

**CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA ESCALADO PARA SIMULAR
LAS CONDICIONES EN LA CARA DE LA FORMACIÓN DE POZO, DEL
CAMPO ESCUELA COLORADO**

**ANDRÉS FELIPE HERNÁNDEZ
JOSÉ IGNACIO SUÁREZ ABREO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

**CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA ESCALADO PARA SIMULAR
LAS CONDICIONES EN LA CARA DE LA FORMACIÓN DE POZO, DEL
CAMPO ESCUELA COLORADO**

**ANDRÉS FELIPE HERNÁNDEZ
JOSÉ IGNACIO SUÁREZ ABREO**

**Trabajo de grado para optar a los títulos de Ingeniero electrónico e Ingeniero
mecánico**

Directores

JORGE ENRIQUE MENESES FLOREZ

Ingeniero Mecánico

ALFREDO RAFAEL ACEVEDO

Ingeniero Electrónico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

“A los directores y co-directores que aportaron a la finalización de este proyecto de grado, con sus conocimiento y experiencia favorecieron para mi desarrollo profesional”

“A William Vera que nos enfocó y aterrizo”

“A el ingeniero Sebastián que nos aportó al diseño del banco”

“A nuestras familias por estar siempre con nosotros”

“A nuestros compañeros de investigación”

José Ignacio Suárez Abreo.

DEDICATORIA

“A Dios por todas sus bondades y por el privilegio de otorgarme la vida para
afrontar cada reto y la fuerza para llegar a la meta.”

“A toda mi familia por su apoyo incondicional y por estar en cada momento
motivarme en esta trayectoria”

“A mis amigos y compañeros que de alguna manera aportaron con sus buenos
consejos en los momentos que más los necesitaba”

“A mis Padres espirituales que aportaron con cada oración el respaldo divino en
las circunstancias que pretendía desfallecer”

José Ignacio Suárez Abreo.

DEDICATORIA

“A la vida, porque tengo la oportunidad de desarrollarme y retribuir la gran oportunidad de generar y compartir experiencias, tiempo e ideas”

“A mi madre Marcela Cecilia Hernández que formo en mí el carácter y los principios, que estuvieron presentes en mi formación como profesional y en el desarrollo de este proyecto”

“A mis familiares que me aportaron y me brindaron fuerza para afrontar este reto”

“A mis amigos que me retaron para obtener lo mejor de mí mismo”

“A mis compañeros de estudio que me apoyaron para forjar conocimiento”

“A mi novia Alina Mendoza, por ser la persona que me levanto cuando me di por vencido”

Andrés Felipe Hernández Cuello.

*“La posibilidad de realizar un sueño es lo que hace que la vida sea interesante –
Paulo Coelho”*

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	24
1.3. OBJETIVOS.....	25
1.3.1. Objetivos Generales	25
1.3.2. Objetivos Específicos.....	25
1.4. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	26
2. SÍNTESIS DEL BANCO DE PRUEBAS DISEÑADO.	28
2.1.NECESIDADES Y VARIABLES DE SIMULACIÓN.....	28
2.2. METODOLOGÍA DE OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	29
2.3. ESTRUCTURA DEL BANCO DE PRUEBAS COMO SISTEMA AUTOMATIZADO	31
2.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	36
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	38
3.1. MAQUINARIA	38
3.1.1. Soporte metálico.	38
3.1.2. Circuito de tuberías.	45
3.1.3. Tanques de almacenamiento.....	50
3.2. SENSORES Y TRANSMISORES	53
3.2.1. Sensores transmisores de temperatura.	53
3.2.2. Sensor transmisor de presión.	57
3.2.3. Presostato.....	59

3.2.4. Sensor de flujo.....	60
3.3. ACTUADORES.....	62
3.3.1. Motobomba.....	62
3.3.2. Resistencia de calentamiento.....	75
3.3.3. Válvula de globo.....	77
3.4. PRE-ACTUADORES.....	80
3.4.1. Variador de velocidad.....	80
3.4.2. Relevador de estado sólido.....	81
3.5. CONTROLADOR.....	82
3.5.1. PLC.....	83
3.6. INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (HMI).....	87
3.6.1. Panel de visualización.....	87
3.7. COMUNICACIÓN.....	88
3.7.1. ADAM-4520 conversor RS232-485.....	88
3.7.2. Switc Ethernet.....	89
4. LÓGICA DE CONTROL Y SHUTDOWN.....	90
4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL.....	90
4.2. DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN.....	91
4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS LAZOS.....	93
4.3.1. Lazos de temperatura.....	93
4.3.2. Control y shutdown de temperatura.....	94
4.3.3. Lazos de caudal.....	95
4.3.4. Control y shutdown de caudal.....	96
4.3.5. Lazos de presión.....	97
4.3.6. Control y shutdown de presión.....	98
5. SOFTWARE Y PROGRAMACIÓN.....	99
5.1. RSLOGIX5000.....	100

