSTEMS*. Obtenido de http://www.hcs77.com/hcs_rtd.html.
- Instrumentos WIKA. (Abril de 2008). *Medición de Presión y Temperatura para la Industria de la Maquinaria*. Barcelona, España.
- INSTRUTEK. (2009). *INSTRUTEK*. Obtenido de <https://instrutek.com.mx/verProducto.php?id=I63410>.
- Invensys. (2011). *Specification Sheet. Foxboro T2750 PAC*. Texas, Estados Unidos.
- Invensys Systems. (2013). *Wonderware PAC User Guide*. Texas, Estados Unidos.
- LESER. (Julio de 2014). *Safety Relief Valves*. Hamburgo, Alemania.
- Magnetrol. (2013). *Magnetrol*. Obtenido de <http://mx.magnetrol.com/applications.aspx?application=156&button=32>
- Martín, J. C. (2009). *Automatismos Industriales*. Madrid: Editex.

- McFadyen, S. (2012). Obtenido de <http://myelectrical.com/notes/entryid/126/hazardous-areas-iec-and-nec-cec-comparison>
- METRIX Instrument. (Julio de 2004). Vibration Transmitters. Estados Unidos.
- MINCO. (2014). Explosionproof/Flameproof RTD Sensors. Minnesota, Estados Unidos.
- MTE Corporation. (2013). Matrix Filter Series D User Manual. Estados Unidos.
- Neo-Dyn. (Enero de 2010). Pressure Switch/Internal Adjustment. Valencia, California, Estados Unidos.
- NOSHOK. (2011). Obtenido de http://www.noshok.com/emarketing/spanish_versions/press_release/20110711-transmisores/20110711-transmisores.html
- OFFSHORE IN.DI.GI. (2009). *Filosofía de operación*. Quito.
- Puente, C. (2008). Diseño de un sistema SCADA para la ampliación de la capacidad de almacenamiento y despacho de gas licuado de petróleo en el Terminal Oyambaro de Petrocomercial. Quito.
- Rockwell Automation. (Agosto de 2013). Technical Data. *PowerFlex 700H Adjustable Frequency AC Drive*. Milwaukee, Estados Unidos.
- Rosemount. (2007). Product Datasheet. *Rosemount 3051*. Estados Unidos: Rosemount .
- Rosemount. (2014). Reference Manual. *Rosemount 3144P Temperature Transmitter*. Estados Unidos.
- SME. (2012). *Servicio de Materiales Electricos* . Obtenido de <http://www.smelectricos.com/ver.php?modelo=219>
- WellMark CEMCO. (Septiembre de 2002). 790 Horizontal Level Control Floatswitch. Oklahoma City, Oklahoma, Estados Unidos.
- WIKA. (Noviembre de 2011). Bourdon Tube Pressure Gauges. Lawrenceville, GA, Estados Unidos.