

**SISTEMA PILOTO DE REINYECCIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN DE UNA  
ESTACIÓN DE BOMBEO DE CRUDO A UN POZO DISPOSAL ENFOCADO AL  
ÁREA DE AUTOMATIZACIÓN**

**KAREN LILIANA RUIZ GUERRA  
PEDRO MARÍA ARRIETA BLANQUICETH**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
ESPECIALIZACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS  
INDUSTRIALES**

**CARTAGENA DE INDIAS**

**2014**

**SISTEMA PILOTO DE REINYECCIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN DE UNA  
ESTACIÓN DE BOMBEO DE CRUDO A UN POZO DISPOSAL ENFOCADO AL  
ÁREA DE AUTOMATIZACIÓN**

**KAREN LILIANA RUIZ GUERRA  
PEDRO MARÍA ARRIETA BLANQUICETH**

**Director  
Ing. JORGE DUQUE**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
ESPECIALIZACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS  
INDUSTRIALES**

**CARTAGENA DE INDIAS**

**2014**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**Presidente del jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Cartagena de indias, 26 de Septiembre de 2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos en primera instancia a Dios y a nuestras familias por su apoyo, amor y atención a lo largo de nuestra vida.

De igual forma, damos gracias a la Universidad Tecnológica de Bolívar, en especial a la ESPECIALIZACIÓN EN AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS INDUSTRIALES, que nos brindaron un cuerpo directivo y docente que nos proporcionó todos los conocimientos y experiencias necesarios para nuestra formación como profesionales.

A los ingenieros Jorge Duque y José Villa por su compromiso con el proceso formativo de la especialización, quien además nos acompañó en el proceso y desarrollo de este documento; y al ingeniero Edison Paez (Ecopetrol), quien nos inspiró a guiarnos por esta línea de trabajo, brindó las bases para su desarrollo y apoyo para sacar adelante este proyecto.

A nuestros compañeros de clase, amigos, y a todos los que colaboraron y estuvieron presentes en el transcurso de nuestra formación.

***MUCHAS GRACIAS!!!***

Cartagena de Indias D. T. y C., 26 de Septiembre de 2014

Señores

**COMITÉ CURRICULAR**

Especialización En Automatización Y Control De Procesos Industriales

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

**Respetados señores:**

De la manera más atenta nos dirigimos a ustedes con el propósito de informarles que el trabajo integrador titulado “**SISTEMA PILOTO DE REINYECCIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO DE CRUDO A UN POZO DISPOSAL ENFOCADO AL ÁREA DE AUTOMATIZACIÓN**” ha sido desarrollado conforme a los objetivos establecidos.

Como autores del documento consideramos que el trabajo es satisfactorio y solicitamos que: sea estudiado, evaluado y posteriormente aprobado por ustedes.

En espera de los resultados de dicha evaluación.

Atentamente,

---

**KAREN LILIANA RUIZ GUERRA**

**C.C. 1.047.433.450 de Cartagena**

---

**PEDRO MARÍA ARRIETA BLANQUICETH**

**C.C. 92'640.956 de Sincelejo**

Cartagena de Indias D. T. y C., 26 de Septiembre de 2014

Señores

**COMITÉ CURRICULAR**

Especialización En Automatización Y Control De Procesos Industriales

Universidad Tecnológica de Bolívar

Ciudad

Cordial Saludo.

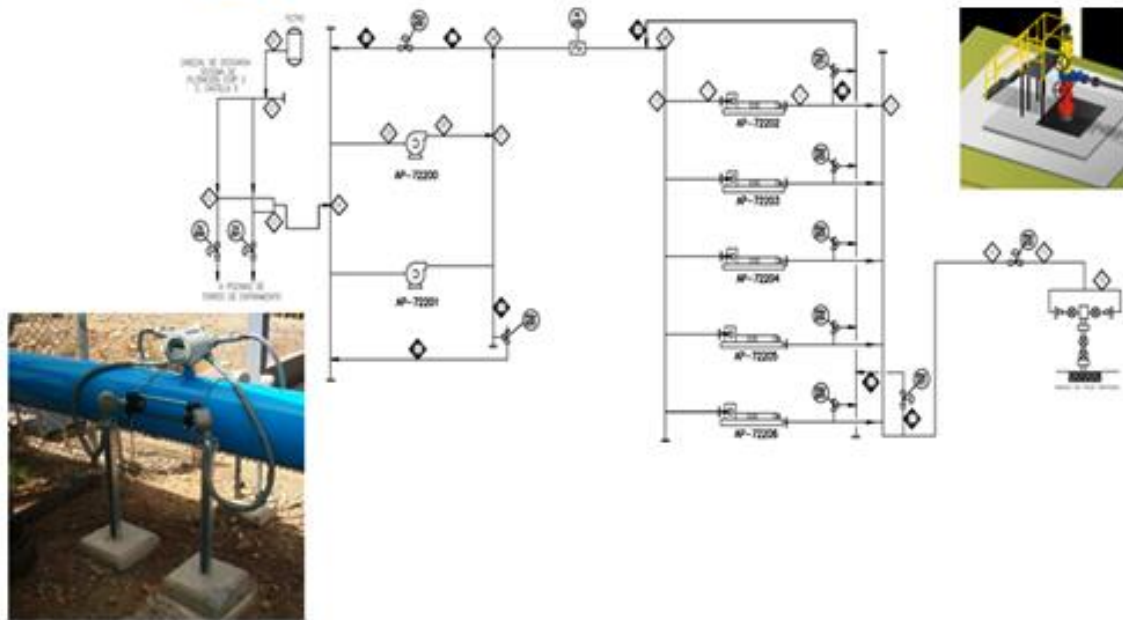
A través de la presente me permito poner en consideración para su respectiva evaluación, el trabajo integrador titulado “**SISTEMA PILOTO DE REINYECCIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO DE CRUDO A UN POZO DISPOSAL ENFOCADO AL ÁREA DE AUTOMATIZACIÓN**”, el cual fue realizado por los ingenieros KAREN LILIANA RUIZ GUERRA y PEDRO MARÍA ARRIETA BLANQUICETH, a quienes asesoré en su ejecución.

Atentamente,

---

**José Luis Villa**

**Asesor de Monografía**



**SISTEMA PILOTO DE  
REINYECCIÓN DE AGUA DE  
PRODUCCIÓN DE UNA  
ESTACIÓN DE BOMBEO DE  
CRUDO A UN POZO DISPOSAL  
ENFOCADO AL ÁREA DE  
AUTOMATIZACIÓN**



# TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	i
LISTA DE TABLAS .....	iii
GLOSARIO .....	iv
RESUMEN .....	v
CÁPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
CÁPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	3
1.1. CONDICIONES GENERALES.....	3
1.1.1. Condiciones ambientales.....	3
1.1.2. Alcance.....	3
1.1.3. Criterios de diseño de Bombas.....	4
1.1.4. Criterios de Seguridad.....	4
1.1.5. Normas y códigos.....	5
1.1.6. Nomenclatura .....	6
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	7
CÁPITULO 3. FACTIBILIDAD .....	12
3.1. BENEFICIOS.....	12
3.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO.....	13
3.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	14



CÁPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO .....	18
2.1. BASES Y CRITERIOS DEL SISTEMA AUTOMATIZADO .....	18
2.1.1. Datos generales .....	18
2.1.2. Especificaciones Hardware y Software.....	19
2.1.3. Transmisión de Señales Eléctricas.....	20
2.1.4. Alimentación eléctrica de instrumentos .....	21
2.1.5. Especificación de instrumentación .....	22
2.2. FILOSOFÍA DE CONTROL.....	24
2.2.1. Rutinas operacionales .....	25
2.3. DIAGRAMA DE BLOQUES .....	31
2.4. DIAGRAMAS DE CONEXIONADO Y JUNCTION BOXES .....	35
CÁPITULO 3. RESULTADOS.....	35
3.1. CRITERIOS PRUEBAS FUNCIONALES.....	36
3.1.1. Seguridad del sistema .....	36
3.1.2. Descripción de actividades.....	38
3.1.3. Criterios de bombas .....	39
3.1.3. Prueba funcional paso a paso .....	41
3.1.4. Situaciones operacionales que se pueden presentar en el arranque .....	43
3.2. ARRANQUE, AJUSTES Y PRUEBAS .....	43
3.2.1. Alimentación del cabezal del Sistema Disposal.....	44
3.2.2. Alineación de Bombas Booster AP-72613A y B. ....	45
3.2.3. Arranque de las Bombas Booster AP-72613A y B. ....	47
3.2.4. Alineación de las Bombas de Inyección AP-7601A y D.....	48
3.2.5. Arranque de las Bombas de Inyección AP-7601A y D. ....	50

3.2.6. Acción de nuevo arranque.....	55
3.2.7. Consideraciones importantes .....	56
3.3. RESULTADO DE PRUEBAS .....	57
CONCLUSIONES .....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
ANEXOS .....	63
ANEXO 1: P&ID SISTEMAS .....	64
ANEXO 2: LISTADO DE INSTRUMENTOS Y MATERIALES .....	64
ANEXO 3: MEMORIAS DE CÁLCULO VÁLVULAS DE CONTROL.....	64
ANEXO 4: HOJAS DE DATOS.....	64
ANEXO 5: DETALLES DE INSTALACIÓN.....	64
ANEXO 6: DIAGRAMAS DE CONEXIONADO Y JUNCTION BOXES .....	64
ANEXO 7: REGISTRO DE DATOS EN PRUEBAS DE ARRANQUE.....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Simbología utilizada.....	6
Figura 2. (a) PFD sistema de reinyección de agua a pozo disposal. (b) Características del sistema. ....	8
Figura 3. Sistema de filtración. (STAP 2 – Estación Castilla II).....	9
Figura 4. Sistema de bombas booster. Estación Castilla II. ....	10
Figura 5. Sistema de bombas de inyección .....	12
Figura 6. Arquitectura de control.....	21
Figura 7. Lazo para garantizar paso de flujo de bombas booster con el PIT-72200 ó FIT-72200 / FV-72200 ó FV-72201.....	32
Figura 8. Lazo de recirculación bombas booster PIT-72201 ó FIT-72200 / PCV-72200.....	33
Figura 9. Lazo de indicación de alarmas del PIT-72202. ....	33
Figura 10. Lazo línea al pozo de bombas de inyección PIT-72203/PCV-72201. ...	34
Figura 11. Lazo de recirculación bombas de inyección PIT-72203 / PCV-72202. .	34
Figura 12. Sistema de reinyección de agua de producción de pozo de Castilla II a pozo disposal.....	35
Figura 13. Curva de operación de las bombas booster. ....	39
Figura 14. Curva de operación de las bombas booster. ....	40
Figura 15. Diagrama Sistema Disposal.....	44
Figura 16. Línea descarga filtros EC2.....	45
Figura 17. Línea succión bombas BOOSTER.....	45
Figura 18. FCV-7219A .....	46
Figura 19. PIT-72301 .....	46
Figura 20. FIT-7219 a Disposal.....	47
Figura 21. Condiciones en Delta V. ....	48
Figura 22. Válvulas de succión y descarga bombas de inyección. ....	49

Figura 23. Válvulas del cuadro de control recirculación bombas de inyección. ....	49
Figura 24. Válvulas del cuadro de control llegada pozo.....	50
Figura 25. Arranque de bombas de Inyección. ....	51
Figura 26. Selección de bomba. ....	51
Figura 27. Selección de opción deseada. ....	52
Figura 28. Opción RUN.....	52
Figura 29. Botón de arranque para reinicio de secuencia.....	53
Figura 30. Reset del sistema. ....	53
Figura 31. Verificación de permisivos eléctricos. ....	53
Figura 32. Selección de bomba de inyección para parada. ....	54
Figura 33. Parada bomba de inyección. ....	54
Figura 34. Arranque bomba de inyección. ....	54
Figura 35. Indicación estado bombas. ....	55
Figura 36. Selección de bomba para resetear alarmas. ....	55
Figura 37. Botón de reset.....	55
Figura 38. Confirmación de reset.....	56
Figura 39. Bombas de inyección en condición de operación. ....	56

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de operación Filtros STAP II. Estación Castilla II. ....	4
Tabla 2. Condiciones de presión de operación del sistema STAP II.....	7
Tabla 3. Presupuesto del proyecto .....	13
Tabla 4. Análisis de riesgos. ....	14
Tabla 5. Beneficios económicos con la implementación del proyecto. ....	17
Tabla 6. Relación beneficio/costo del proyecto.....	17
Tabla 7. Descripción de bloques del sistema de control. ....	31
Tabla 8. Interlocks bomba booster AP-72613A/B. ....	36
Tabla 9. Interlocks bomba de inyección AP-7601A/C/D. ....	37
Tabla 10. Resultados prueba 05 de Enero de 2012.....	58

# GLOSARIO

- **Bomba Booster:** bombas presurizadoras que se pueden instalar en línea para incrementar la presión del agua en un sistema.
- **BWPD:** Barriles de agua por día.
- **CCM:** Centro de Control de Motores
- **FCV:** Válvula de control de flujo
- **FIT:** Transmisor indicador de flujo
- **HMI:** Interfaz hombre máquina.
- **Interlocks:** Condiciones de proceso que generan alarmas y cortes.
- **P&ID** (Process and instrumentation diagram): Diagrama de proceso e instrumentación.
- **PCV:** válvula de control de presión
- **PSV:** válvula de seguridad de presión
- **PIC:** Controlador indicador de presión
- **PIT:** Transmisor indicador de presión
- **Pozo disposal:** Pozo donde se dispone el agua proveniente del proceso.
- **RTD:** Dispositivo (sensor) térmico resistivo.
- **SAS:** Sistema de aislamiento seguro
- **SOC:** Superintendencia Central de Operaciones
- **TE:** Sensor de temperatura
- **TT:** Transmisor de temperatura
- **VFD** (Variable Frequency Drive): Dispositivo variador de frecuencia de motores.

# RESUMEN

En este documento se describe el desarrollo de un sistema piloto de reinyección de 80.000 barriles de agua de producción por día (BWPD) desde la estación Castilla II, perteneciente a la superintendencia central de operaciones (SOC) de ECOPETROL S.A., a un pozo disposal ubicado a 7km aproximadamente de la estación, especificando:

- Introducción (Objetivos y alcance).
- Descripción del proceso (Condiciones generales, proceso de reinyección de agua).
- Factibilidad (Beneficios, costos y justificación económica).
- Definición del proceso automatizado (Arquitectura del sistema, especificaciones de instrumentación y control, filosofía de control, rutinas operacionales y diagramas de bloque).
- Resultados (Criterios pruebas funcionales, arranque, ajustes y pruebas).
- Conclusiones.
- Anexos (Listado de instrumentos, señales, materiales, cables y conduits, hojas de datos, memorias de cálculo, especificaciones técnicas, diagramas de conexionado y junction boxes, detalles de instalación y registro de datos en pruebas de arranque).

# CÁPITULO 1. INTRODUCCIÓN

En la estación Castilla II perteneciente a la SOC se producen aproximadamente 60.000 BPD<sup>1</sup> de producto y 240.000 BWPD de producción proveniente del crudo tratado. Estos últimos son trasladados al río Orotoy a través de carrotanques que hacen un recorrido de 25km para realizar el vertimiento de las aguas de producción. Debido a este proceso se han presentado serios inconvenientes en la comunidad aledaña al río ocasionando que la empresa tenga que asumir costos para la reparación de temas legales ambientales.

Uno de los tantos problemas que ha ocasionado este proceso es que el río Orotoy, en épocas de invierno, llega a su máximo nivel de caudal y cuando la empresa vierte el agua de producción al río contribuye a que ocasione inundaciones a los habitantes rivereños, y en época de verano se presentan problemas ecológicos debido a la alta concentración de agentes químicos en el río.

Este trabajo está enfocado en realizar un sistema piloto de reinyección de agua de producción de una estación de bombeo de crudo a un pozo disposal enfocado al área de automatización. Este proyecto piloto contempla la reinyección de 80.000BWPD de agua de producción en un pozo disposal, haciendo uso de un sistema de control que permita mantener las condiciones ambientales y legales con respecto a su entorno y de protección en cuanto a presión, flujo y temperatura para cada etapa y recorrido del sistema.

Este proyecto se realiza con el fin de cumplir las reglamentaciones y normas del MINISTERIO DE AMBIENTE constituidas en el documento RAS 2000 [6] y lo

---

<sup>1</sup>El tiempo. Los pozos Rubiales y Castilla La Nueva aumentan la producción de petróleo del Meta. En: El tiempo [en línea]. Disponible en: <[www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3278926](http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3278926)>. [Citado en 09 de Octubre de 2006].



definido por la corporación autónoma regional Cormacarena, acatando los capítulos que aplican al debido tratamiento de aguas residuales, evitando sanciones a la empresa.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **EL OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO ES:**

Realizar la descripción del proceso, solución técnica en automatización y arranque de un sistema piloto de reinyección de agua de producción desde una estación de bombeo de crudo a un pozo disposal.

### **LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS SON:**

- Describir un sistema piloto automatizado de reinyección de agua de producción a un pozo disposal ajustado a sus condiciones ambientales, locativas y técnicas, de acuerdo con las normas internacionales, nacionales y empresariales que lo rigen, con el fin de proveer un servicio óptimo, confiable y estandarizado, que brinde posibilidad de aumentar su capacidad de rendimiento en la medida que las condiciones de la estación de bombeo de crudo lo requiera.
- Especificar una solución que permita reducir el número de tareas manuales y rutinarias a realizar por un operador local, registrar las diferentes variables de operación y presentar al operador un panorama completo de la instalación bajo su responsabilidad en el HMI y permitir el envío de información de las operaciones en tiempo real al control remoto del sistema.
- Obtener el máximo rendimiento del sistema piloto automatizado al mínimo costo, sin exceder las condiciones de operación segura en el sistema y entregar los datos requeridos en tiempo real y con la calidad requerida, permitiendo minimizar los esfuerzos de coordinación y control de la operación reduciendo los riesgos sobre las personas, las instalaciones de la empresa, el impacto en las comunidades y el medio ambiente.

## CÁPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

### 1.1. CONDICIONES GENERALES

La Estación Castilla II perteneciente a la SOC de Ecopetrol S.A. cuenta con un Sistema de Tratamiento de agua de Producción (STAP II), con capacidad para tratar 300.000 BWPD. En el proceso se tratan aproximadamente 240.000 BWPD, los cuales son vertidos en el río Orotoy.