6. CONCLUSIONES	104
7. RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFIA.....	111
ANEXOS.....	115

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Etapas para el desarrollo del proyecto.....	27
Figura 2: Esquema del Banco de pruebas.....	29
Figura 3. Estructura de un sistema automático.....	32
Figura 4. Módulos del banco de pruebas.....	35
Figura 5. Diagrama de bloques del Banco de Pruebas.....	36
Figura 6. P&ID	37
Figura 7: soporte metálico del Banco de Pruebas	39
Figura 8: Acople del soporte metálico.....	44
Figura 9: Rueda para desplazamiento del marco metálico	44
Figura 10. Plano de Disposición de las tuberías del Banco de Pruebas.....	50
Figura 11: Tanque de almacenamiento TK1	51
Figura 12: Tanque de Resultados TK2	52
Figura 13: curva característica PT100 y PT100	55
Figura 14. Tipos medición de presión	57
Figura 15. Presostato.....	60
Figura 16: sensor de flujo paleta rotativa principio de funcionamiento.....	62
Figura 17. Curva del factor de fricción vs número de Reynolds y $\epsilon_{relativa}$	67
Figura 18. Coeficiente de pérdidas para codos.....	68
Figura 19. Coeficiente de pérdida para Tees	69
Figura 20. Válvula de globo con y sin reducción de diámetro respecto de la entrada. Coeficiente de pérdidas de carga en función del ángulo de apertura. 90° =abierta	70
Figura 21. Modelo AE 1.5 20-3	72
Figura 22. Modelo 40A-5.0MW-CIT44NS	73
Figura 23 Motobomba Pedrollo CPm 620	74
Figura 24: Resistencia Eléctrica de Calentamiento.....	76
Figura 25: comportamiento del Incoloy	76
Figura 26. Comportamiento de un motor según su par y su eficiencia	78

Figura 27. Cuerpo válvula de globo	79
Figura 28. Esquema de bloques de un variador de velocidad	80
Figura 29: P&ID	91
Figura 30: Lazos de temperatura	93
Figura 31: lazos de caudal	95
Figura 32: Lazos de presión	98
Figura 33. Arquitectura de la red Ethernet	99
Figura 34. Ciclos posibles para la ejecución de una rutina	100
Figura 35. Tags del sistema	101
Figura 36. Estructura para los tipos de datos	102
Figura 37. Configuración del tipo de controlador	102
Figura 38. Módulos de entradas y salidas del controlador 1769-L23E-QBFC1 ...	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del Material del soporte.....	40
Tabla 2. Análisis de Carga del soporte metálico.....	42
Tabla 3. Tensión de Von Mises en el soporte del Banco.....	43
Tabla 4. Segmentos modulares del soporte del banco.....	45
Tabla 5. Intervalo recomendado de velocidad media del fluido.....	47
Tabla 6. Clases establecidas para sensores RDT.....	54
Tabla 7. Clases establecidas para sensores RDT.....	54
Tabla 8. Especificaciones del sensor de temperatura MBT 3560 Danfoss.....	56
Tabla 9. Especificaciones del sensor PT 100.....	56
Tabla 10. Especificaciones del sensor de temperatura MBT 3560 DANFOSS.....	57
Tabla 11. Especificaciones del sensor de temperatura MBT 3560.....	58
Tabla 12. Tipos sensores de flujo.....	60
Tabla 13. Especificaciones del sensor de flujo GF Signet 2536.....	61
Tabla 14. Rugosidad de tubos comerciales.....	65
Tabla 15. Viscosidad dinámica y cinemática en unidades SI.....	66
Tabla 16. Características Principales de la Motobomba AE 1.5 20-3.....	72
Tabla 17 Características Principales Motobomba IHM.....	73
Tabla 18: Características Principales Motobomba Pedrollo CPM 620.....	74
Tabla 19. Propiedades del material Incoloy.....	77
Tabla 20. Especificaciones de la válvula de globo con servo acción EV260B.....	79
Tabla 21. Especificaciones VLT FC 51.....	81
Tabla 22. Especificaciones técnicas DIN-A-MITE B DB10-24C0-0200.....	82
Tabla 23. Especificaciones técnicas S7 1211 C.....	84
Tabla 24. Especificaciones técnicas compactlogix 1769.....	85

Tabla 25. Especificaciones panel C60087
Tabla 26. Especificaciones ADAM-4520/452288
Tabla 27. Especificaciones ADAM-4520/452289

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: MANUAL DE OPERACIONES.....	115
ANEXO B: PLANOS BANCO DE PRUEBAS.....	130
ANEXO C: PLANOS ELECTRICOS DEL TABLERO ELECTRICO	131
ANEXO E: PLANOS TUBERIAS.....	138
ANEXO D: PLANOS TANQUES	139
ANEXO F: PLANOS ESTRUCTURA	141
ANEXO E: PLANOS ACOPLES.....	142

RESUMEN

TITULO: CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBA ESCALADO PARA SIMULAR LAS CONDICIONES EN LA CARA DE LA FORMACIÓN DE POZO, DEL CAMPO ESCUELA COLORADO

AUTORES: ANDRES FELIPE HERNANDEZ
JOSE IGNACIO SUAREZ**

PALABRAS CLAVES: condiciones ambientales, número de Reynolds, pérdidas de carga y automatización.

DESCRIPCION: En el presente trabajo se diseñó y construyó un banco de pruebas con la capacidad de simular las condiciones ambientales en el fondo de pozo tales como temperatura, presión y caudal, se fundamentó con los criterios de x-bilidad y se estructuro con base a la metodología de trabajo de un sistema autónomo, con la finalidad de obtener una simulación confiable y un registro de las variables más relevante en el proceso.

Se plasma en este documento el trabajo alcanzar el objetivo principal de este proyecto, donde fue necesario realizar un estudio en las condiciones de diseño para la simulación de las variables ambientales. En desarrollo de sistema que simula el caudal se consideró las cargas hidráulicas y las pérdidas de energía del fluido en la tubería para validar la selección de la motobomba. Al diseñar el sistema de calentamiento se consideraron las condiciones del crudo a alta temperatura lo que permitió la selección del material más eficiente para llevar a cabo el intercambio de calor; Con las condiciones, y los actuadores de simulación establecidos se realizó la selección de la sensorica necesaria para obtener los registros de las variables, los pre-actuadores que gestiona la operación de los lazos de control y PLC como controlador principal del proceso automática. Junto a esto se observa la selección de la interface hombre máquina, los protocolos de comunicación que se establecen para la operación del banco de pruebas y el análisis de los lazos de control que dan vida a este proyecto

* Proyecto de grado

**Facultad de ingenierías físico-mecánicas, Escuela de ingeniería mecánica, Escuela de ingeniería eléctrica electrónica y telecomunicaciones, Directores: Jorge Meneses y Alfredo Acevedo.

ABSTRACT

TITLE: CONSTRUCTION OF A TEST BENCH SCALE TO SIMULATE THE CONDITIONS IN THE FACE OF THE FORMATION IN BILGE WELL, THE COLORADO SCHOOL FIELD*

AUTHOR: ANDRES FELIPE HERNANDEZ
JOSE IGNACIO SUAREZ**

KEYWORDS: environmental conditions, Reynolds number, losses and automation.

DESCRIPTION: in the present work a test bench was designed and constructed by the aptitude to simulate the environmental conditions at the back of well such as temperature, pressure and flow, was based by the criteria of x-bilidad and I structure with base to the methodology of work an autonomous system, with the purpose of obtaining reliable simulation and a more relevant record of the variables in the process.