El Proyecto Disposal es un proyecto piloto que contempla la reinyección de 80.000 BWPD del agua de vertimiento en un pozo disposal para disminuir el volumen de agua de producción vertida al río.

#### 1.1.1. Condiciones ambientales

Las siguientes condiciones ambientales son típicas del sector de la estación Castilla II, así:

- Temperatura de bulbo seco, °F Máxima 90, Mínima 80, Promedio 82
- Temperatura ambiente, ° F 85 - 100
- Presión barométrica 28.4 pulgadas de mercurio
- Viento Velocidad máxima 100 m/h
- Dirección predominante Sur a norte
- Clasificación sísmica Alta Aa = 0.25
- Altura sobre el nivel del mar 420 metros
- Humedad relativa Máxima 82%, Mínima 70%, Promedio 75.3

#### 1.1.2. Alcance

A continuación se establecen los requerimientos mínimos de diseño, condiciones de operación y las premisas utilizadas para el desarrollo del proyecto y establecidas de acuerdo a los criterios de operación:

1. El agua de inyección se toma de cualquiera de los dos cabezales de descarga del sistema de filtración del STAP II de la estación Castilla II.
2. Las condiciones de operación del sistema STAP II se observan en la Tabla 1.
3. Las bombas booster serán ubicadas en la estación Castilla II y las bombas de reinyección en el pozo disposal.

4. En operación normal el sistema manejará 80.000 BWPD.
5. El diseño del sistema se realiza para manejar un caudal máximo de inyección de 100.000 BWPD.
6. El pozo disposal tiene una presión de operación de 3.000 psig y resiste una presión máxima de operación de 3.100 psig.
7. Se cuenta con un patín de inyección de químicos como equipo paquete ubicado antes de la succión de las bombas booster, que no se especificará en detalle en el desarrollo de este documento.

Parámetro	NORMAL	CRITICO
Presión de operación bombas filtros (psig)	50	45
Presión de salida filtros (psig)	15	10
Flujo de operación de filtros (BWPD)	37.000	50.000
Flujo línea a piscina (BWPD)	240.000	300.000
Flujo entrada sistema bombas booster (BWPD)	80.000	100.000

*Tabla 1. Condiciones de operación Filtros STAP II. Estación Castilla II.*

### 1.1.3. Criterios de diseño de Bombas

#### **Bombas Booster:**

- Se implementaran 2 bombas booster centrifugas de 50.000 BWPD.

#### **Bombas de inyección:**

- Se implementaran 4 bombas de inyección centrifugas multi etapa y una de reserva.
- Cada bomba debe tener la capacidad para manejar 20.000 BWPD.

### 1.1.4. Criterios de Seguridad

1. Las bombas deben contar con protecciones por condiciones críticas de presión, temperatura, amperaje y vibración.
2. Los límites de presión para apagar las bombas debe ser como mínimo la presión de flujo mínimo estable requerido por las bombas.
3. La válvula de recirculación del sistema de bombas booster debe diseñarse con capacidad para manejar el 100% del máximo flujo de agua. La válvula de recirculación del sistema de inyección debe diseñarse con capacidad para manejar el flujo de una bomba.
4. El sistema de las bombas booster debe contar con una válvula de seguridad (PSV) como respaldo en caso de falla de las otras protecciones y debe tener la capacidad de manejar por lo menos el flujo mínimo estable

requerido por la bomba, con el fin de seguir las buenas prácticas de diseño seguro. El sistema de las bombas de inyección debe contar con válvulas de seguridad (PSV) por cada bomba.

5. El sistema debe estar asegurado en primer nivel por la válvula de recirculación. En segundo nivel deben actuar las válvulas PSV y por último por el apagado de las bombas por medio de las protecciones de las bombas.
6. Los set de presión para la operación de las protecciones en las bombas booster deben encontrarse entre la presión de operación (200 psig) y la presión a flujo mínimo estable.
7. Los set de presión para la operación de las protecciones en las bombas de inyección deben encontrarse entre la presión de operación (1550-1700 psig) y la presión máxima de operación del pozo (2.000 psig) [2].

### 1.1.5. Normas y códigos

Las especificaciones de diseño, materiales, aplicaciones y normas técnicas para la realización de este proyecto están ajustadas con las siguientes normas:







- API
  - ✓ API RP 520-2: Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries – Part 2
  - ✓ API RP 540: Electrical Installations in Petroleum Processing Plants, Third Edition.
  - ✓ API RP 551: Process Measurement Instrumentation.
  - ✓ API RP 552: Transmission Systems.
  - ✓ API RP 553: Refinery Control Valves
  - ✓ API RP 554: Process Instrumentation and Control.
- IP
  - ✓ IP 3-15-1: Pressure Relief Valves
  - ✓ IP 15-3-1: Pressure Instruments
  - ✓ IP 15-4-1: Instrumentos de flujo
  - ✓ IP 15-9-1: Control Valves
- ANSI / ISA Standards
  - ✓ ISA S5.1: Instrumentación, Símbolos e identificación.
  - ✓ ISA S12.12: Equipos Eléctricos en áreas C1, Dv2.
  - ✓ S51.1: Process Instrumentation Terminology
  - ✓ S75.01: Flow Equations for Sizing Control Valves
- NEC National Electrical Code, Art. 500: Locaciones peligrosas (clasificadas), clases I, II, III, Divisiones 1 y 2.

- NEMA National Electrical Manufacturer's Association - art. 250: Aislamiento para equipos eléctricos.

### 1.1.6. Nomenclatura

La simbología de instrumentos estará de acuerdo con el estándar ISA S51.1 "Instrument Symbols and Identification", como se observa en la Figura 1.





#### NOMBLECATURA LINEAS PROCESO Y SEÑALES

	LINEA DE PROCESO
	SEÑAL ELECTRICA
	SEÑAL NEUMATICA
	SEÑAL COMUNICACION
	LIMITE DE BATERIA
	PUNTO DE INTERCONEXION













#### VALVULAS

	VALVULA MARIPOSA
	VALVULA BOLA
	VALVULA GLOBO
	VALVULA AGUJA
	VALVULA COMPUERTA
	VALVULA CHEQUE
	VALVULA ALIVIO CON RESORTE
	VALVULA SOLENOIDE DE 4 VIAS

#### VALVULAS DE CONTROL

	VALVULA CONTROL DE FLUJO TIPO MARIPOSA
	VALVULA CONTROL DE PRESION TIPO GLOBO
	VALVULA CONTROL DE PRESION AUTOREGULADORA AGUAS ABAJO
	AIR SUPPLY (SUMINISTRO AIRE)

#### INSTRUMENTOS Y SEÑALES

SIMBOLOS			
	LOCALIZACIÓN PRINCIPAL NORMALMENTE ACCESIBLE AL OPERADOR SALA DE CONTROL	MONTADO EN CAMPO	LOCALIZACIÓN AUXILIAR NORMALMENTE ACCESIBLE AL OPERADOR MONTADO EN PANEL LOCAL
INSTRUMENTOS DISCRETOS			
CONTROL Y DISPLAY DISTRIBUIDO			
FUNCION COMPUTARIZADA			
CONTROL LOGICO PROGRAMABLE			

<b>PI:</b> TRANSMISOR INDICADOR PRESION	<b>VI:</b> INDICADOR VIBRACION
<b>PI-C:</b> CONTROL INDICADOR DE PRESION	<b>F.O:</b> FAIL OPEN (FALLA ABIERTA)
<b>HS:</b> HAND SWITCH	<b>F.C:</b> FAIL CLOSE (FALLA CERRADA)
<b>TE:</b> ELEMENTO TEMPERATURA	<b>VSS:</b> ARRANCADOR SUAVE
<b>FV:</b> VALVULA FLUJO	<b>IX:</b> CAUSA DE INTERLOCK
<b>PCV:</b> VALVULA CONTROL DE PRESION	<b>ME:</b> MOTOR ELECTRICO
<b>PSV:</b> VALVULA DE SEGURIDAD DE PRESION	<b>HH:</b> HIGH-HIGH
<b>SV:</b> VALVULA SOLENOIDE	<b>H:</b> HIGH
<b>PDIT:</b> TRANSMISOR INDICADOR DIFERENCIAL DE PRESION	<b>L:</b> LOW
<b>PD:</b> INDICADOR DIFERENCIAL PRESION	<b>LL:</b> LOW-LOW
<b>UI:</b> INDICACIONES UNIVERSALES	<b>FE:</b> ELEMENTO FLUJO
<b>UA:</b> ALARMAS UNIVERSALES	<b>U/S:</b> ULTRASONICO
<b>ZL:</b> INDICADOR DE POSICION	<b>FI:</b> TRANSMISOR INDICADOR FLUJO
<b>L/R:</b> LOCAL/REMOTO	<b>FI-C:</b> CONTROL INDICADOR DE FLUJO
<b>S/S:</b> START/STOP	<b>P:</b> PRESION
<b>VT:</b> TRANSMISOR VIBRACION	<b>F:</b> FLUJO
<b>PY:</b> DISPOSITIVO COMPUTARIZADO	

Figura 1. Simbología utilizada.

## 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Al inicio del proceso la presión del sistema del STAP II depende de las condiciones de operación de la bomba que envía el agua a los filtros. El agua a inyectar se toma de los cabezales de 30" que transportan el agua de producción hasta las piscinas de enfriamiento, a una temperatura de 180°F.

En la *Tabla 2* se presentan las condiciones de operación del sistema cuando los filtros presentan su máxima caída de presión (15 psi).

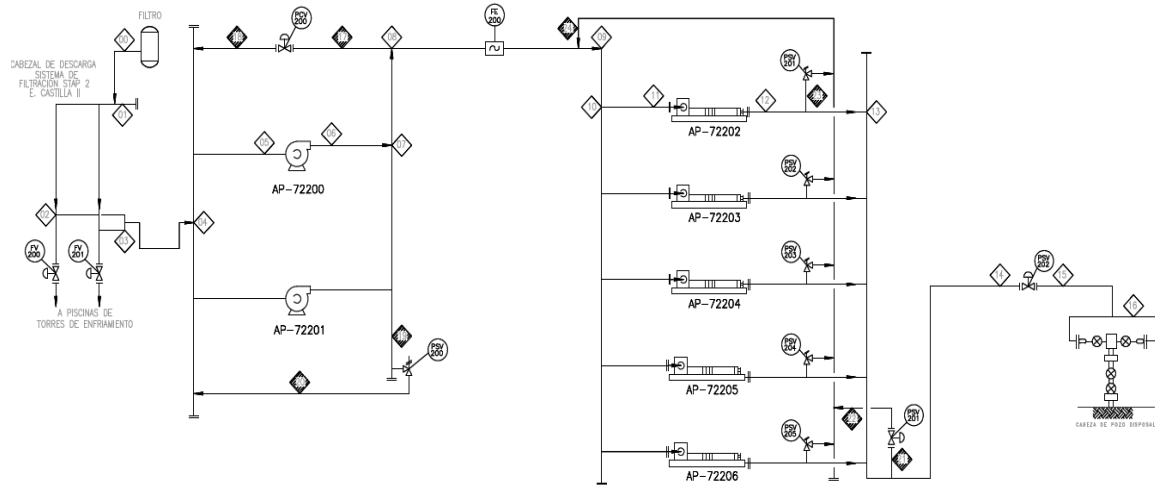
Condiciones operación	Presión Operación Bomba de Filtros	Presión descarga filtros
Presión máxima (psig)	55	20
Presión normal (psig)	50	15
Presión mínima (psig)	45	10

*Tabla 2. Condiciones de presión de operación del sistema STAP II*

El sistema de reinyección de agua propuesto está compuesto por dos subsistemas. Primero un sistema de bombeo booster que transfiere 80.000 BWPD desde la estación Castilla II hasta el pozo disposal. Segundo un sistema de bombas de inyección que aumentan la presión del agua para ser inyectada en el pozo disposal.

En la Figura 2 se observa el PFD del sistema, donde se observan las condiciones de caudal, presión, temperatura y densidad para cada etapa clave del proceso [3].

En el anexo 1 del documento se observan los P&ID del sistema de bombas booster y de bombas de inyección [4].



(a)

NOTA 1, 2

CONDICIONES	UNIDADES	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇	◇
FLUIDO	—	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA
CAUDAL	BLS/DIA	50.000	300.000	300.000	100.000	100.000	50.000	50.000	50.000	100.000	100.000	20.000	20.000	20.000
PRESION	PSIG	10	6.3	6.2	5.6	3.9	1.9	200	194.4	194	45.8	44.8	42.2	3.055,2
TEMPERATURA	*F	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
DENSIDAD	LB/FT3	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1

CONDICIONES	UNIDADES	◇	◇	◇	◇	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
FLUIDO	—	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA	AGUA
CAUDAL	BLS/DIA	20.000	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
PRESION	PSIG	3.050,8	3.049	3.010,2	3.000	205	4.4	210	9.7	3.080	112	3.110	104.4
TEMPERATURA	*F	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
DENSIDAD	LB/FT3	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1	60.1

◆ CONDICIONES DE OPERACION VALVULAS DE CONTROL (PCV) Y VALVULAS DE SEGURIDAD (PSV)

(b)

Figura 2. (a) PFD sistema de reinyección de agua a pozo disposal. (b) Características del sistema.

### 1.2.1. Sistema de bombas booster (Estación Castilla II)

Los cabezales de descarga del sistema de filtración del STAP II (Figura 3) que envían el agua de producción a las piscinas de succión de las torres de enfriamiento, tendrán una derivación para alimentar las bombas booster AP-72200/201.



*Figura 3. Sistema de filtración. (STAP 2 – Estación Castilla II)*

El sistema de bombeo booster que se observa en la Figura 4 está compuesto por:

- Dos (2) bombas centrifugas de 50.000 BWPD @ 200 psig con protecciones por alta o baja presión a la entrada y a la descarga, alta temperatura y vibración.
- Dos (2) Arrancadores suaves.
- Dos (2) Válvulas de control (FV-72200/201) tipo mariposa neumática de 16" con falla abierta Clase #150; Ubicadas en el cabezal de 30". Diseñadas para manejar 300.000 BWPD y con señal de control del medidor de flujo ultrasonido FE-72200 ubicado en el cabezal de descarga o del PIT- 72200 ubicado en el cabezal de succión de las bombas booster.
- Una (1) Válvula de seguridad (PSV-72200) con resorte convencional de 3" k 4", Clase #300; Diseñada con capacidad para manejar 20.000 BWPD y una caída de presión de 200 psi; ubicada en el cabezal de descarga y con descarga al cabezal de succión de las bombas booster.
- Una (1) Válvula de control (PCV-72200) neumática con recirculación a la succión de las bombas tipo globo de 8" con falla abierta Clase #300; Ubicada en el cabezal de descarga de las bombas booster; Diseñada para manejar 100.000 BWPD y con señal de control del medidor de flujo ultrasonido FE-72200 o del PIT- 72201 ubicados en el cabezal de descarga.



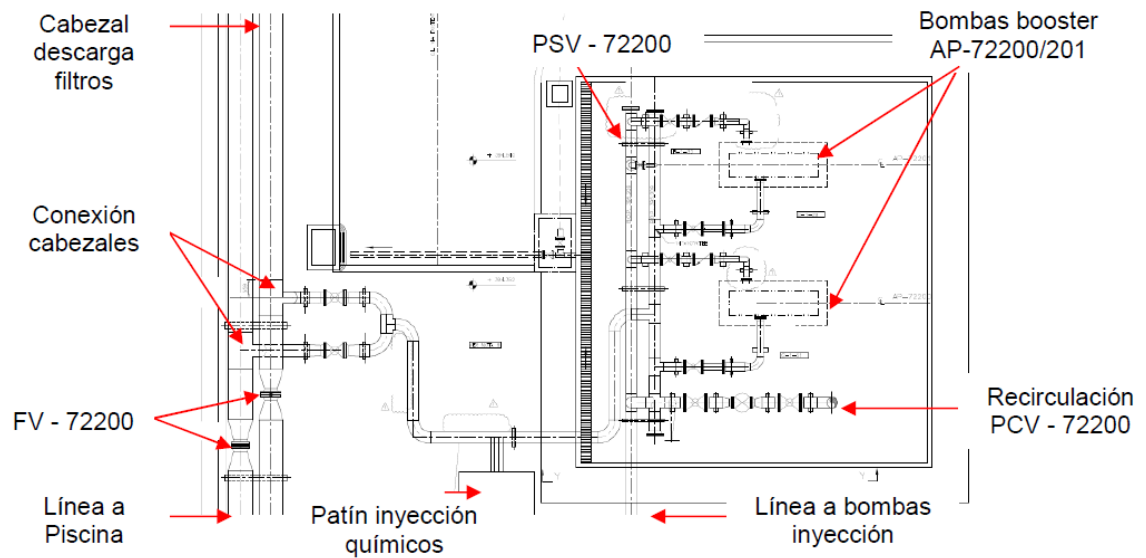


Figura 4. Sistema de bombas booster. Estación Castilla II.

- Un (1) Patín de inyección de químicos (Paquete suministrado y especificado por el proveedor). Mínimo debe contar con 4 tanques de almacenamiento de los químicos requeridos (Inhibidor de corrosión, Inhibidor de incrustaciones, Secuestrante de Oxígeno y biocida), con visores de nivel, 4 bombas dosificadoras y una de respaldo, válvulas PSV a la descarga de cada una, válvulas de cheque y de corte (Éste sistema no es explicado a fondo dentro del desarrollo del proyecto, se toma como un proyecto alternativo). El punto de suministro se encuentra antes del cabezal de succión de las bombas booster.
- Una Toma de aire del sistema actual de compresión de aire de la Estación Castilla II. Suministro de aire para válvulas FV-72200/201 y PCV-72200. Consumo aproximado 1.5 scfm cada válvula.
- La línea de transferencia entre las bombas booster y las bombas de inyección (12"-PRW-72-B-0012) es de 12", sch 40 enterrada, Clase #300. La distancia entre los dos sistemas es 6.76 km.