The work reach the principal aim of this project, it was necessary to realize a study in the conditions of design for the simulation of the environmental variables. In system, development that simulates the flow it was considered the hydraulic loads and the losses of energy of the fluid in the pipeline to validate the selection of the motor-pump. On having designed the system of warming was considered to be the conditions of the crude oil to high temperature what allowed the selection of the most efficient material to carry out the heat exchange; With the conditions, and the actuators of simulation established there was realized the selection of the necessary sensor to obtain the records of the variables, the pre-actuators that there manages the operation of the bows of control and PLC as principal controller of the process automation. Close to this man observes the selection of the interface machine, the protocols of communication that are established for the operation of the test bench and the analysis of the bows of control that give life to this project

* Degree Project

** School of physics- Engineering mechanical, school of Engineering Mechanical, school off Engineering electrical , electronics and telecommunications, Directors: Jorge Meneses y Alfredo Acevedo.

INTRODUCCIÓN

La Industria Petrolera Colombiana ha sido en los últimos años el motor de la Economía del país, y por ende se han focalizado los esfuerzos en mantener la autosuficiencia petrolera, porque de no hacerlo conllevaría la importación de crudo, que producirá un impacto negativo sobre la economía; por esta razón, ha tomado importancia la posibilidad de mejorar la producción de los campos con características problemáticas, entre ellos los yacimientos maduros¹ que se perfilan como una posibilidad de trabajo, a través de la oportunidad de continuar la extracción a pesar de las condiciones difíciles que lo caracterizan.

Para esto es necesario analizar el comportamiento de los fenómenos que afectan la producción en la cara de formación de los pozos en sus condiciones ambientales. Pero al ritmo imparable que lleva esta industria ¿cómo se pueden realizar investigaciones en esta área que fomenten el desarrollo de nuevas tecnologías? ¿Se puede detener la producción para llevar a cabo una investigación?

Este libro describe el proceso que se realizó para diseñar y construir un banco de pruebas que simula las condiciones de fondo de pozo para darle respuesta a las anteriores inquietudes. A través de cada uno de sus capítulos se ven los resultados de la investigación y el estudio realizado para desarrollar éste sistema.

¹ Yacimientos maduros: son aquellos campos con más de 20 años de trabajo y que han llegado a un declive en su producción.

En el primer capítulo de este trabajo, se describe el análisis que se generó entorno a la necesidad que dio origen a este proyecto, identificando el problema y sus posibles soluciones, y determinando los lineamientos para el desarrollo del mismo.

En el segundo capítulo se realiza una síntesis del banco de pruebas, se describe cuáles son las condiciones a controlar y las variables a vigilar, analizando la estructura diseñada y los sistemas de control establecidos.

En el tercer capítulo se consigna el diseño y construcción del banco de pruebas, donde se puede encontrar el análisis de la estructura, y descripción de las características de los sensores, transmisores, pre-actuadores, actuadores, controladores y HMI seleccionados.

En el cuarto capítulo se explica la lógica que se planteó para la operación del banco de pruebas, donde se describe cada uno de los lazos que contribuyen en la simulación de las condiciones de fondo de pozo (lazos de temperatura, caudal y presión) manteniendo la seguridad como la condición de más alta prioridad en el sistema.

El quinto y último capítulo del cuerpo de este libro se consignan los parámetros que determinan la secuencia de programación, una descripción de la herramienta de programación **Allan Bradley** y las condiciones de sintonización de los controladores.

En los anexos se encuentran los manuales de operación, manual de seguridad, el análisis estructural detallado, planos de tablero de control, tablero de potencia, estructura, tuberías y acoples.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En la industria del petróleo se presentan problemas de taponamiento por aglomeración de parafinas², que es una causa significativa en el descenso de la producción, debido a que las componentes parafínicos que se encuentran disueltas en la solución de hidrocarburos a condiciones de temperatura y presión naturales de yacimiento, comienzan a precipitarse³ cuando es extraído el crudo del pozo, debido al decremento de la temperatura y presión que actúa sobre este. [1, 2]

En los pozos del campo colorado del convenio ínter-admirativo firmado por la Universidad Industrial de Santander y la Empresa Colombiana de Petróleos-ECOPETROL S.A. (Campo Escuela Colorado), la acumulación de parafinas es una problemática latente, representando pérdidas importantes en la producción del campo y es vital incrementar la producción, promoviendo estrategias que atenúen los efectos negativos que dichas peculiaridades generan. [1]

En la actualidad, el Campo Escuela Colorado adelanta investigaciones sobre la inhibición de parafinas para el mejoramiento de la producción de cada uno de sus pozos. Dentro de estas investigaciones del CEC, se encuentra el proyecto del estudiante de maestría CRISTIAN CAMILO JIMENEZ LEIVA, que se **ha** denominado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE UNA HERRAMIENTA MAGNÉTICA PARA INHIBIR LA PRECIPITACIÓN DE**

² Hidrocarburos saturados o parafínicos: son compuestos químicos que se encuentran formados en exclusiva por átomos de carbono y de hidrógeno.