### **1.2.2. Sistema de bombas inyección (Pozo disposal)**

La línea de transferencia se conecta con el sistema de inyección en el cabezal de succión de las bombas de inyección como se observa en la Figura 5. Este sistema está compuesto por:

- Cuatro (4) bombas centrifugas horizontales multietapa y una de reserva (AP-72202/203/204 /205/206), con un caudal de operación de 20.000 BWPD @ 3.060 psig con protecciones por alta o baja presión a la entrada y a la descarga, alta temperatura y vibración.
- Dos (2) Variadores de velocidad.
- Cinco (5) válvulas de seguridad (PSV-72201/202/203/204/205) con resorte de 2" G 3"; ubicadas a la descarga de cada bomba antes del cheque; Diseñadas con capacidad para manejar 20.000 BWPD y una caída de presión de 3.000 psi.
- Una (1) válvula de control PCV-72201 tipo globo neumática de 8" con falla abierta Clase #2.500; ubicada en la línea a pozo. Diseñada para manejar 100.000 BWPD y con señal de control del PIT- 72203 ubicado en el cabezal de descarga.
- Una (1) válvula de control PCV-72202 neumática con recirculación a la succión de las bombas tipo globo de 3" con falla abierta Clase #2.500; Ubicada en el cabezal de descarga; Diseñada para manejar 20.000 BWPD y con señal de control del PIT- 72203 ubicado en el cabezal de descarga.
- Un (1) paquete de compresión de aire (suministrado y especificado por el proveedor) el cual debe tener como mínimo: Compresor de respaldo, pre y post filtros, sistema de secado y tanque pulmón. Utilizado para suministrar aire para el funcionamiento de las válvulas PCV-72200/201. Consumo aproximado 1.5 scfm cada válvula.
- La línea de transferencia entre las bombas de inyección y el pozo disposal (12"-PRW-72-F-0025) es de 12", sch 160, Clase #2.500. La distancia entre los dos sistemas es de 78 metros aproximadamente [5].

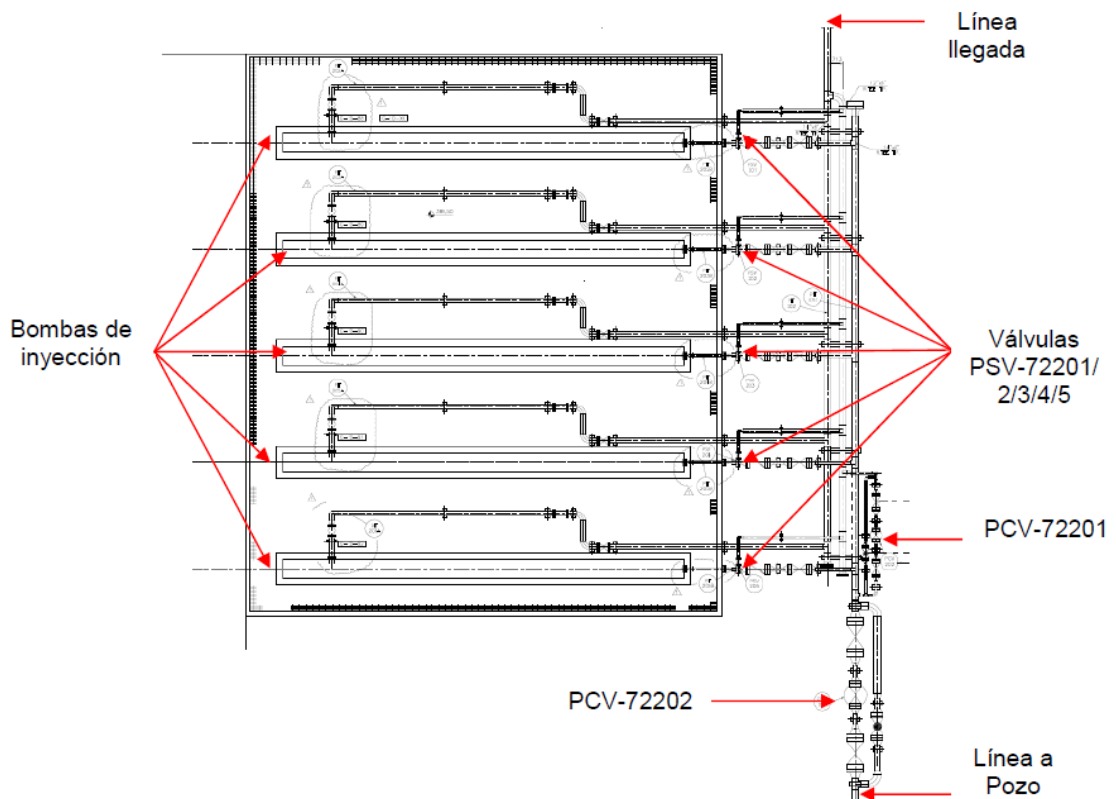


Figura 5. Sistema de bombas de inyección

## CÁPITULO 3. FACTIBILIDAD

### 3.1. BENEFICIOS

Los beneficios a obtener con el proyecto son:

AMBIENTALES:

- Disminuir la concentración de contaminación por el vertimiento de agua de producción en el río orotoy.
- Disminuir inundaciones en las poblaciones rivereñas en época de invierno.

IMAGEN EMPRESARIAL:

- Disminución de protestas por parte de los habitantes de los pueblos rivereños donde se vierte el agua de producción.
- Reducción de notas periodísticas alusivas al tema de contaminación del campo de producción y sus alrededores.

## PERSONAS:

- Disminución de enfermedades e incapacidades permanentes por causa de la contaminación del agua del río Orotoyo, la cual es utilizada domésticamente, regadíos de cosechas y para animales.

## ECONÓMICOS:

- Disminución de multas por contaminación de las aguas del río Orotoyo.
- Disminución de multas y reparaciones por causa de inundaciones de las poblaciones rivereñas.
- Reducción de reparaciones de salud a personas por causa de la contaminación de las aguas del río Orotoyo.
- Disminución del costo del contrato de carrotaques para transporte.

### 3.2. ESTIMACIÓN DE COSTOS DEL PROYECTO

En la *Tabla 3* se observa el presupuesto del proyecto.

COSTOS DIRECTOS	<b>SUMINISTROS</b>		
	SUMINISTROS POR ECOPETROL S.A CON SEGUIMIENTO DEL CONTRATISTA		\$ 20.539.233.705
	SUMINISTROS POR CONTRATISTAS		\$ 23.456.476
	<b>TOTAL SUMINISTROS</b>		<b>\$ 20.562.690.181</b>
	<b>CONSTRUCCION Y MONTAJE</b>		
	CIVIL	56%	\$ 3.228.070.757
	MECANICA	2%	\$ 96.277.853
	TUBERIA	7%	\$ 412.826.493
	ELECTRICA	32%	\$ 1.848.478.743
	INSTRUMENTACIÓN	2%	\$ 130.575.784
	<b>SUBTOTAL CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE</b>		<b>\$ 5.716.229.630</b>
	<b>TOTAL COSTOS DIRECTOS</b>		<b>\$ 26.278.919.811</b>
COSTOS INDIRECTOS	ADMINISTRACIÓN	12%	\$ 685.947.556
	IMPREVISTOS	7%	\$ 400.136.074
	<b>TOTAL</b>	<b>25%</b>	<b>\$ 1.429.057.408</b>
	GESTION DE COMPRAS	10%	\$ 2.345.648
	SEGUIMIENTO	5%	\$ 1.026.961.685
	<b>TOTAL COSTOS INDIRECTOS</b>		<b>\$ 2.458.364.740</b>
	TOTAL GASTOS GENERALES		\$ 369.326.385
	<b>GRAN TOTAL DEL PROYECTO</b>		<b>\$ 29.161.486.741</b>

*Tabla 3. Presupuesto del proyecto*

### 3.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Actualmente la operación se realiza de la siguiente manera: El agua de producción es enviada a través de tuberías hacia el sistema de tratamiento de agua, STAP II de la estación Castilla, de allí son cargados diversos carrotanques que realizan su recorrido para su posterior vertimiento al río.

La empresa está teniendo serios inconvenientes (multas), ya que se ha producido contaminación al medio ambiente debido a accidentes de los carrotanques en sus recorridos, se presentan reclamos debido a inundaciones en pueblos rivereños aguas abajo de la zona cuando es época de invierno, en donde el río excede su capacidad de caudal, también se han presentado multas de gran envergadura debido a la contaminación generada al verter el agua de producción en el río orotoy. Debido a lo anterior la empresa decidió realizar un análisis de riesgos del proceso con diferentes frentes de trabajo, en el cual se realizaron estudios con datos históricos de la empresa y de los habitantes de la región obteniendo resultados de la *Tabla 4*.

CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD					
Personas	Economica	Ambiental	Clientes	Imagen de la Empresa		A	B	C	D	E
						No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Unidad, Superintendencia o Departamento
Una o mas fatalidades	Catastrofica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M ●	M ●	H ●	H ●	VH ●
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L ●	M ●	M ●	H ●	H ●
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	N ●	L ●	M ●	M ●	H ●
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N ●	N ●	L ●	L ●	M ●
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N ●	N ●	N ●	L ●	L ●
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N ●	N ●	N ●	N ●	N ●

Tabla 4. Análisis de riesgos.

Lo anteriormente descrito da cabida a una oportunidad de realizar un proyecto de automatización que ayude a mitigar los riesgos encontrados en el anterior estudio, con el cual la empresa ahorraría en sanciones, ya que de acuerdo con las reglamentaciones y normas del MINISTERIO DE AMBIENTE constituidas en el documento RAS 2000, al no cumplir con los capítulos que le aplican al debido tratamiento de aguas residuales se tendrían sanciones multimillonarias tal y como se expresa en el código penal colombiano en el título XI “De los delitos contra los recursos naturales y el medio ambiente”, capítulo Único “Delitos contra los recursos naturales y medio ambiente”, en sus artículos:

### **328 Ilícito aprovechamiento de los recursos naturales renovables**

“<Artículo modificado por el artículo 29 de la Ley 1453 de 2011. El nuevo texto es el siguiente:> El que con incumplimiento de la normatividad existente se apropie, introduzca, explote, transporte, mantenga, trafique, comercie, explore, aproveche o se beneficie de los especímenes, productos o partes de los recursos fáunicos, forestales, florísticos, hidrobiológicos, biológicos o genéticas de la biodiversidad colombiana, incurrirá en prisión de cuarenta y ocho (48) a ciento ocho (108) meses y multa hasta de treinta y cinco mil (35.000) salarios mínimos legales mensuales vigentes.

La pena se aumentará de una tercera parte a la mitad, cuando las especies estén categorizadas como amenazadas, en riesgo de extinción o de carácter migratorio, raras o endémicas del territorio colombiano.”

### **331 Daños en los recursos naturales.**

“Incurrirá en prisión de cuarenta y ocho (48) a ciento ocho (108) meses y multa de ciento treinta y tres punto treinta y tres (133.33) a quince mil (15.000) salarios mínimos mensuales legales vigentes.

La pena se aumentará de una tercera parte a la mitad cuando:

- Se afecten ecosistemas naturales, calificados como estratégicos que hagan parte del Sistema Nacional, Regional y Local de las áreas especialmente protegidas.
- Cuando el daño sea consecuencia de la acción u omisión de quienes ejercen funciones de control y vigilancia” [6].

Los beneficios económicos son los siguientes:

1. Disminución de multas por contaminación de las aguas del río Orotoy.

En el departamento jurídico de la empresa y en concordancia con la empresa pública CORMACARENA, encargada de la regulación de multas ambientales en el sector de producción; se ha determinado que el Río Orotoy se contamina una vez al año en tiempo de sequía. Las condiciones para realizar el vertimiento de aguas en el río Orotoy es que deben estar dentro de unos parámetros establecidos por esta empresa pública equivalentes a SST  $\leq$  3 ppm, Grasa y Aceites  $\leq$  3 ppm. En épocas de verano que el volumen y por tanto el flujo de agua del río disminuye es cuando se evidencia más la contaminación y generalmente es una vez al año.

2. Disminución de multas y reparaciones por causa de inundaciones de las poblaciones rivereñas.

En épocas de invierno se han evidenciado inundaciones en los pueblos rivereños que tiempo atrás no sucedía, por lo cual la empresa encargada de vigilancia ambiental CORMACARENA determinó que la cantidad de barriles de agua de producción vertida al río aumenta significativamente el daño ocasionado por las inundaciones y la empresa aceptando la responsabilidad social acordó un plan de mitigación de riesgos de inundaciones con el que deben cumplir ciertas adecuaciones a los pueblos rivereños por un valor de \$2'000.000.000 COP anuales.

3. Reducción de reparaciones de salud a personas por causa de la contaminación de las aguas del río Orotoy.

Debido a las desafortunadas contaminaciones hechas al río, la empresa ha dispuesto un plan de saneamiento y salubridad ambiental para reparar a las

víctimas de los pueblos aledaños que utilizan el agua para actividades domésticas y agrarias por un valor de \$1.000.000.000 COP anuales.

4. Disminución del costo del contrato de carrotanques que transportan el agua de producción.

Actualmente están vertiendo 240 mil BWPD que son transportados a través de carrotanques con un contrato con la empresa COLTANQUES S.A por un valor de \$800.000.000 los cuales se buscan reducir a 2/3 con reinyección de 80 mil BWPD en un pozo disposal por lo cual el valor del contrato quedaría reducido también en la misma proporción.

Obteniendo los siguientes beneficios económicos durante 5 años después de la puesta en marcha del proyecto, como se muestra en la Tabla 5.

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
	COP	COP	COP	COP	COP	COP
B1	\$ 8.593.200.000	\$ 8.593.200.000	\$ 12.889.800.000	\$ 12.889.800.000	\$ 12.889.800.000	\$ 12.889.800.000
B2	\$ 666.666.666	\$ 666.666.666	\$ 666.666.666	\$ 666.666.666	\$ 666.666.666	\$ 666.666.666
B3	\$ 333.333.333	\$ 333.333.333	\$ 333.333.333	\$ 333.333.333	\$ 333.333.333	\$ 333.333.333
B4	\$ 266.666.666	\$ 266.666.666	\$ 266.666.666	\$ 266.666.666	\$ 266.666.666	\$ 266.666.666

Tabla 5. Beneficios económicos con la implementación del proyecto.

VPN Costos Actual	\$128.600.927.253
VPN Costos con Proyecto	\$95.901.865.733
VPN Inversión del Proyecto	\$24.756.139.022

<b>Relación Beneficio/Costo</b>	<b>1.32</b>	
Análisis de Sensibilidad +	1.15	15%
Análisis de Sensibilidad -	1.47	-10%
Análisis de Sensibilidad Critico	32%	

Tabla 6. Relación beneficio/costo del proyecto.

Debido al anterior análisis y de la tabla 6 se toma la decisión de realizar el proyecto automatizado denominado "SISTEMA PILOTO DE REINYECCIÓN DE AGUA DE PRODUCCIÓN DE UNA ESTACIÓN DE BOMBEO DE CRUDO A UN POZO DISPOSAL".



# CÁPITULO 2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

## 2.1. BASES Y CRITERIOS DEL SISTEMA AUTOMATIZADO

A continuación se especifican los requerimientos para el control y manejo del sistema de inyección de agua desde la estación castilla II al pozo disposal.

Tomando como base la descripción del proceso se realiza el dimensionamiento de la instrumentación necesaria para:

- Válvulas de control para garantizar el NPSHr de las bombas Booster.
- Bombas Booster de 50.000 BWPD a una presión de 200 psig.
- Válvula de control para la recirculación bombas Booster.
- Válvula de alivio y seguridad bombas Booster.
- Bombas Principales de inyección 20.000 BWPD con una potencia 1500 HP.
- Válvula de control en la línea al pozo.
- Válvula de control para la recirculación bombas de Inyección.
- Válvulas de alivio y seguridad para cada bomba de Inyección.
- Medidor de flujo en la línea de transferencia (Aprox. 7km.).
- Sistema de control y protocolo asociado [7].

### 2.1.1. Datos generales

#### 2.1.1.1. Sistema de transmisión de señales

Las señales de transmisión y control a utilizar por los sistemas de control y por la instrumentación de campo asociada son:

- Señales de entrada discretas utilizando contactos secos, en un circuito 24VDC.
- Señales de salida discretas en 24VDC.
- Señales neumáticas de 6-30 psig.
- Señales digitales de transmisores con protocolo de comunicación Foundation Fieldbus.

### **2.1.1.2. Placas de identificación de instrumentos**

Los instrumentos contienen placas de identificación de acero inoxidable, indicando mínimo la siguiente información:

- Identificación del Instrumento (Tag No.).
- Nombre del fabricante, modelo y número de serie del instrumento.
- Información relevante, tal como tipo de señal, capacidad de voltaje y corriente, frecuencia, rango, materiales, etc.

## **2.1.2. Especificaciones Hardware y Software**

### **2.1.2.1. Hardware**

Los requerimientos del Hardware para el proyecto Reinyección agua SOA (Disposal), involucran el control de las unidades principales y control de la instrumentación en el campo especificado como DCS y tarjetas de interfase soportadas en protocolo Foundation Fieldbus. El objetivo primordial del diseño e implementación del DCS y tarjetas de interfase es el control en todas las fases del proceso.

El DCS es diseñado para ejercer las funciones de control del sistema de reinyección de agua, monitoreo de eventos, confirmación visual y sonora, protecciones, tendencias, diagnóstico y display gráfico de información pertinente al proceso dinámico y monitoreo continuo del sistema de alarmas.

El control del sistema incluye el encendido y apagado de bombas, y control de los instrumentos asociados a las bombas y al proceso.

### **2.1.2.2. Software**

En el DCS se configuran las interfaces gráficas de operación, reportes de alarmas, acciones de seguridad, enclavamientos o las comunicaciones requeridas para los Equipos y Unidades Paquete.

### **2.1.3. Transmisión de Señales Eléctricas**

Los transmisores para aplicaciones de control o monitoreo, son definidos con salida digital, y con tecnología de comunicación Foundation Fieldbus.

Las señales de temperatura de las bombas de inyección para aplicaciones de monitoreo son originadas en RTD de PT-100 de 3 hilos. Estas señales y las señales de vibración están conectadas a los relés multifunciones correspondientes a cada bomba ubicados en el CCM (Disposal). Para la comunicación del sistema de control eléctrico y el sistema Delta V (Disposal), se utiliza protocolo Modbus TCP/IP.

Para las bombas Booster se utilizan transmisores de temperatura con protocolo Foundation Fieldbus para transmitir las señales de temperatura y vibración de las bombas.

Los posicionadores de las Válvulas de Control son definidos con tecnología de comunicación Foundation Fieldbus.

Las bombas Booster tienen arrancadores suaves para ponerlas en funcionamiento, estos arrancadores suaves se integran al sistema de control Delta V por medio de comunicación Profibus D.P.

Los arrancadores de los motores de las bombas de inyección se especifican como Variadores de velocidad (VFD) y para la protección de los motores se utilizan relés multifunciones de media tensión. De este modo son integradas las señales de monitoreo del Sistema de control Eléctrico al Sistema de Control Delta V, utilizando comunicación Modbus TCP/IP.

Todo esto se observa en la Figura 6 en donde se muestra la arquitectura de control del sistema.

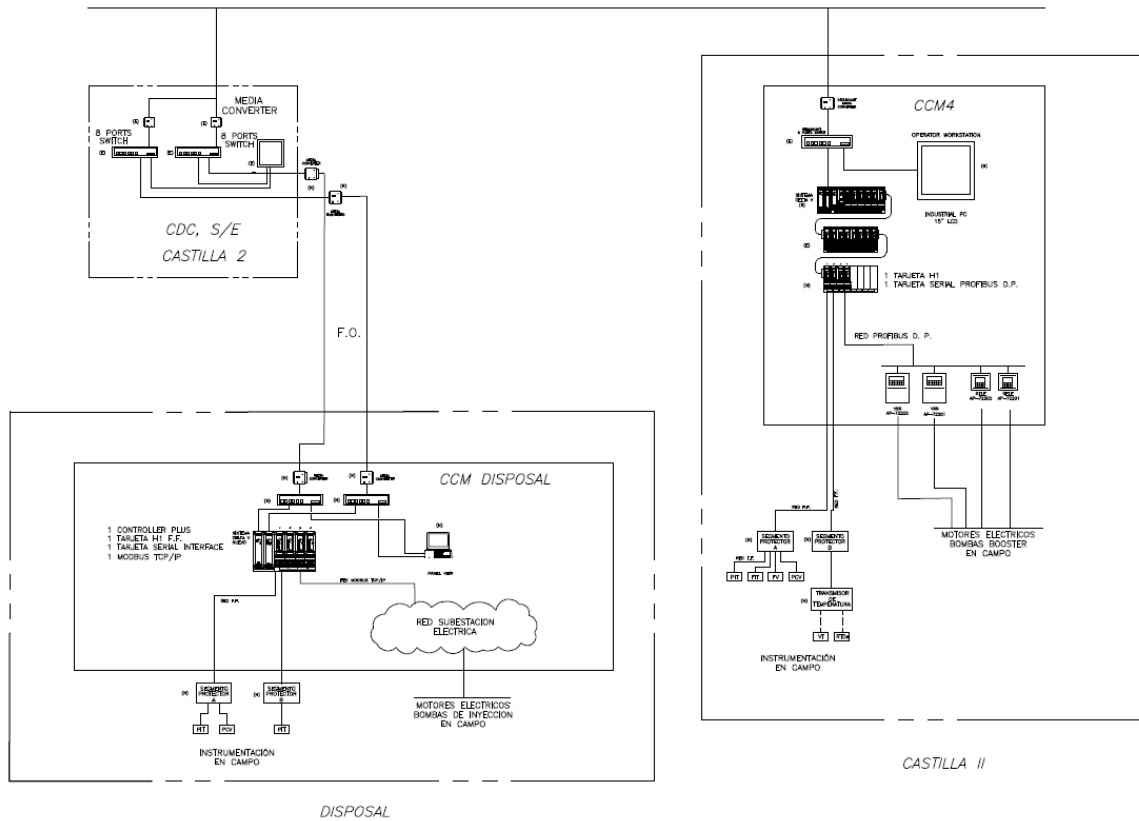


Figura 6. Arquitectura de control.

### 2.1.4. Alimentación eléctrica de instrumentos

Los instrumentos que por sus características requieren alimentación eléctrica en corriente alterna son especificados para ser alimentados a una tensión de 120VAC desde los sistemas regulados, UPS. Se utilizan UPS del tipo regulado electrónico con baterías libres de mantenimiento.

Los instrumentos que por sus características requieren alimentación eléctrica en corriente continua son especificados para ser alimentados a una tensión de 24VDC desde fuentes redundantes de 24VDC ubicadas e instaladas en el gabinete marshalling.

La instrumentación de campo se alimenta desde estos gabinetes, tomando en cuenta la cantidad de señales y la distribución de fuentes redundantes por riel independiente, el espacio a futuro de las señales, la cantidad de barreras IS, la capacidad de espacio en cada marshalling y la carga total requerida a futuro para el dimensionamiento de la capacidad de las fuentes de 24VDC.

No se acepta alimentar y energizar equipos de actuadores eléctricos, motores eléctricos, alumbrados de emergencia, intercom, desde el sistema redundante de UPS que alimenta la instrumentación y control. El sistema redundante de UPS que alimenta la instrumentación y el control es un sistema dedicado e independiente, ubicado en el cuarto de control.

### **2.1.5. Especificación de instrumentación**

#### **2.1.5.1. Transmisores**

Los transmisores serán electrónicos digitales, compatibles con la selección del sistema de control y DCS cuando operan en modo inteligente, con encerramiento NEMA 4X. Sus hojas de datos se observan en el anexo 4, con detalles de instalación indicados en el anexo 5.

#### **2.1.5.2. Instrumentos de Medición de flujo ultrasónico**

El instrumento de flujo es instalado de manera tal que permite fácilmente su retiro y mantenimiento. Se trata de medidor ultrasónico con método de medida tiempo de tránsito es no-intrusivo con dos (2) canales y cuatro (4) sensores.

#### **Instalación**

Los medidores ultrasónicos se instalaran verificando sus características para:

- Lugares de alto ruido, como válvulas de control con cavitación o ruidosas debe evitarse.
- El medidor se instala aguas arriba y aguas abajo en longitudes recta según lo especifique el proveedor para garantizar el correcto funcionamiento del instrumento.

Se contempla suficiente espacio en la parte superior e inferior del medidor para limpieza y reparación.

### **2.1.5.3. Instrumentos de Medición de Presión**

Las conexiones de presión están ubicadas en la parte superior de la tubería. Con el instrumento ubicado lo más cerca posible de la toma de presión, tal que sea posible el ajuste de cero debido a la columna de líquido.

### **2.1.5.4. Elementos finales de control**

En el anexo 2 se observan las memorias de cálculo para válvulas de control.

El posicionador de la válvula de control es del tipo inteligente con funciones de auto-diagnóstico y auto-calibración. El conjunto actuador-posicionador de la válvula de control opera en un rango de señal neumática de 6 - 30 psig para el desplazamiento total de la válvula. La válvula está provista de bridas.

El cumplimiento del nivel de ruido permisible de la válvula es  $< 85$  dB, de acuerdo a las normas aplicables, calculado por los métodos recomendados por ISA y por el proveedor específico.

### **Acción de falla de las válvulas**

Las acciones de fallas de las válvulas se clasificaran de la siguiente manera:

- Falla Abierta o Fail Open: La válvula abre en falla de aire.
- Falla Cerrada o Fail Closed: La válvula cierra en falla de aire.

La acción de falla de las válvulas seleccionadas hacen que el actuador coloque a la válvula en posición abierta en caso de falla de suministro de aire como se observa en los P&ID del anexo 1.

### **Característica de Flujo de válvulas**

La característica de flujo de las válvulas de control es determinada de acuerdo a cada aplicación específica.

En general, para característica lineal:

- Para fluctuaciones pequeñas de las condiciones de carga,
- Cuando la caída de presión en la válvula de control representa, más de 2/3 de la caída total de presión en la línea (o la diferencia de presión con la válvula cerrada).
- Para aplicaciones que requieran operación suave.

Para característica igual porcentaje:

- Para aplicaciones con fluctuaciones grandes de presión y flujo.
- Para caídas de presión en la válvula pequeña en comparación con la caída de presión en el resto del sistema.

## **2.2. FILOSOFÍA DE CONTROL**

La filosofía de operación y control para el sistema de Reinyección de agua SOA DISPOSAL define el conjunto de procedimientos operacionales y conceptos necesarios para asegurar el adecuado funcionamiento del sistema dentro de las restricciones impuestas por el diseño y las características físicas de la infraestructura; cubriendo aspectos como:

- Operaciones remotas.
- Secuencias lógicas de operaciones.
- Información disponible para el operador en el HMI (Interfase hombre-máquina), tal como: alarmas, estados y variables.
- Criterios de falla que deben resultar en una Parada de Emergencia (ESD, Emergency Shutdown), de un equipo o del sistema de reinyección de agua.
- Equipos que pueden arrancarse o pararse remotamente.
- Funcionamiento de las bombas o de Disposal en caso de falla en el sistema de control local o en las comunicaciones.

Bajo condiciones normales de operación, las bombas de inyección, bombas booster, y los set-points de presión y/o flujo de las válvulas de control del sistema son controladas remotamente desde el CCM4 de castilla II. No obstante, desde el Delta V (Disposal) es posible monitorear el estado de las 5 bombas de inyección y

las 2 bombas Booster. Localmente bajo condiciones de falla en comunicaciones las bombas de inyección pueden ser operadas desde el Delta V (Disposal).

### **2.2.1. Rutinas operacionales**

#### **2.2.1.1. Rutina de Operación de las Bombas Booster**

Este sistema dispone de 2 bombas. Su sistema de control Incluye:

1. Transmisor de presión de succión.
2. Transmisor de presión de descarga.
3. Conjunto de elementos de temperatura tipo RTD en los rodamientos, devanados y housing.
4. Transmisores de vibración.

Toda la instrumentación asociada a cada una de las bombas Booster es soportada en el protocolo Foundation Fieldbus H1. Estas señales son llevadas al Delta V CCM4 ya existente en Castilla II, el cual recibirá y concentrará todas las señales (presión, temperaturas, vibración y flujo) de monitoreo, protección y las variables de las bombas.

Para garantizar el NPSHr de las bombas Booster se cuenta con un lazo de control entre las válvulas de control FV-72200/01 ubicadas en los cabezales que vienen de los filtros y un transmisor de flujo ultrasónico FIT-72200 ubicado en la línea de despacho hacia las bombas de inyección o un transmisor de presión PIT-72200 ubicado en el cabezal de succión de las bombas Booster, la variable que predomina en el sistema es el flujo, sin embargo en operación es posible determinar la variable (presión o flujo) a tener en cuenta para la operación del sistema. En este lazo se establece un set point en el transmisor de flujo ultrasónico o el transmisor de presión PIT-72200 que controla el cierre de las válvulas FV-72200/01 dependiendo el cabezal que este en operación, con esta acción se desvían 100.000 BWPD a la línea de succión de las bombas Booster.

Como la capacidad inicial del sistema de las bombas de inyección en operación es para 80.000BWPD y el sistema de las bombas Booster tiene una capacidad total



de 100.000BWPD, es necesario recircular un flujo de 20.000 BWPD de los 100.000 BWPD. Esta recirculación se hará de acuerdo a un lazo de control que existe entre un transmisor de presión PIT-72201 instalado en el cabezal de descarga de las bombas Booster o un transmisor de flujo ultrasónico FIT-72200 ubicado en línea de despacho hacia las bombas de inyección y una válvula de control PCV -72200 instalada en la línea de recirculación de las bombas Booster.

En este lazo de control se hace necesario establecer un set point en el transmisor PIT-72201 o FIT-72200 que determine la posición de la válvula de control PCV-2200 y el flujo que se desea recircular. La válvula de control será normalmente cerrada y solo abrirá lo necesario para controlar la presión de succión de las bombas de inyección y el flujo de operación.

**Interlock 1:** En el cabezal de succión de las bombas Booster está instalado el PIT -72200 que tiene un permisivo de arranque para las bombas Booster por presión de succión, además este interlock también es un permisivo de arranque para las bombas de inyección, es decir si las bombas Booster no están encendidas, las bombas de inyección no pueden arrancar.

**Interlock 7:** En la línea de despacho hacia las bombas de inyección se instala un transmisor de flujo tipo Ultrasónico (clamp-on) que envía una señal al Delta V CCM4 para tener un monitoreo de la cantidad de agua que se está despachando hacia las bombas de inyección. Cuando el transmisor de flujo indique flujo cero, las bombas Booster empiezan a apagarse, así mismo las bombas de inyección.

Este sistema también cuenta con protección mecánica con una válvula de alivio PSV- 72200 ubicada en la línea de recirculación de las bombas Booster, esta válvula tiene un set point que alivia el sistema en caso que las demás protecciones no funcionen.

### 2.2.1.2. Sistema de control de las Bombas Booster

Para el arranque el sistema de las bombas Booster se dispone de arrancadores suaves por cada bomba que se encargan de ponerlas en funcionamiento.

El sistema de control para bombas Booster tiene:

- **Interlock 4:** Para el monitoreo de la presión de succión se dispone de un transmisor de presión en cada bomba con un rango de operación 0 -150 psig, que garantice que la bomba tenga una presión de succión apropiada para su operación, el transmisor envía una señal al Delta V CCM4 con el estado de la variable de presión en la succión de la bomba, que permitirá proteger y apagar la bomba por alta/alta o baja/baja presión.
- **Interlock 2:** Para el monitoreo de la presión de descarga se dispone de un transmisor de presión en cada bomba con un rango de operación de 0 a 400 psig, este transmisor envía una señal con el estado de la variable de presión en la descarga de la bomba al Delta V CCM4.  
Este lazo permite al Delta V CCM4 controlar y tomar acciones de apagado de la bomba en caso de una alta/alta o baja/baja presión.
- **Interlock 3:** Cada una de las bombas cuentan con transmisores de vibración, que permiten tener una protección mecánica. Estos Transmisores actúan si la bomba sobrepasa el rango permisible de vibración.  
Además de esta protección la bomba cuenta con un set de RTD que permiten el chequeo de la temperatura del motor y bomba enviando señales de reporte y en el caso que la temperatura de los devanados, rodamientos y housing se incremente la acción del control es la de apagar el motor de la bomba.

### 2.2.1.3. Rutina de Operación de las Bombas de Inyección

Este sistema cuenta con 5 bombas centrifugas. Su sistema de control incluye:

1. Transmisor de presión de succión.

2. Transmisor de presión de descarga.
3. Transmisores de vibración.
4. Conjunto de elementos de temperatura tipo RTD en los rodamientos, devanados y housing.
5. Sistema de prelubricación para arranque de bomba.

El sistema de control para las bombas de inyección debe garantizar que el arranque de las mismas sea secuencial, de manera que un (1) variador de velocidad (VFD) arranque la primera bomba y una vez esta tenga condiciones nominales de voltaje y frecuencia se conecta a la red por medio de un contactor de by-pass. En el paso siguiente el variador (VFD) empieza a arrancar la segunda bomba y así con la tercera hasta que todas las bombas estén en funcionamiento. Para garantizar el tiempo de vida de las bombas de inyección en la secuencia de arranque se incluye un comando que permita que la bomba que va a estar en Stand-by no sea siempre la misma.

En el sistema de las cinco (5) bombas de inyección se tiene un transmisor de presión PIT-2203 localizado en el cabezal de descarga de la bomba de inyección y una válvula de control PCV-72201 ubicada en la línea al pozo un set point definido, para cuando la primera bomba inicie el arranque se incrementa la presión hasta llegar a 1.000 psig. En ese momento la válvula abre hasta llegar a la apertura necesaria para el flujo de operación. Con esta válvula se mejora el tiempo de llenado y se garantiza que las bombas de inyección no apaguen por baja/baja presión.

**Interlock 6:** En el cabezal de descarga de las bombas de inyección se tiene instalado el PIT-72203 encargado de monitorear la presión y en caso de una alta/alta o baja/baja presión en la línea al pozo empezará a parar las bombas de inyección.

El arranque de las bombas se realiza desde el HMI del Delta V DISPOSAL, en este se verifica el estado de la instrumentación y a través de una comunicación Modbus TCP/IP con el controlador de las subestación eléctrica (Disposal) las

variables involucradas en la protección y el arranque de los motores de las bombas de inyección en Disposal.

En el proceso de arranque el controlador de la subestación eléctrica esta en constante comunicación con el Delta V (Disposal) indagando sobre el estado de las variables de proceso y el estado de las bombas Booster de tal manera que, en el momento del arranque del sistema, las bombas de inyección no empiecen a trabajar hasta que las bombas Booster no estén en operación, de modo que:

1. Si en la locación de castilla II solo arranca una bomba Booster, en la locación de Disposal solo pueden operar dos (2) bombas de Inyección.
2. Si en la locación de castilla II arrancan las dos (2) bombas Booster, en la locación de Disposal pueden operar las cuatro (4) o cinco (5) bombas de inyección.

Para un arranque automático, se realiza desde el Delta V CCM4 de Castilla II a través de una comunicación por fibra óptica redundante hasta el Delta V nuevo ubicado en el cuarto de control DISPOSAL.

Para este procedimiento el proveedor de las bombas garantiza la visualización del estado de las bombas y su instrumentación en el sistema de control.

La válvula PCV-72202 es la encargada de la recirculación del sistema, en caso de una sobrepresión abre lo necesario para aliviar el sistema. Esta recirculación se hace de acuerdo a un lazo de control que existe entre el transmisor de presión PIT-72203 instalado en el cabezal de descarga de las bombas de inyección y la válvula de control.

Este sistema también cuenta con protección mecánica con válvulas de alivio PSV-72201/202/203/204/205 ubicadas en la línea de recirculación de cada bomba de inyección, estas válvulas tienen un set point que alivia el sistema en caso que las demás protecciones no funcionen.

#### 2.2.1.4. Sistema de control Bombas de Inyección

El sistema de control para las bombas de Inyección tiene:

- **Interlock 4:** Para el monitoreo de la presión de succión se dispone de un transmisor de presión en cada bomba con un rango de operación de 0-200 psig, que garantiza que la bomba tenga una presión de succión apropiada para su operación, el transmisor envía una señal al Delta V en Disposal y este a su vez al Delta V CCM4, que permite conocer el estado de la variable de presión en la succión de la bomba y permite proteger y apagar la bomba por baja/ baja presión.
- **Interlock 5:** Para el monitoreo de la presión de descarga se dispone de un transmisor de presión en cada bomba con un rango de operación de 0-6000 psig, el transmisor envía una señal con el estado de la variable de presión en la descarga de la bomba al Delta V en Disposal y éste a su vez al del CCM4. El set point del transmisor de cada bomba es el mismo y en el caso de un incremento (alta/alta) o decremento (baja/baja) de la presión de la descarga se apagan las bombas.

Para que todas las bombas no apaguen simultáneamente, cada bomba tiene un tiempo de espera estimado en 60 segundos. De esta manera, si al apagarse una bomba la presión no se alivia, entonces se apaga la siguiente que tenga el menor tiempo de espera, además estos transmisores protegen y apagan las bombas por baja/baja presión de descarga.

- **Interlock 3:** Estas bombas cuentan con transmisores de vibración en cada una, ubicados en la cámara de empuje, que permiten tener una protección mecánica, que actúan si la bomba sobrepasa el rango permisible de vibración.