³ Cuando una sustancia **sólida** suspendida o disuelta en un líquido se aglomere o deposite.

PARAFINAS DEL CRUDO DE LOS POZOS COLORADO 25 Y COLORADO 63 DEL CAMPO ESCUELA COLORADO”, el cual pretende exponer el crudo a radiaciones electromagnéticas (en condiciones ambientales de yacimiento), para observar los cambios en la reología⁴ (punto de nube⁵, punto de fluidez⁶ y viscosidad⁷), con la finalidad de mejorar las características del hidrocarburo, basado en la investigación previas, donde se demostró la efectividad del tratamiento magnético para los crudos con estas características.

Para realizar los estudios, se observa la necesidad de simular las condiciones ambientales de fondo del pozo; **por esta razón nace la iniciativa de construir un banco de laboratorio que permita simular las condiciones de la formación para realizar pruebas al prototipo de dicha herramienta, para detectar virtudes, deficiencias y limitaciones que se puedan presentar en una futura aplicación de la herramienta en fondo de pozo.**

De esta manera, estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica y la Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones, se ven frente a la necesidad de diseñar un circuito de prueba para simular las condiciones de temperatura y caudal de los pozos del Campo Escuela Colorado, que a su vez permita controlar y monitorear las variables de temperatura, caudal, corriente y tensión.

⁴ Reología: Es la ciencia de la deformación y el flujo de la materia.

⁵ Punto de nube: temperatura por debajo de la cual un surfactante no-iónico se separa como una fase distinta.

⁶ Punto de fluidez: Es la temperatura más baja en la que un fluido se sigue comportando como tal.

⁷ Viscosidad: Es una magnitud física que mide la resistencia interna al flujo de un fluido, producto del roce de las moléculas que se deslizan unas contra otras.

1.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Es inviable para el desarrollo de este proyecto, realizar las pruebas en la línea de producción del yacimiento, ya que esto implicaría unos costos muy altos para la administración del CEC, a causa del cese de operaciones mientras estas pruebas se realizan, que implican detener la línea de producción, extraer el tubing⁸ de bombeo, acoplar la herramienta, ingresar nuevamente el tubing y realizar las pruebas con la herramienta y extraerla ocasionando nuevamente el cese de operaciones. Todo este proceso necesita tiempo, el cual es improductivo para la línea de bombeo.

Tampoco se cuenta con un banco de pruebas que simule las condiciones ambientales del pozo, como el que se ubica en el ICP (Instituto Colombiano del Petróleo) Bucaramanga, usado en la investigación de CESAR VILLABONA y DIANA GONZALEZ otro proyecto realizado en el CEC, debido a que se encuentra descontinuado y fuera de servicio. [3]

Por consiguiente en la actualidad no se cuenta con un banco de prueba que permita la experimentación para el estudio de tratamientos electromagnéticos y su efecto sobre las características reológicas del crudo. Con esta necesidad surge la necesidad de construir un banco de pruebas que simule las condiciones ambientales de la cara de extracción de los pozos donde se pretende instalar una prueba piloto en una futura investigación.

Lo anterior, dará origen a líneas de investigación relacionadas con estudios que permitan nuevos diseños de herramientas para las diferentes pruebas de crudos parafínicos. Por lo tanto, construir un banco de pruebas es una solución no sólo

⁸ Tubing: nombre que se le da la línea de tuberías con una disposición explícita en la planta.

para el presente proyecto sino para todos aquellos que estén relacionados con el estudio de estos crudos en investigaciones futuras.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivos Generales