Además de esta protección, la bomba cuenta con un conjunto de RTD que permiten el chequeo de la temperatura del motor enviando al relé de media tensión señales de reporte y en caso que la temperatura de los devanados,

rodamientos y housing se incremente, la acción del control es el apagado del motor de la bomba para protegerla [8].

### 2.3. DIAGRAMA DE BLOQUES

En la Tabla 7 se observa la descripción de los bloques utilizados.

Bloque	Nombre	Descripción
<b>AI</b>	Analog Input (AI)	Bloque de acceso para una señal de medida análoga de campo.
<b>PID</b>	Proportional-Integral-Derivative (PID) control	Bloque que combina toda la lógica necesaria para el control PID.
<b>ALM</b>	Alarm Detection	Bloque que especifica las alarmas o parámetros que son obtenidas desde un dispositivo en campo.
<b>AO</b>	Analog Output (AO)	Bloque asignado a un valor de salida hacia un dispositivo en campo.
<b>ISEL</b>	Input Selector	Bloque selector de una entrada con base a una decisión de operación.
<b>OSEL</b>	Output Selector	Bloque selector de una salida con base a una decisión de operación.
<b>LFB</b>	Limit (LIM) Alarm Blocks	Bloque que determina el límite de una señal de entrada entre dos valores de referencia.
<b>OR</b>	Or (OR) Logical Blocks	Bloque que genera un valor de salida discreta basada en la lógica de una compuesta lógica OR.
<b>DC</b>	Device Control Blocks	Bloque que provee un setpoint de control para múltiples estados discretos de un dispositivo (motor, bomba).
<b>FLIP-FLOP</b>	Set-Reset Flip-Flop	Bloque que genera un valor de salida discreto basado en una compuerta lógica NAND.
<b>AND</b>	AND (AND) Logical Blocks	Bloque que genera un valor de salida discreta basada en la lógica de una compuesta lógica AND.

*Tabla 7. Descripción de bloques del sistema de control.*

En la Figura 7 se observa el lazo para garantizar paso de flujo de bombas booster con el PIT-72200 ó FIT-72200 / FV-72200 ó FV-72201.

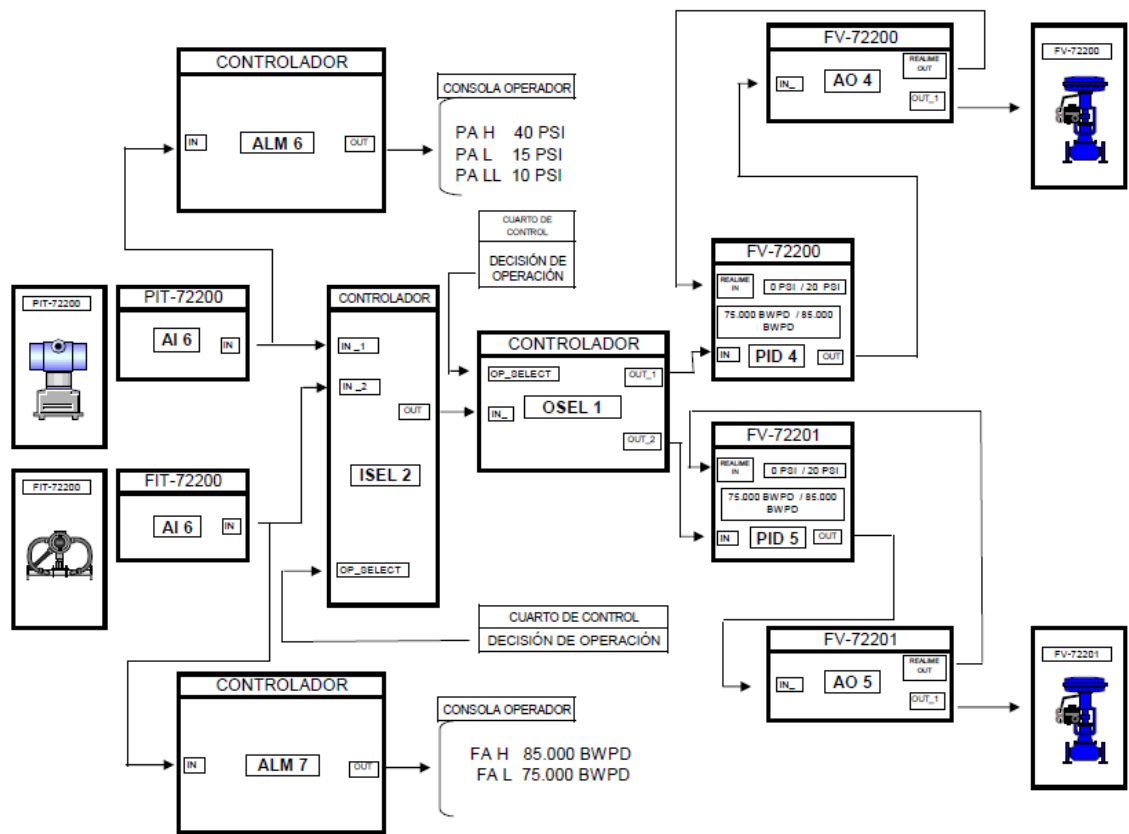


Figura 7. Lazo para garantizar paso de flujo de bombas booster con el PIT-72200 ó FIT-72200 / FV-72200 ó FV-72201.

En la Figura 8 se observa el lazo de recirculación de las bombas booster PIT-72201 ó FIT-72200 / PCV-72200.

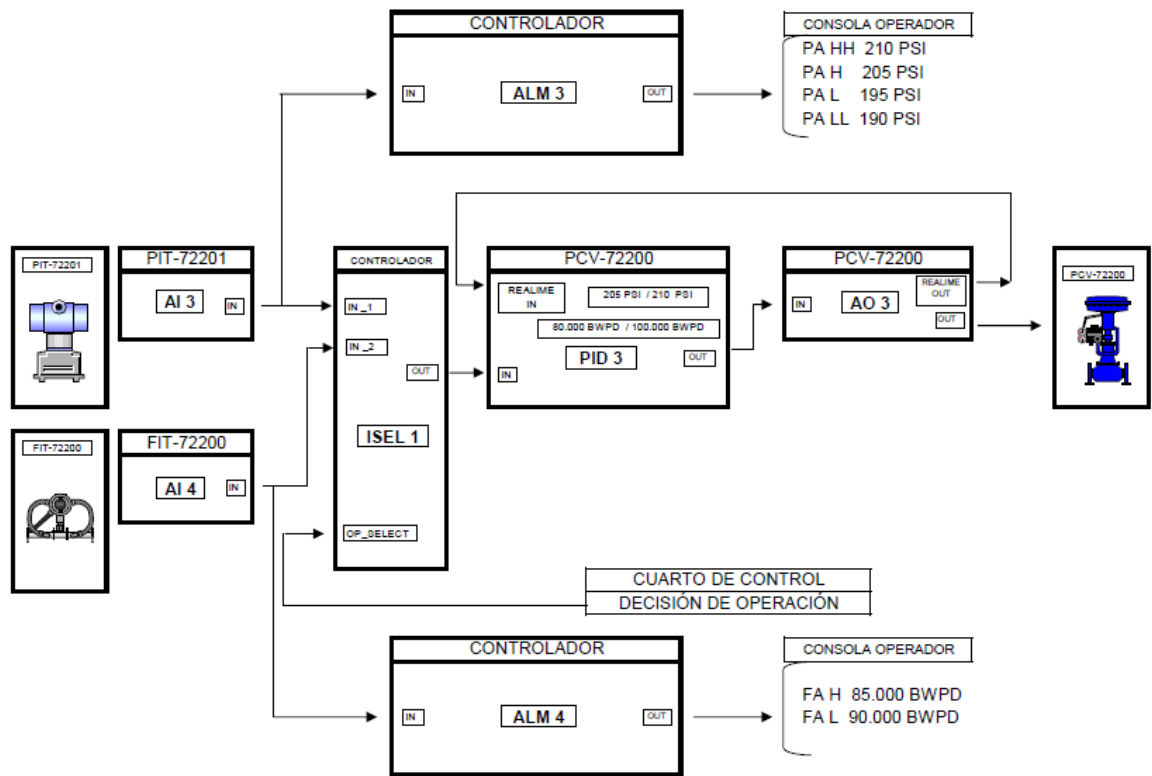


Figura 8. Lazo de recirculación bombas booster PIT-72201 ó FIT-72200 / PCV-72200.

En la Figura 9 se observa el lazo de indicación de alarmas del PIT-72202.

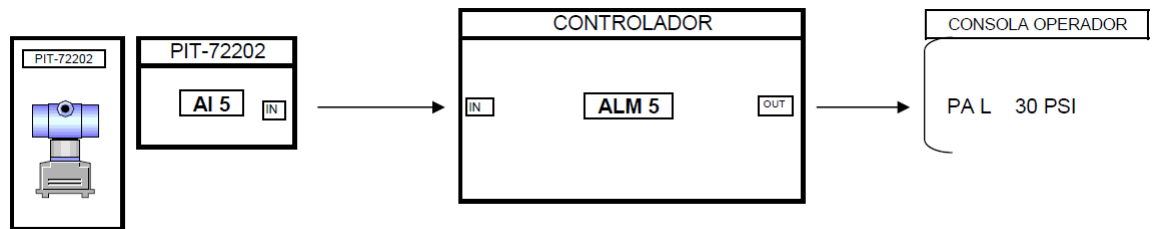


Figura 9. Lazo de indicación de alarmas del PIT-72202.

En la Figura 10 se observa el diagrama de bloques del lazo de la línea al pozo de bombas de inyección PIT-72203/PCV-72201.



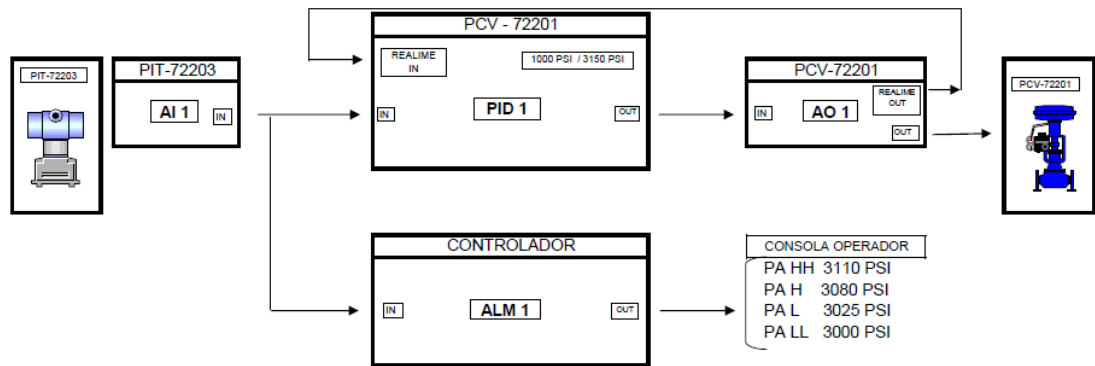
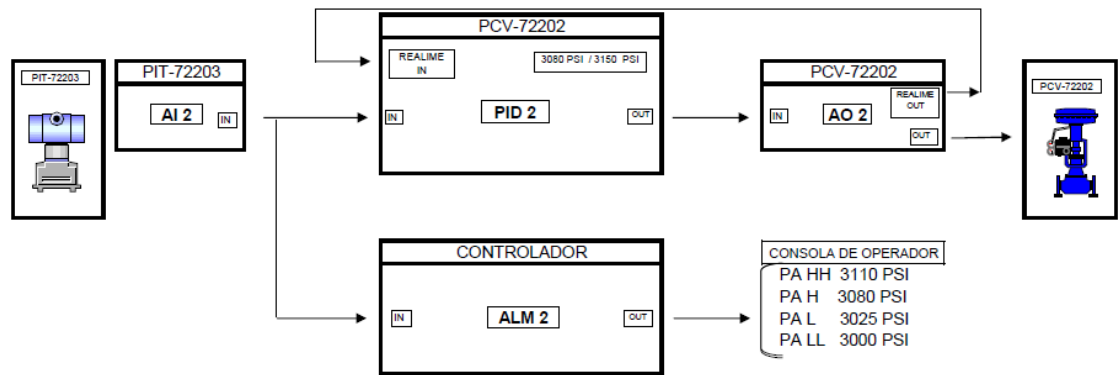


Figura 10. Lazo línea al pozo de bombas de inyección PIT-72203/PCV-72201.

En la Figura 11 se observa el lazo de recirculación de bombas de inyección PIT-72203 / PCV-72202.



NOTA  
 1. La posición de la válvula en caso de falla en el suministro de aire sera falla abierta y en el caso que el transmisor de presión falle la válvula mantendra el ultimo valor de entrada

Figura 11. Lazo de recirculación bombas de inyección PIT-72203 / PCV-72202.

Se debe destacar que para los casos anteriores la posición de la válvula en caso de falla en el suministro de aire será falla abierta, y en el caso que el transmisor de presión o de flujo presente falla la válvula mantendrá el último valor de entrada [9].

## 2.4. DIAGRAMAS DE CONEXIONADO Y JUNCTION BOXES

En el anexo 6 se observan los diagramas de conexionado y de Junction boxes y gabinetes utilizados.

# CÁPITULO 3. RESULTADOS

En la Figura 12 se observa el diagrama final de funcionamiento del sistema.

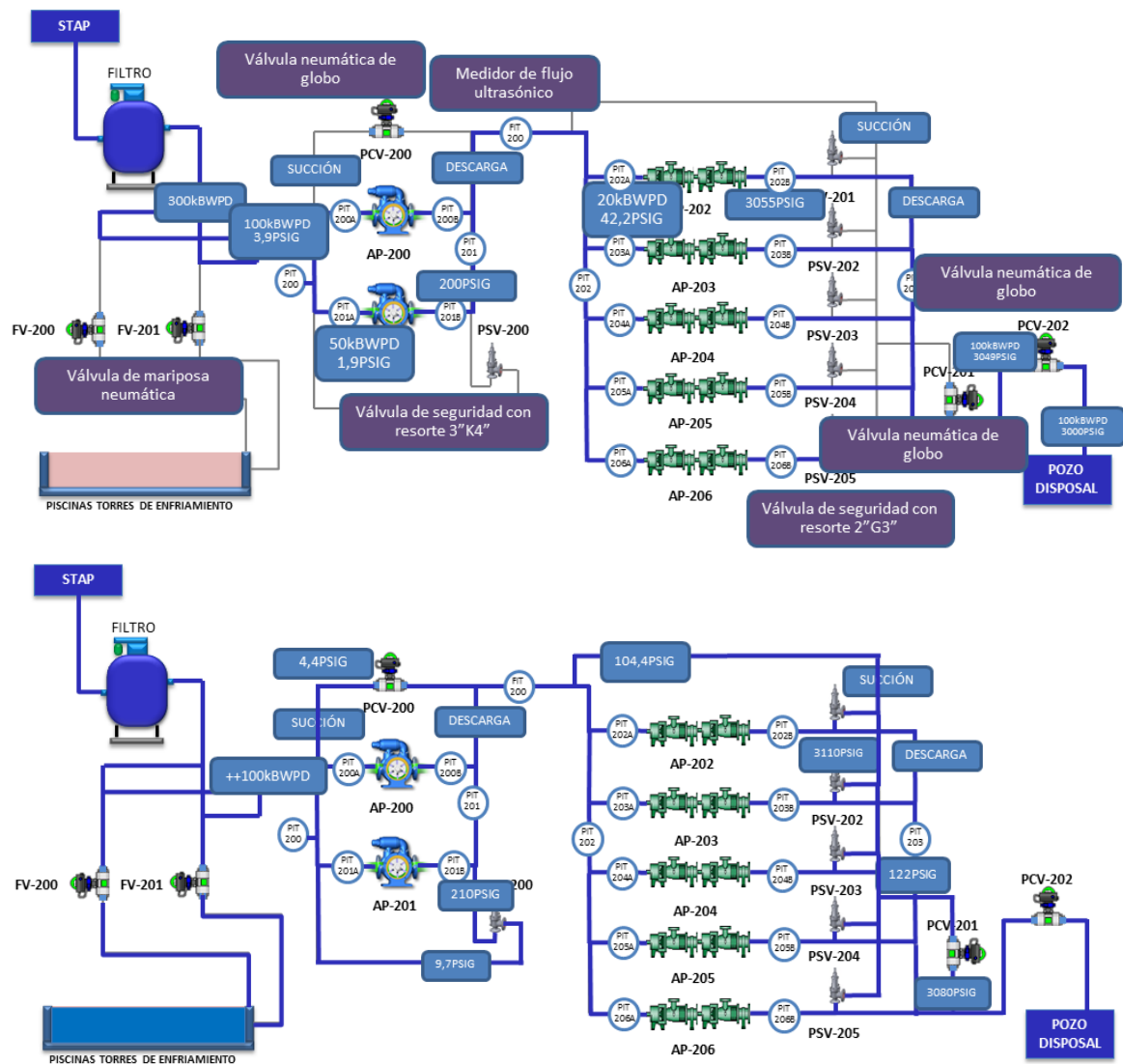


Figura 12. Sistema de reinyección de agua de producción de pozo de Castilla II a pozo disposal.

En el desarrollo del proyecto se realiza un cambio de TAG a los equipos por parte de Ecopetrol SOC como se observa en la lista de equipos del anexo 2.