- Contribuir a la universidad en el cumplimiento de su misión, que consiste en formar personas de alta calidad profesional, en la generación y adecuación de conocimientos; construyendo un banco de pruebas que simule las condiciones de la cara de formación de un pozo del Campo Escuela Colorado, para las investigaciones que se están desarrollando en el tema de inhibición de parafinas y mejorar la competencia de los estudiantes en la comprensión de los temas del comportamiento de los crudos parafínicos.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Construir un banco de pruebas de disposición vertical de aproximadamente 3 metros largo y 2 metros de alto, con tres tramos paralelos de tubería de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ [pulgada] que permita la instalación de una herramienta magnética (con el propósito de generar una fuerza de naturaleza magnética para cambiar la reología de las muestras del crudo), una herramienta eléctrica (para observar el efecto de los campos eléctricos sobre la viscosidad de las muestras de crudo) y un tercer tramo para realizar pruebas al prototipo resultante de los estudios anteriores, y que además simule las condiciones de caudal de campo entre 0 y 300 [BOPD]⁹ y temperatura en la cara de la

⁹ BODP: barriles de crudo por día

formación (40°C a 80 °C). Para que pueda circular 2000 cm³ de crudo liviano con una gravedad mayor a 31.1 °API¹⁰.

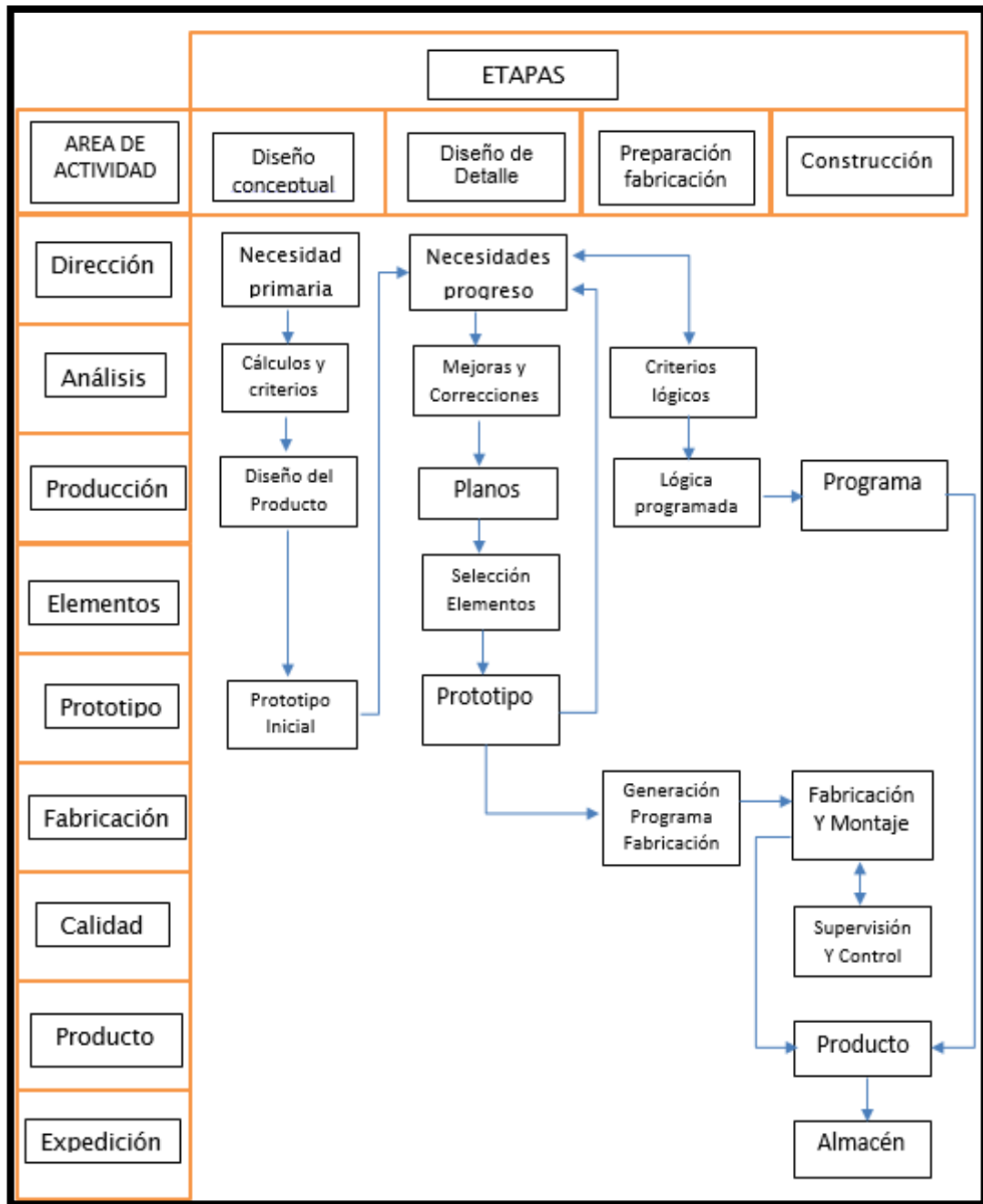
- Obtener un registro de las variables: temperatura en el tanque de almacenamiento, presión en la entrada de los tramos paralelos, caudal en la descarga de la motobomba, corriente en el solenoide del tratamiento magnético y tensión en las placas del tratamiento con campos eléctricos por medio de sensores y transmisores de señales, que permita monitorear el comportamiento del sistema.
- Implementar un control remoto de las variables del simulador (temperatura, caudal), a través de un sistema de adquisición, que permita la comunicación de la instrumentación, para visualizarlo por medio de una interfaz gráfica didáctica que sea de fácil manejo para el usuario.
- Elaborar una guía de operación y de seguridad del banco de pruebas para facilitar el uso a futuros usuarios de esta herramienta de experimentación.

1.4. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo del presente proyecto, se dispuso de la siguiente metodología, en la que se detallan las etapas y las áreas de actividad que abarcan el progreso de este. Esto permitió alcanzar los objetivos planteados, proyectando la evolución del mismo. Se define entonces las áreas de actividad para el progreso como: dirección, análisis, producción, elementos, prototipo, fabricación, calidad, producto, y expedición, cada una de estas áreas se enfoca para desarrollar efectivamente las etapas del proyecto como en el diseño conceptual, diseño de detalle, fabricación y construcción. En la figura 1, se describe la dinámica desempeñada para avanzar en el desarrollo del banco de pruebas.

¹⁰ API: American Petroleum Institute

Figura 1. Etapas para el desarrollo del proyecto



2. SÍNTESIS DEL BANCO DE PRUEBAS DISEÑADO.

En éste capítulo se realiza una descripción general de las necesidades de simulación, las variables importantes para el diseño, la metodología de operación y la estructura como sistema automatizado.

2.1.NECESIDADES Y VARIABLES DE SIMULACIÓN

El banco de pruebas se diseñó y construyó para simular las condiciones de caudal y temperatura de la cara de pozo de formación [2], este tiene la capacidad de controlar estas variables y permite observar la presión, tensión y corriente para realizar acciones que mantenga la seguridad del banco en algunos elementos. Este banco de pruebas utiliza un autómata PLC “programador lógico controlable” para la adquisición de datos, lo que facilita su operación. A continuación se presenta las variables a simular u observar.

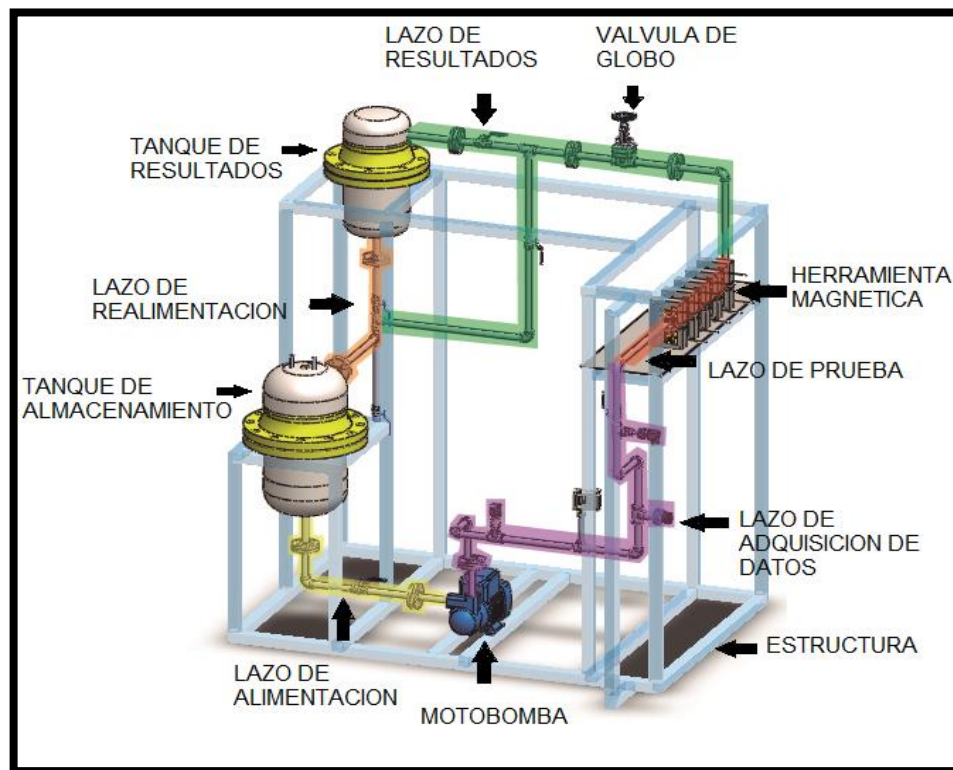
- **Temperatura:** Para simular los rangos de esta variable de fondo de pozo se cuenta con una resistencias eléctrica alimentada a un relé de estado sólido, con la cual se puede elevar la temperatura de las muestras de crudo a los rangos del yacimiento (40 °C a 75 °C) .
- **Caudal:** La simulación de esta variable se efectúa a través de una motobomba centrífuga como actuador principal, la cual es sustentada por un variador de velocidad que establece un rango entre 0 y 300 [BOPD].
- **Presión:** Se observa las condiciones de esta variable en la entrada y salida de la motobomba, esto permite vigilar condiciones seguras de funcionamiento para el banco de pruebas.