### 3.1. CRITERIOS PRUEBAS FUNCIONALES

Para realizar pruebas funcionales del sistema, se tomaron en cuenta los siguientes criterios:

#### 3.1.1. Seguridad del sistema

1. Los límites de trabajo de los equipos deben conservar los valores que se observan en la Tabla 8 y 9 de interlocks.

INTERLOCK BOMBA BOSTER AP-72613A/B				
TAG	DESCRIPCIÓN	IDEAL	CONDICIÓN	OBSERVACIÓN
PIT-73301	BAJA PRESION SUCCION CABEZAL	15 PSI	< 0 PSI	APAGA INMEDIATO BOOSTER
PIT-72183	ALTA ALTA PRESION DE DESCARGA BOMBA	220 PSI	> 250 PSI	APAGA INMEDIATO BOOSTER
	BAJA BAJA PRESION DE DESCARGA BOMBA		<170PSI	CONDICION BOMBA OPERANDO – TEMPORIZADO 21 SEG DURANTE ARRANQUE DE LA BOMBA BOOSTER Y DURANTE EL ARRANQUE DE CUALQUIERA DE LAS BOMBAS DE INYECCIÓN EL TEMPORIZADO ES DE 30 SEG.
PIT-72182	ALTA ALTA PRESION DE SUCCION BOMBA	15 PSI	> 45 PSI	APAGA INMEDIATO BOOSTER
	BAJA BAJA PRESION DE SUCCION BOMBA		< 2 PSI	TEMPORIZADO 30 SEG DURANTE ARRANQUE DE LA BOMBA
XT-7206	ALTA ALTA VIBRACION	0,05 in/seg	> 0,35 in/seg	EN BY PASS POR QUE NO SE HA SIDO HABILITADO (APAGA INMEDIATO BOOSTER)
FIT-7219	FLUJO "0" EN SALIDA	40000 BWPD	0	CONDICION BOMBA OPERANDO – TEMPORIZADO 10 MINUTOS DURANTE ARRANQUE DE UNA SOLA BOOSTER
TE-7289	RTD 1 FASE A AP-72613 <sup>a</sup>	170°F	>215°F	APAGADO INMEDIATO BOOSTER
TE-7290	RTD 2 FASE A AP-72613B			
TE-7291	RTD 1 FASE B AP-72613 <sup>a</sup>			
TE-7292	RTD 2 FASE B AP-72613B			
TE-7293	RTD 1 FASE C AP-72613 <sup>a</sup>			
TE-7294	RTD 2 FASE C AP-72613B			
TE-7295	RTD RODAMIENTO LADO ACOPLA AP-72613 <sup>a</sup>			
TE-7296	RTD RODAMIENTO LADO LIBRE AP-72613B			
XXX	ACCION DE FALLA SEGURA	XXX	XXX	POR FALLA DE COMUNICACIONES APAGADO IMEDIATO BOOSTER

Tabla 8. Interlocks bomba booster AP-72613A/B.

INTERLOCKs BOMBA AP-7601 A/C/D				
TAG	DESCRIPCIÓN	IDEAL	CONDICION	OBSERVACION
FIT-7219	FLUJO CERO BOOSTER	80000 BWPD	0	CONDICION BOMBA OPERANDO – TEMPORIZADO 10 SEG DURANTE ARRANQUE DE LA BOMBA O QUE EXISTA OTRA BOMBA OPERANDO
PIT-7602	ALTA ALTA PRESION CABEZAL DE DESCARGA	1550 PSI	>2000 PSI	APAGA EN EL ORDEN CONTRARIO EN QUE SE ENCENDIERON LAS BOMBAS DE INYECCIÓN CON INTERVALOS DE APAGADO DE 60 SEGUNDOS
	BAJA BAJA PRESION CABEZAL DE DESCARGA		<550 PSI	CONDICION BOMBA OPERANDO – TEMPORIZADO 15 MINUTOS DURANTE ARRANQUE DE LA BOMBA DE INYECC. Y SI EN FUNCIONAMIENTO SE BAJA LA PRESION LA BOMBA INMEDIATAMENTE SE APAGA
PIT-7603	ALTA ALTA PRESION DE SUCCIÓN BOMBA	150 PSI	> 250 PSI	SE APAGA INMEDIATAMENTE
	BAJA BAJA PRESION DE SUCCIÓN BOMBA		< 40 PSI	CONDICION BOMBA OPERANDO – TEMPORIZADO 2 MINUTOS DURANTE ARRANQUE DE LA BOMBA. PERO SI LA PRESION SE DISMINUYE OPERANDO SE APAGA INMEDIATAMENTE
PIT-7604	ALTA ALTA PRESION DE DESCARGA BOMBA	1550 PSI	>2000 PSI	SE APAGA INMEDIATAMENTE
	BAJA BAJA PRESION DE DESCARGA BOMBA		<800 PSI	CONDICION BOMBA OPERANDO – TEMPORIZADO 15 MINUTOS DURANTE ARRANQUE DE LA BOMBA DE INYECC. Y SI EN FUNCIONAMIENTO SE BAJA LA PRESION LA BOMBA INMEDIATAMENTE SE APAGA
XT-7601	ALTA ALTA VIBRACION EN CAMARA	0,1 in/seg	>0,20 in/seg	TEMPORIZADO DE 2 SEGUNDOS Y APAGA
FT-7601	BAJO BAJO FLUJO ACEITE CAMARA	10,5 GPM	< 5 GPM	TEMPORIZADO DE 2 SEGUNDOS Y APAGA
TT-7601	ALTA ALTA TEMPERATURA CAMARA	140 °F	>167 °F	SE APAGA INMEDIATAMENTE
TE-7601/06	ALTA ALTA TEMPERATURA DEVANADOS	160°F	>320	SE APAGA INMEDIATAMENTE
TE-7607/8	ALTA ALTA TEMPERATURA COJINETES	140°F	>194	SE APAGA INMEDIATAMENTE
XXX	PERMISIVO ELECTRICO CELDA	XXX	XXX	NO PERMITE ARRANCAR SI ESTA DESHABILITADO. SOLO APLICA DURANTE EL ARRANQUE
XXX	PERMISIVO ELECTRICO SAS	XXX	XXX	NO PERMITE ARRANCAR SI ESTA DESHABILITADO. SOLO APLICA DURANTE EL ARRANQUE

Tabla 9. Interlocks bomba de inyección AP-7601A/C/D.

2. La protección del motor de las bombas de inyección se hace a través de las protecciones del variador que arrancará las bombas AP-7601A/D. El motor de la bomba AP7601C no tendrá esta protección adicional debido a que se arrancará en forma directa.
3. Se deben tener deshabilitadas las protecciones del interruptor aguas abajo del VDF a fin de evitar algún daño al variador, se habilitará cuando se defina el punto de operación definitivo mediante las pruebas realizadas.
4. Debe estar habilitada la señal de parada de emergencia de las bombas AP7601A/C/D.

5. La señal de temperatura del RTD del motor también debe disparar la protección del variador.

### **3.1.2. Descripción de actividades**

Antes de arrancar el sistema, se deben verificar los equipos, tubería, sistema eléctrico y de control e Instrumentación.

#### **CONDICIONES DE OPERACIÓN:**

En operación normal el sistema maneja 80.000 BWPD. En este arranque se manejará 60.000 BWPD en pozo de inyección en la primera etapa de la puesta en marcha, que sería el arranque de dos bombas con variador de velocidad a un flujo de 30.000 BWPD cada una y posteriormente en una segunda etapa se operarán tres bombas a 27.000 BWPD. Para cada una de las bombas a trabajar, con la diferencia de que la bomba AP-7601C se arrancará en carga directa, por tal motivo será la primera en arrancar según recomendación del fabricante y las otras dos que poseen variador se arrancarán inmediatamente después.

Las bombas Booster AP-72613A y AP72613B entregarán 100.000 BWPD y se recircularán 20.000 BWPD por la válvula de control de presión PCV-72181.

El diseño del sistema se realiza para manejar un caudal máximo de inyección de 80.000 BWPD, debido a la limitante de bombas de inyección.

El pozo Disposal tiene una presión de operación de 1300 psig y resiste una presión máxima de operación de 3.100 psig, pero debido a las modificaciones mecánicas de las bombas no opera a más de 2.000 psig.

El lazo de control de presión PCV-7602A entrará en operación. Para dar el punto de trabajo de las bombas de inyección y el ingreso al pozo será por el costado que no tiene choque, con una apertura de 100% para eliminar al máximo las restricciones de presión. Esta PCV será el punto de control global de todo el sistema de inyección, el cual iniciará de forma manual para encontrar su punto de operación efectivo e inmediatamente después se realizará el afinamiento de respuesta y rangos.

### 3.1.3. Criterios de bombas

#### 3.1.3.1. Bombas Booster:

Se pondrá en servicio las dos bombas Booster centrifugas (AP-72613A Y AP72613B) de 50.000 BWPD c/u y potencia de 245 HP.

No habrá bomba Booster de stand by, ni se tendrá bomba de respaldo, es decir que en caso de parada de alguna de ellas el sistema de inyección tendrá que ser ajustado según criterio del operador para evitar que se descargue la línea.

**Nota:** La manipulación de las bombas Booster será realizada y puesta a punto mediante la curva de la bomba de la Figura 13.

Dentro de los datos operativos de las bombas se tiene:

- Capacidad: 1458 GPM (50.000 BWPD).
- Presión de operación: 200 PSI.
- Temperatura de operación: 180°F
- Presión de diseño: 220 PSI.
- Temperatura de diseño: 200°F

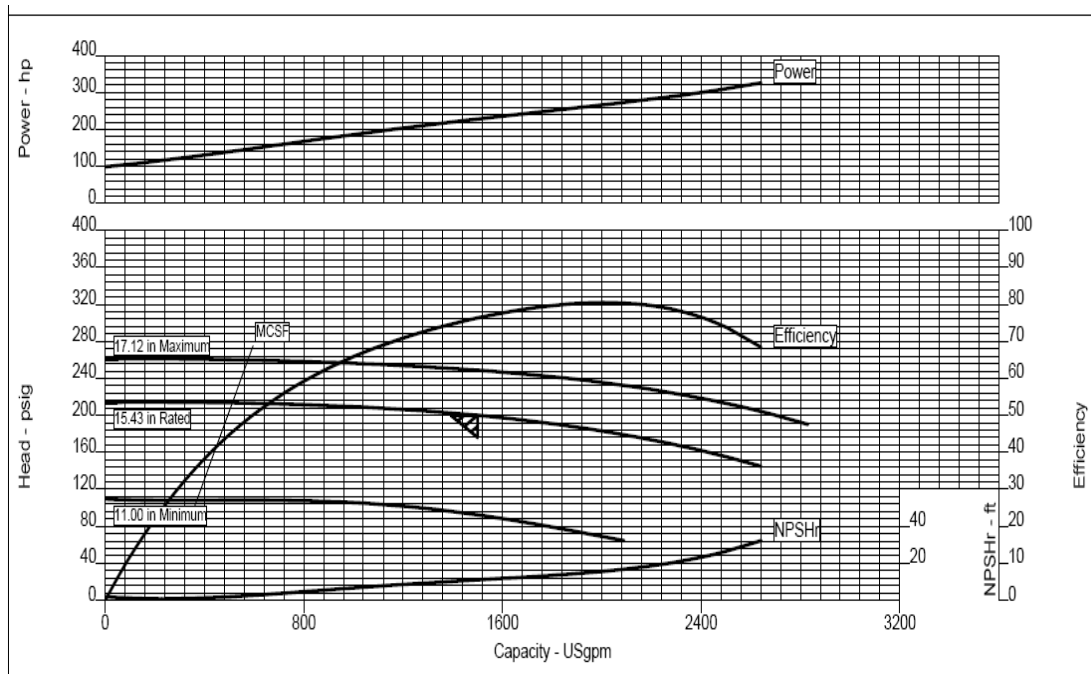


Figura 13. Curva de operación de las bombas booster.

### 3.1.3.2. Bombas de inyección:

Se pondrán en servicio dos bombas de inyección centrífugas multietapa; la AP-7601A y AP-7601D. La bomba B y E serán stand by,

Cada bomba debe tener la capacidad para manejar 30.000 BWPD y con una potencia de 1500 HP.

Nota: La manipulación de las bombas de inyección será realizada y puesta a punto mediante la curva de la bomba de la Figura 14.

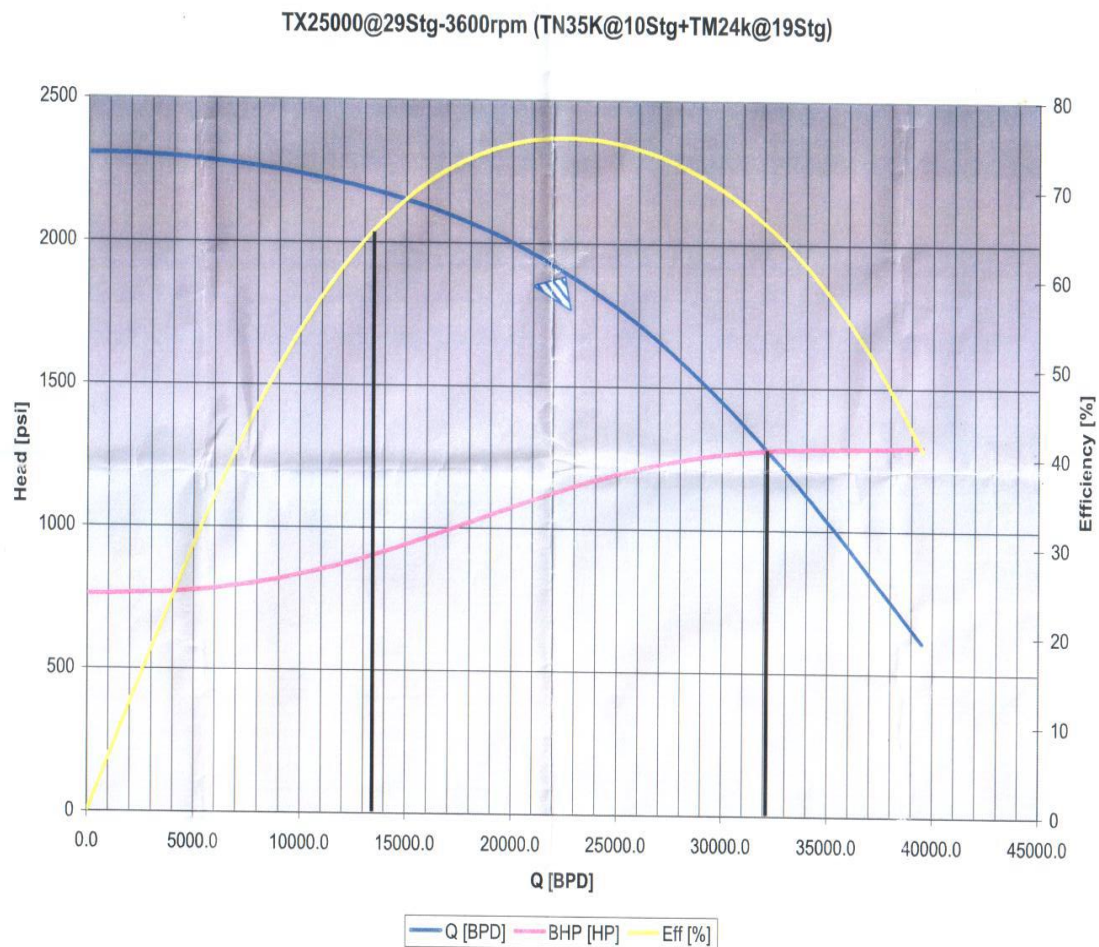


Figura 14. Curva de operación de las bombas booster.

### 3.1.3. Prueba funcional paso a paso

#### 3.1.3.1. Bombas Booster:

1. Se verifican los equipos, tubería, instrumentación, sistema de control y eléctrico asociados a las bombas Booster AP-72613A.
2. Debido a que la bomba AP72613B ya se encuentra en servicio, se tomará como correcta la revisión anterior descrita para ella.
3. El set point de la válvula FV-7219A ubicadas en el cabezal de 30" será de 50KBWPD para desviar el flujo requerido (50 KBWPD) a una presión de 15 psig. Este lazo de control será sintonizado hasta la estabilización del sistema.
4. Se abrirán válvulas de succión y descarga de la bomba AP72613A para iniciar el venteo.
5. Se abren venteos lentamente para eliminar el aire que puede tener el sistema, dentro de la apertura hay que tener cuidado con descompensar la bomba AP72613B, la bomba estaría lista para operar cuando sea requerida.

**Nota:** La segunda bomba Booster AP72613A solo entrará en operación cuando se incremente la demanda de flujo de las dos primeras bombas de inyección AP7601A,D, es decir que al inicio de la prueba las bombas de inyección operaran a mínima velocidad y mínima frecuencia (40Hz), el incremento de demanda de flujo se hará gradual y entrará en servicio la bomba AP72613A cuando las dos bombas de inyección AP7601A/D se encuentren a máxima velocidad y máxima frecuencia (60Hz); o en el otro caso que entraría en operación la segunda bomba Booster sería cuando se trabajen las tres bombas de inyección AP7601A, AP7601C y AP7601D a su máxima velocidad.

6. El set point del lazo de control PIC-72181 ubicadas en la recirculación de bombas BOOSTER será el definido por la presión de succión requerida en la succión de las bombas de inyección (45.6 psi mínimo). Este lazo de control será sintonizado hasta la estabilización del sistema.
7. El arrancador suave arranca la bomba Booster AP-72613A. Se recirculan 20.000 BWPD aproximadamente a una Presión de succión: 6 psig, y a una presión de descarga: 220 psig.
8. Se inicia la inyección de químicos. La cantidad y tiempo de inyección será calculado por el proveedor del equipo paquete, ellos manejarán todo el proceso y su inmersión dentro del desarrollo del proyecto no es descrito en este documento.



### 3.1.3.2. Bombas de inyección:

1. Se abren las válvulas de corte ubicadas en la succión y la descarga de las bombas de inyección AP-7601A, secuencialmente para su arranque remoto.
2. Se abren las válvulas de corte ubicadas en la succión y la descarga de las bombas de inyección AP-7601D, secuencialmente para su arranque remoto.
3. Se realiza el venteo de todos los puntos de succión y descarga de las bombas AP-7601A Y AP-7601D.
4. El VDF arranca la bomba de inyección AP-7601A a una frecuencia mínima de 40 Hz y una presión de descarga mínima de 1000 psig. Después de un tiempo de estabilización de aproximadamente 5 minutos se realizará el incremento gradual de la frecuencia del variador hasta llegar a su máximo valor de frecuencia (60Hz), para alcanzar una presión de operación de 1500-1700 psig.
5. El VDF arranca la bomba de inyección AP-7601D a una frecuencia mínima de 40 Hz y una Presión de descarga mínima de 1000 psig, después de un tiempo de estabilización de aproximadamente 5 minutos se realizará el incremento gradual de la frecuencia del variador hasta llegar a su máximo valor de frecuencia (60Hz), para alcanzar una presión de operación de 1500-1700 psig.

#### **Notas:**

- *La válvula PCV7602A es la responsable de controlar el flujo a la entrada del pozo, será operada de forma manual para encontrar el punto de trabajo real (%apertura y presión de trabajo para flujo requerido) después se realizará el afinamiento de respuesta y rangos operativos, es decir que la PCV7602A será el punto de control global de todo el sistema de inyección.*
  - *A su vez la válvula de recirculación PCV7602B se encontrará 100% cerrada para no afectar la calibración del punto de operación de la válvula PCV7602A, la recirculación se hará en caso que se necesite al inicio de forma manual, después de estabilizar el sistema se entregará al sistema remoto.*
6. El set point del lazo de control PIC-7602B ubicadas en la recirculación de bombas de inyección será de (1900psi). Este lazo de control será sintonizado hasta la estabilización del sistema.
  7. Se monitorean las condiciones del sistema y se inspecciona hasta que esté estable y en óptimas condiciones de operación. La presión de inyección en cabeza de pozo será de 1200-1500 psig.

8. Mediante inspección visual se verifica la hermeticidad del sistema relacionada en las etapas anteriores. Se evalúa si hay ruidos inusuales o vibraciones anormales y se verifica la presión en la instrumentación instalada.

**Nota:** Para el caso del arranque con las tres bombas AP7601A, AP7601C Y AP7601D se realizará después de tener el sistema sincronizado totalmente, ya que para este caso de operación solo habrá un punto de trabajo que serían todas las bombas a 60Hz, debido a que la bomba AP7601C se tendrá que arrancar de forma directa y por recomendación del vendor se realizará primero para disminuirle el par de arranque al máximo.

#### **3.1.4. Situaciones operacionales que se pueden presentar en el arranque**

- Si una bomba del sistema Booster o de inyección se apaga, se da alarma al operador. Se debe verificar la falla del sistema y volver a arrancarlo. En caso de ser una de las bombas Booster, esta situación repercutirá directamente con el sistema de inyección. Por falta de flujo, el variador de velocidad del sistema de inyección apagará las bombas que sean necesarias para estabilizar el sistema disminuyendo su velocidad progresivamente.
- Como protección de los motores y equipos, se da Shut Down del sistema en caso de presentarse problemas con la red de suministro eléctrico.
- El sistema de control cuenta con interlocks que no permiten que las bombas ni operen ni arranquen si el sistema no se encuentra en las condiciones de operación establecidas.

### **3.2. ARRANQUE, AJUSTES Y PRUEBAS**

Se desea realizar inyección a pozo Disposal de 60.000 BWPD. Para llevar a cabo este proceso, se construyó un cabezal de alimentación de Bombas Booster en la estación Castilla 2, área de Stap II y un sistema de inyección llamado Castilla Disposal ubicado a 5,7 kilómetros del casco urbano de Castilla la Nueva vía San Lorenzo. El cabezal cuenta con una alimentación de 12" que se deriva de las líneas de 30" que conducen el agua del sistema de filtración al foso de torres de enfriamiento, cuenta dos bombas Boster (AP-72613A/B) con su instrumentación asociada, dos válvulas FCV, una válvula de retorno PCV y un transmisor de flujo en la descarga del sistema.

Para iniciar se requiere tener disponibles las dos bombas Booster (AP-72613A/B) del cabezal y dos bombas de inyección (AP-7601A Y AP-7601D) ubicadas en el pozo Castilla Disposal; para esta actividad se requiere tener en cuenta el siguiente paso a paso que contempla la operación para Disposal en campo y en el Sistema Delta V siguiendo lo especificado en la Figura 15.

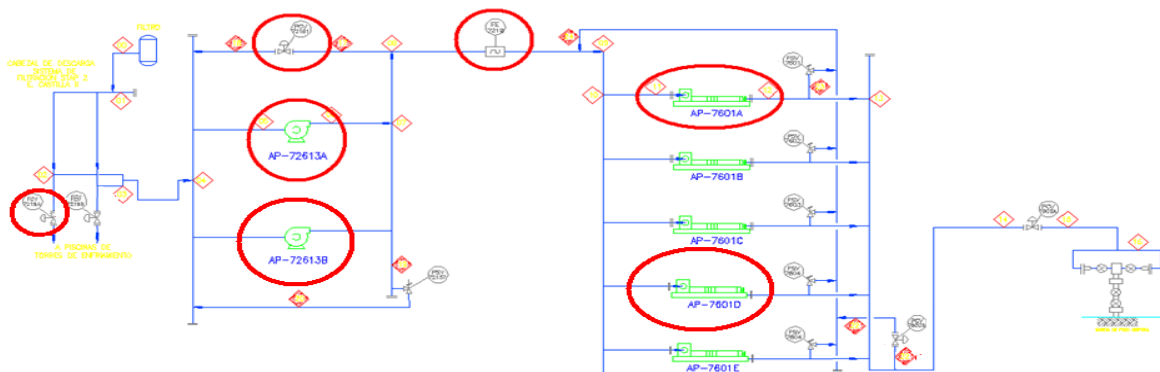


Figura 15. Diagrama Sistema Disposal.

### 3.2.1. Alimentación del cabezal del Sistema Disposal

**3.2.1.1.** El sistema de inyección de Disposal para entrar en funcionamiento, debe estar dentro de unos parámetros establecidos por la corporación autónoma regional Cormacarena equivalentes a SST  $\leq 3$  ppm y Grasa y Aceites  $\leq 3$  ppm. Por este motivo el agua para inyectar debe estar dentro de estas características y para tal efecto se toma del sistema de filtración activo del Stap II. Para garantizar esta condición se deben tener en operación los filtros AF-7240A/B/C/D/E para garantizar flujo y calidad de agua a una presión promedio de 15 PSI.

**3.2.1.2.** Existen dos líneas de 30" que reciben el agua del sistema de filtración. En este caso la salida de los filtros está direccionada hacia la línea A mediante la apertura de la válvula A, esta línea es de color azul y dentro de su trayecto al frente del cabezal de Disposal tiene instalada una facilidad de 12" que actualmente está alineada mediante la apertura de la válvula A para alimentar el cabezal,

posteriormente, una válvula Neumática (FCV-7219A) para restringir el flujo y presurizar dicho sistema Disposal.



*Figura 16. Línea descarga filtros EC2*



*Figura 17. Línea succión bombas BOOSTER*

### **3.2.2. Alineación de Bombas Booster AP-72613A y B.**

**3.2.2.1.** Verificar el estado de apertura de la válvula de control neumática (FCV-7219A/B), esta válvula restringe el paso de agua hacia el foso de torres y al mismo tiempo presuriza el cabezal de bombas Boster mediante una conexión de 12" como se observa en la Figura 18, su rango de apertura varía desde 8% al 20%. Esta válvula opera en modo automático y actúa de acuerdo a la señal de presión

de succión de bombas Booster que recibe del instrumento de presión PIT, la cual debe ser seleccionada desde el sistema Delta V).



Figura 18. FCV-7219A

**3.2.2.2.** El control de las válvulas FCV-7219A/B puede estar dado por presión o por flujo. Para este caso el control está dado por presión, para lo cual se utiliza el PIT-72301 de la Figura 19 el cual controla la succión en el cabezal de las bombas, garantiza la presión de succión para el arranque, esta condición está dada por una presión de 15 PSI fijada en un set point de las válvulas FCV.



Figura 19. PIT-72301

**3.2.2.3.** Para el control de flujo se utiliza el FIT-7219 de la Figura 17 ubicado en la línea de 12" de descarga de las bombas; el lazo se encarga de controlar el flujo proveniente de filtración de la FCV-7219A dando ingreso al fluido requerido a la

salida de Bombas Booster; el conjunto de envío de agua hacia el Disposal 1 depende del flujo que se desee enviar hacia inyección, para este caso particular se enviarán 60.000 BWPD. Para que el sistema opere correctamente es necesario que estén operativos los filtros AF-7240A/B/C/D/E para garantizar flujo y calidad de agua a una presión promedio de 15 PSI, de lo contrario el sistema no funciona correctamente y la bomba Booster se apagará por baja succión. Para evitarlo el sistema se controla mediante el lazo de presión de descarga por el PIC-72301. Este controlador define la actuación de la válvula de recirculación PCV-72181 la cual se encuentra en un set point de 200 PSI, si la presión excede esta condición, la PCV abrirá y aliviara la presión de descarga.



Figura 20. FIT-7219 a Disposal.

3.2.2.4. Después de haber realizado las acciones anteriores se puede operar la bomba Booster AP-72613<sup>a</sup>. Ésta debe estar en modo automático (posición 2 del selector) para que el arranque y el control se ejecute desde el sistema Delta V. Antes del arranque de la bomba Booster se deben tener en cuenta los Interlocks (Condiciones de proceso que generan alarmas y cortes) de la Tabla 8.

### 3.2.3. Arranque de las Bombas Booster AP-72613A y B.

Una vez aseguradas las condiciones de la bomba Booster podrá arrancar en el siguiente orden:



1. Encender bomba Booster AP-72613A,
2. Verificar el estatus de encendido de la bomba AP-72613A en el Delta V,
3. Verificar flujo en el FIT-7219 ubicado en cabezal de descarga de las bombas Booster.
4. Encender la bomba Booster AP-72613B.
5. Verificar el estatus de encendido de la bomba AP-72613B en el Delta V.
6. Verificar flujo en el FIT-7219 ubicado en cabezal de descarga de bombas booster.

Todo esto se puede observar en el Delta V como se indica en la Figura 21.

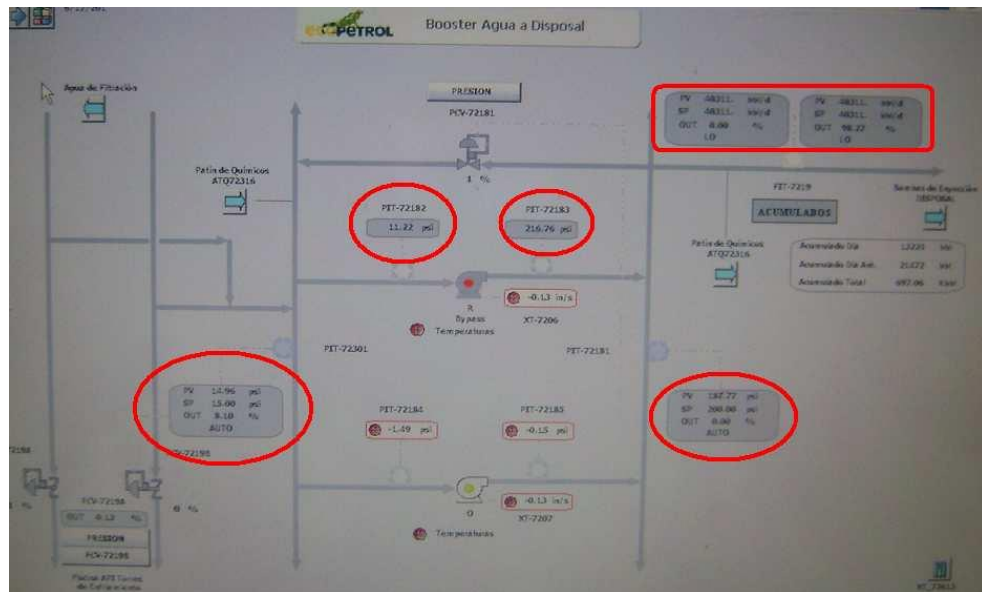


Figura 21. Condiciones en Delta V.

### 3.2.4. Alineación de las Bombas de Inyección AP-7601A y D.

Se debe garantizar que las válvulas que se observan en la Figura 22, de cada una de las bombas de inyección AP-7601A y D tanto de succión como de descarga se encuentren abiertas.



Figura 22. Válvulas de succión y descarga bombas de inyección.

Las válvulas A-B-C ubicadas en el cuadro de recirculación de la línea de descarga hacia el pozo Disposal deben encontrarse cerradas, como se observa en la Figura 23.

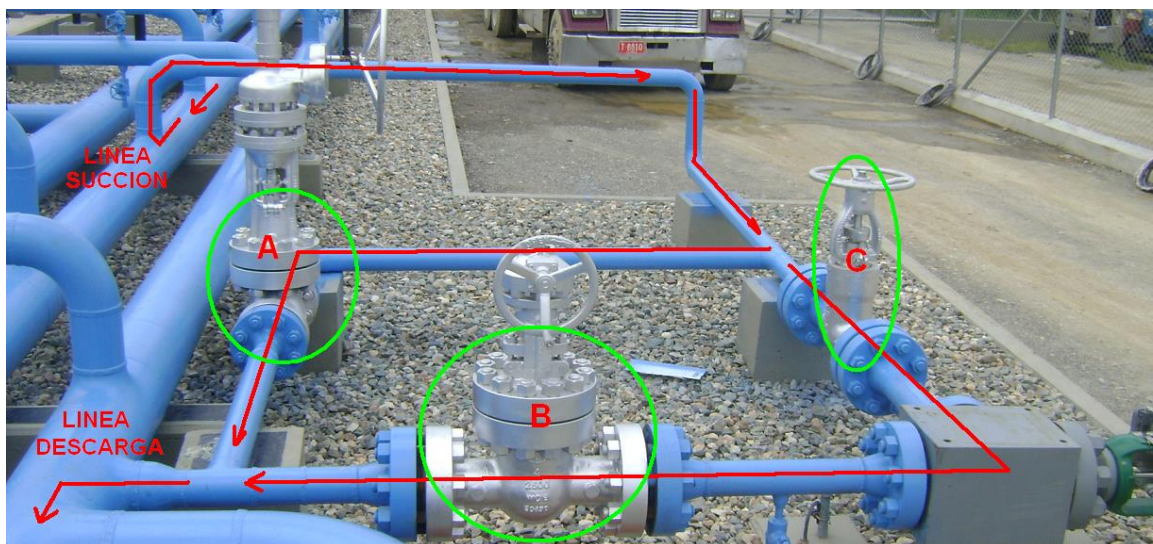


Figura 23. Válvulas del cuadro de control recirculación bombas de inyección.

Las válvulas A-B ubicadas en la línea de la válvula de control de inyección de descarga hacia el pozo Disposal deben encontrarse abiertas y la PCV-7602A debe estar cerrada en modo de control manual como se observa en la Figura 24.



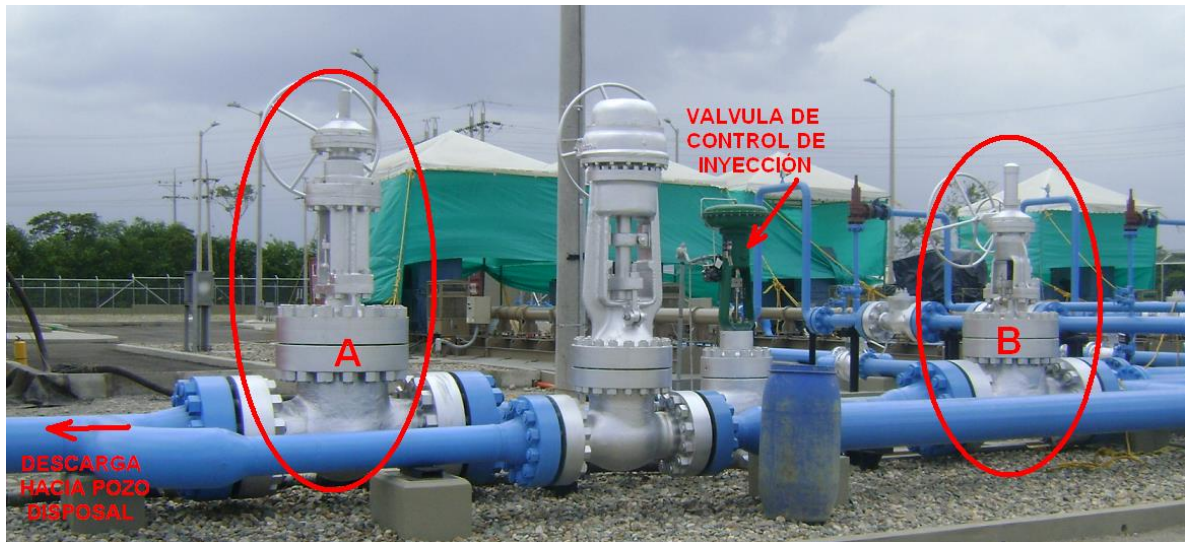


Figura 24. Válvulas del cuadro de control llegada pozo

Finalmente se debe coordinar con el Recorredor de pozos la apertura de las válvulas de choque, las cuales deben estar al 55% de apertura.

Antes del arranque de las bombas de inyección se deben tener en cuenta los Interlocks de la Tabla 9.

### 3.2.5. Arranque de las Bombas de Inyección AP-7601A y D.

Una vez aseguradas estas condiciones de las bombas de inyección AP-7601A y D podrá arrancar en el siguiente orden:

1. Encender la bomba inyección AP-7601A.
2. Verificar el estatus de encendido de la bomba AP-7601A.
3. Verificar el flujo en el FIT-7219 ubicado en cabezal de descarga de bombas booster.
4. Encender la bomba de inyección AP-7601D.
5. Verificar el estatus de encendido bomba AP-7601D.
6. Verificar el flujo en el FIT-7219 ubicado en cabezal de descarga de las bombas booster.

Si estos Interlocks se cumplen sin problema las bombas AP-7601A y AP-7601D arrancan. Se recomienda esperar un tiempo de 1 minuto entre arranque de bombas.

Todo esto se puede observar en el Delta V como se indica en la Figura 25.



Figura 25. Arranque de bombas de Inyección.

**Nota:** Las bombas de inyección no cuentan con selector de estado de arranque (Local-Remoto) debido a que el sistema de arranque se realiza siempre desde el sistema Delta-V. La condición del selector del variador deberá siempre estar en posición Remoto para ejecutar el arranque.

Para dar arranque a las bombas de inyección se requiere ejecutar el siguiente paso a paso:

1. Se selecciona sobre el recuadro que se muestra en pantalla la bomba que se desea arrancar (Figura 26).

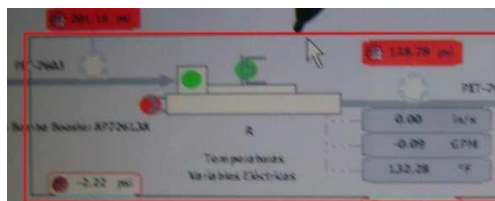


Figura 26. Selección de bomba.

2. En aquel momento se abre el faceplate y se selecciona la opción “Arranque” (Figura 27).

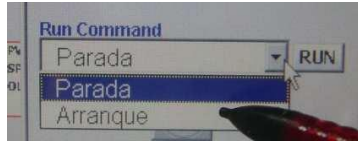


Figura 27. Selección de opción deseada.

3. Se oprime la opción “RUN” para dar acción de arranque.

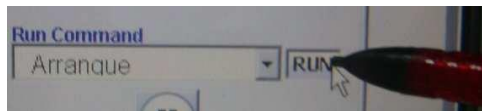


Figura 28. Opción RUN.

Una vez realizada esta operación el sistema comienza la secuencia dada a continuación:

1. Disponibilidad de la bomba de inyección para dar comando de arranque (Modo cascada).
2. Disponibilidad de la bomba del cooler para dar comando de arranque (Modo cascada).
3. Disponibilidad del heater para dar comando de arranque (Modo cascada)
4. Revisión del permiso eléctrico enviado por la celda donde se encuentra el interruptor que energiza el motor.
5. Revisión del permiso eléctrico enviado por el SAS donde se verifica el estado de celdas y el estado del variador.
6. Se esperan 60 segundos y pasado este tiempo es revisada la presión de succión buscando que se mantenga estable al set point dado, lo cual es permiso para continuar con la secuencia.
7. Arranca el cooler y se espera 30 segundos a que el flujo de recirculación de la cámara se normalice.

**Nota:** En el caso que se desee pausar la secuencia de arranque se diseñó un botón en el faceplate de arranque que se encarga de realizar esta labor y de reiniciarla cuando se revisen las condiciones para continuar, este se observa en la Figura 29.



Figura 29. Botón de arranque para reinicio de secuencia.

### Observaciones:

Antes de operar el sistema se debe verificar:

1. Revisar que ningún Interlock se encuentre presente, de lo contrario se deberá reconocer y resetear como se observa en la Figura 30.



Figura 30. Reset del sistema.

2. Revisar que el permiso eléctrico y el permiso del SAS se encuentren habilitados, como se observa en la Figura 31.

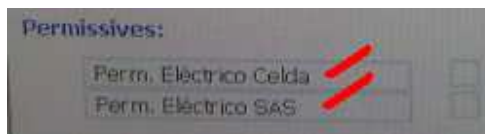


Figura 31. Verificación de permisos eléctricos.

### **Pasos para parada de bombas de inyección:**

Los pasos a seguir para realizar una parada controlada de cualquiera de las bombas de inyección es la siguiente:

1. Se selecciona sobre el recuadro que se muestra en pantalla (Figura 32) la bomba que se desea detener.

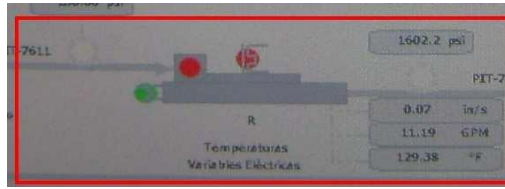


Figura 32. Selección de bomba de inyección para parada.

2. En pantalla se visualiza el faceplate y se selecciona la opción “Parada” (Figura 33).



Figura 33. Parada bomba de inyección.

3. Se oprime la opción “RUN” para dar acción a la parada (Figura 34).

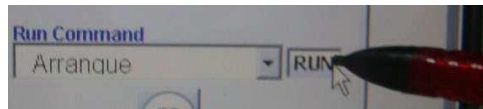


Figura 34. Arranque bomba de inyección.

En el momento de realizar dicha acción, el programa internamente dentro de su lógica presenta la siguiente condición:

1. Inicia el sistema de desaceleración del variador.
2. Encendido del heater.
3. Apagado del cooler.
4. Confirmación de apagado de la bomba.

En caso de detenerse las bombas de inyección, sea por parada controlada o por situación de proceso, la Bomba Booster esperará el término de 2 horas para apagarse.

Si se desea apagar la bomba Booster controladamente basta con abrir el faceplate de la bomba y oprimir la opción de STOP.

En cualquiera de los casos al apagar la bomba Booster o la bomba de inyección se visualizará en pantalla las diferentes alarmas vinculadas al proceso, las cuales deberán ser reconocidas para su próximo arranque, de lo contrario el sistema difícilmente se podrá arrancar nuevamente.

### 3.2.6. Acción de nuevo arranque

Esto es realizado en caso de parada por proceso de las bombas de inyección. Cuando estas son apagadas el círculo rojo que indica que la bomba está en operación cambia a color amarillo tal como se muestra en la Figura 35.

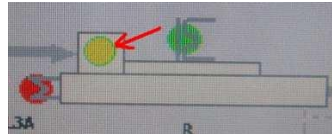


Figura 35. Indicación estado bombas.

En aquel momento se debe verificar el estado de la bomba Booster, en caso que esta se encuentre apagada se revisará el proceso para evaluar su condición antes de ponerla nuevamente en servicio. Después de ello en la pantalla de bombas de inyección se procederá a reconocer y resetear alarmas tal como se muestra a continuación:

- Se da click sobre el recuadro de la bomba en la pantalla Delta-V como se observa en la Figura 36.

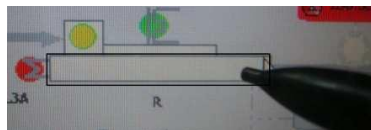


Figura 36. Selección de bomba para resetear alarmas.

- Se abre el faceplate y se oprime la opción “Reset” de la Figura 37 y luego de ello se da click en la confirmación ubicada en la esquina inferior derecha tal como se muestra en la Figura 35 para reconocer la alarma.



Figura 37. Botón de reset.

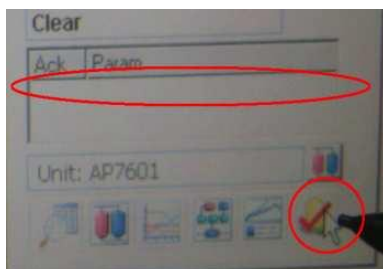


Figura 38. Confirmación de reset.

- Una vez se realiza esta acción la bomba de inyección estaría en condiciones de operación desde que Booster esté trabajando como se observa en la Figura 39.

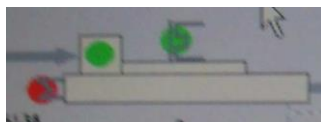


Figura 39. Bombas de inyección en condición de operación.

### 3.2.7. Consideraciones importantes

1. La válvula de aguja del manómetro de cabeza de pozo debe mantener cerrada; esta se abre solo en condición de visualización del operador en sitio.
2. Si ocurre una falla general en las bombas AP-7601A/D la cual no permite su arranque y si la operación define trabajar con solo una bomba Booster se debe realizar la siguiente alineación en dispoal:
  - En el árbol de cabeza de pozo se abrirá a full open la válvula que no cuenta con choque.
  - Abrir a full open las válvulas manuales del cuadro de control PCV-7602B y abrir en modo de control manual la PCV-7602B.
  - Verificar que el sistema de aire de instrumentos este operativo.

Los motores de inyección y booster permiten solo cuatro arranques en el lapso de una hora [10].



### 3.3. RESULTADO DE PRUEBAS

En la Tabla 10 se observan datos obtenidos en pruebas de arranque del sistema del 05 de Enero de 2012. Se toman lo valores más relevantes para verificación de las condiciones especificadas anteriormente, permitiendo asegurar condiciones de operación seguras.

BOMBA BOOSTER AP-72613A/B - BOMBA DE INYECCION AP-7601A/D							
TAG	DESCRIPCIÓN	UNID	RANGO	HORA			INTERLOCK
				10:09 A.M	2:20 P.M	4:15 P.M	
<b>DATOS EN BOMBAS BOOSTER</b>							
<b>AP-72613A/B</b>							
FIT-7219	TRASMISOR DE FLUJO BOOSTER	BWPD	0-100000	62.162	62.130	62.168	H:85000 - L:15000
<b>DATOS EN BOMBAS DE INYECCIÓN</b>							
<b>AP-7601A</b>							
XXX	FRECUENCIA	hz	0-60	60	60	60	HH:3110 H: 3080 L:3025 LL:3000
PIT-7602	PRESION CABEZAL DESCARGA BOMBAS DE INYECCION	PSIG	0-5000	1406	1405	1410	HH:3110 H: 3080 L:3025 LL:3000
PIT-7604	PRESION DE DESCARGA BOMBAS DE INYECCIÓN AP-7601A	PSIG	0-5000	1443	1446	1450	HH: 2000 L: 1000 LL:550
XXX	CORRIENTE PROMEDIO AP-7601A	A	XX	104,5	104	104	X RELLEE
XXX	TENSION PROMEDIO AP-7601A	kV	XX	6,35	6,35	6,35	X RELLEE
XXX	TEMPERATURA PROMEDIO FASES	°F	63-337	90	147	147	HH:320 - H:248
XXX	TEMPERATURA PROMEDIO COJINETES	°F	63-337	118	163	160	HH:194 - H:185
XIT-7601	VIBRACIÓN	(in/seg)	0-0.98	0,11	0,12	0,12	HH:0,2 H: 0.16
FT-7601	FLUJO COOLER - GPM	GPM	0-30	9,85	11,36	11,38	HH: 16 H: 12 LL:5
TT-7601	TEMPERATURA CAMARA (°F)	°F	0-250	108,3	137	137,66	HH:167 H: 159



AP-7601D							
PIT-7610	PRESION DE DESCARGA BOMBAS DE INYECCIÓN AP-7601D	PSIG	0-5000	1450	1442	1450,3	HH: 2000 L: 1000 LL:550
XXX	CORRIENTE PROMEDIO	A	XX	105,4	104,6	105,2	X RELLEE
XXX	TENSION PROMEDIO	kV	XX	6,32	6,3	6,29	X RELLEE
XXX	TEMPERATURA PROMEDIO FASES	°F	63-337	94	144,8	141	HH:320 - H:248
XXX	TEMPERATURA PROMEDIO COJINETES	°F	63-337	121	160	159	HH:194 - H:185
XIT-7604	VIBRACIÓN	(in/seg)	0-0.98	0,17	0,17	0,16	HH:0,2 H: 0.16
FT-7604	FLUJO COOLER - GPM	GPM	0-30	10,78	11,14	11,13	HH: 16 H: 12 LL:5
TT-7604	TEMPERATURA CAMARA (°F)	°F	0-250	94,87	135	135	HH:167 H: 159

Tabla 10. Resultados prueba 05 de Enero de 2012.

## CONCLUSIONES

- La descripción del proceso permitió definir las condiciones de operación y variables de presión y flujo requeridas para que tanto el sistema booster como el de inyección de agua permitieran el envío del agua extraída del crudo al pozo disposal en condiciones seguras y eficientes.
- La solución técnica en automatización propuesta permitió abarcar temas como la descripción de hardware especificado como DCS y tarjetas de interface soportadas en protocolo Foundation Fieldbus. y software con reporte de alarmas y acciones de seguridad, transmisión de señales, arquitectura de control, alimentación eléctrica y especificación de la instrumentación, filosofía de control con rutinas operacionales específicas y diagramas de bloques, cumpliendo con normativas y soportando el desarrollo de la construcción y puesta en marcha del proyecto. Permitiendo el registro de las diferentes variables de operación y monitoreo de eventos, alarmas, protecciones, tendencias, diagnóstico y el envío de información de las operaciones en tiempo real en las dos locaciones donde se desarrolló.
- En el arranque del sistema piloto de reinyección de agua de producción desde una estación de bombeo de crudo a un pozo disposal se obtuvieron resultados de presiones, flujos, temperaturas y vibraciones acorde a los límites definidos para la operación segura, brindando la posibilidad de aumentar su capacidad de rendimiento en la medida que las condiciones de la estación de bombeo de crudo lo requiera.
- Se realizó el proyecto haciendo uso de un presupuesto de COP\$29.161.486.741, el cual se distribuyó a lo largo del tiempo de ejecución y puesta en marcha con un valor presente neto de la inversión de COP\$24'756.139.022, beneficios por el orden de los COP10'000.000.000 los dos primeros años siguientes a la puesta en marcha y de

COP6'000.000.000 los años restantes; lo cual nos indica que en aproximadamente 3 años se recuperará la inversión, obteniendo una relación beneficio/costo de 1.32, o sea que por cada peso invertido se van a reducir costos operacionales de aproximadamente 32 centavos de pesos, convirtiéndolo en un proyecto rentable.

- Con el proyecto se obtienen beneficios ambientales debido a la disminución de concentración de contaminantes por vertimiento de agua de producción en el río Orotoy e inundaciones en las poblaciones riverseñas en época de invierno, daños a la imagen empresarial y a personas aledañas, debido a que se logró una reducción de aproximadamente el 30% de agua de producción llevada a estos medios para su disposición. Además de beneficios económicos, disminuyendo las multas en un 50% los dos años siguientes de la puesta en marcha del proyecto y de un 25% los años restantes, también se redujo los costos del contrato de carrotanques para transporte del agua de producción, multas por inundaciones en pueblos riverseños y multas de reparación de salud a víctimas por contaminación en un 30%.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] El tiempo. Los pozos Rubiales y Castilla La Nueva aumentan la producción de petróleo del Meta. En: El tiempo [en línea]. Disponible en: <[www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3278926](http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3278926)>. [Citado en 09 de Octubre de 2006].
- [2] Ingeniería de detalle Consorcio AB de reinyección de agua desde estación Castilla II de la SOC de ECOPETROL S.A. a un pozo disposal. Bases y criterios de diseño, DOC. SOA-ON-0807-02-CG-PR-0001-R0.
- [3] Ingeniería de detalle Consorcio AB de reinyección de agua desde estación Castilla II de la SOC de ECOPETROL S.A. a un pozo disposal. PFD Disposal – Bombas inyección, PL. SOA-ON-0807-02-BD-PR-0003-R0.
- [4] Ingeniería de detalle Consorcio AB de reinyección de agua desde estación Castilla II de la SOC de ECOPETROL S.A. a un pozo disposal. P&ID Bombas - Booster, PL. SOA-ON-0807-02-BD-PR-0002-R0 1/2. P&ID Disposal - Bombas Inyección, PL. SOA-ON-0807-02-BD-PR-0002-R0 2/2.
- [5] Ingeniería de detalle Consorcio AB de reinyección de agua desde estación Castilla II de la SOC de ECOPETROL S.A. a un pozo disposal. Filosofía de operación, DOC. SOA-ON-0807-02-CG-PR-0002-R0.
- [6] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Dirección de Agua Potable, Saneamiento Básico y Ambiental República de Colombia. Componente ambiental para los sistemas de acueducto, alcantarillado y aseo [en línea]. <<http://www.aaa.com.co/aaa/docs/gp-RAS-2000.pdf>> [Citado en mayo de 2005].
- [7] Ingeniería de detalle Consorcio AB de reinyección de agua desde estación Castilla II de la SOC de ECOPETROL S.A. a un pozo disposal. Bases del diseño, DOC. SOA-ON-0807-02-CG-IT-0001-R0.

- [8] Ingeniería de detalle Consorcio AB de reinyección de agua desde estación Castilla II de la SOC de ECOPEPETROL S.A. a un pozo disposal. Filosofía de control, DOC. SOA-ON-0807-02-CG-IT-0002 R0.
- [9] Ingeniería de detalle Consorcio AB de reinyección de agua desde estación Castilla II de la SOC de ECOPEPETROL S.A. a un pozo disposal. Diagrama de bloques, DOC. SOA-ON-0807-02-CG-IT-0003-R0.
- [10] Operación y entrega de hidrocarburos –Recolección. Departamento producción Castilla-Chichimene procedimiento para puesta en operación Disposal 60K, DOC. SCC-PPC-POZ-I-001. ECOPEPETROL S.A. v.1. 2011.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1: P&ID SISTEMAS

## ANEXO 2: LISTADO DE INSTRUMENTOS Y MATERIALES

No. DOCUMENTO	REV.	DOCUMENTO
SOA-ON-0807-02-LI-IT-0001	0	LISTA DE INSTRUMENTOS
SOA-ON-0807-02-LI-IT-0002	0	LISTA DE SEÑALES
SOA-ON-0807-02-LI-IT-0003	0	LISTA DE MATERIALES
SOA-ON-0807-02-LI-IT-0004	0	LISTA DE CABLES Y CONDUITS

## ANEXO 3: MEMORIAS DE CÁLCULO VÁLVULAS DE CONTROL

No. DOCUMENTO	REV.	DOCUMENTO
SOA-ON-0807-02-MC-IT-0001	0	MEMORIAS DE CALCULO VÁLVULAS DE CONTROL

## ANEXO 4: HOJAS DE DATOS

No. DOCUMENTO	REV.	DOCUMENTO
SOA-ON-0807-02-HD-IT-0001	0	HOJA DE DATOS MEDIDOR DE FLUJO TIPO ULTRASONICO
SOA-ON-0807-02-HD-IT-0002	0	HOJA DE DATOS VALVULAS DE CONTROL
SOA-ON-0807-02-HD-IT-0003	0	HOJA DE DATOS TRANSMISORES DE PRESION
SOA-ON-0807-02-HD-IT-0004	0	HOJA DE DATOS VALVULAS DE SEGURIDAD
SOA-ON-0807-02-HD-IT-0005	0	HOJA DE DATOS CABLES

## ANEXO 5: DETALLES DE INSTALACIÓN

No. DOCUMENTO	REV.	DOCUMENTO
SOA-ON-0807-02-AD-IT-0003	0	DETALLE DE INSTALACION A PROCESO
SOA-ON-0807-02-AD-IT-0004	0	DETALLE DE INSTALACION DE SOPORTE
SOA-ON-0807-02-AD-IT-0005	0	DETALLE DE INSTALACION NEUMATICO
SOA-ON-0807-02-AD-IT-0006	0	DETALLE DE INSTALACION ELECTRICO
SOA-ON-0807-02-AD-IT-0007	0	DETALLE DE MONTAJE PORTADA

## ANEXO 6: DIAGRAMAS DE CONEXIONADO Y JUNCTION BOXES

No. DOCUMENTO	REV.	DOCUMENTO
SOA-ON-0807-02-BD-IT-0002	0	DIAGRAMA DE JUNCTION BOX Y GABINETES HOJA 1 DE 3
SOA-ON-0807-02-BD-IT-0002	0	DIAGRAMA DE JUNCTION BOX Y GABINETES HOJA 2 DE 3
SOA-ON-0807-02-BD-IT-0002	0	DIAGRAMA DE JUNCTION BOX Y GABINETES HOJA 3 DE 3

SOA-ON-0807-02-BD-IT-0003	0	DIAGRAMA DE CONEXIONADO HOJA 1 DE 4
SOA-ON-0807-02-BD-IT-0003	0	DIAGRAMA DE CONEXIONADO HOJA 2 DE 4
SOA-ON-0807-02-BD-IT-0003	0	DIAGRAMA DE CONEXIONADO HOJA 3 DE 4
SOA-ON-0807-02-BD-IT-0003	0	DIAGRAMA DE CONEXIONADO HOJA 4 DE 4

## **ANEXO 7: REGISTRO DE DATOS EN PRUEBAS DE ARRANQUE**