- Corriente: Esta variable se mide en los actuadores, la motobomba y la resistencia de alimentación.
- Tensión: Esta variable se mide en las fuentes de alimentación de las herramientas magnéticas

2.2. METODOLOGÍA DE OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

Para el diseño del simulador, fue necesario establecer una metodología en su funcionamiento, esto permite comprender las acciones que se realizan para simular las condiciones deseadas.

Figura 2: Esquema del Banco de pruebas.



Este sistema consta de un tanque de almacenamiento donde se deposita el crudo inicialmente, con capacidad de carga de 15 litros de volumen a presión atmosférica, en el tanque se efectúa el calentamiento por medio de una resistencia de inmersión y es agitado por dos pilas de inmersión.

El crudo almacenado desciende por lazo de alimentación para ser captado por la motobomba centrífuga de 1 [HP], esta empuja el crudo por el lazo de sensores donde se realiza la adquisición de datos a través de los sensores de temperatura, presión y caudal. Seguido el lazo de prueba que consta de un tramo de tubería intercambiable para facilitar el ajuste de prototipos para la investigación.

El proceso continúa en el lazo de resultados, que inicia con una válvula de globo con control proporcional y actuador eléctrico asegurando una presión en la tubería aguas abajo; este segmento termina en el tanque de resultados, que capta el crudo expuesto a los prototipos para luego ser extraído y estudiado. Del anterior segmento se bifurca al lazo de realimentación que lleva el fluido al tanque de almacenamiento cerrando el circuito. Para una información más detallada de los elementos que conforman al banco de pruebas remitirse a los capítulos 3 y 4.

El sistema de control de este banco, está basado en circuitos de control cerrados locales con actuadores eléctricos:

- Un lazo de control de temperatura conformado por dos sensores de temperatura y una resistencia de calentamiento en el tanque de almacenamiento.
- Un lazo de control de caudal del cual hacen parte un sensor de caudal, una motobomba centrífuga, un variador de velocidad y una válvula de globo de control proporcional;
- Un lazo cerrado de presión conformado por un sensor de presión.

- Un presostato que funciona como un circuito de enclavamiento para proteger la motobomba en operación.

Cada uno de estos lazos son controlados por un autómata PLC que se encuentra en un tablero de control individualizado a una distancia prudente de la influencia de los prototipos de investigación y una pantalla que permite la visualización y manejo de las variable de control.

La potencia de este banco es distribuida por un tablero de alimentación, donde se soporta el consumo energético estudiado para el funcionamiento del banco de pruebas. En la Figura 2, muestra el banco de pruebas construido, que tiene como finalidad simular las condiciones ambientales de los pozos de extracción de crudo.

2.3. ESTRUCTURA DEL BANCO DE PRUEBAS COMO SISTEMA AUTOMATIZADO

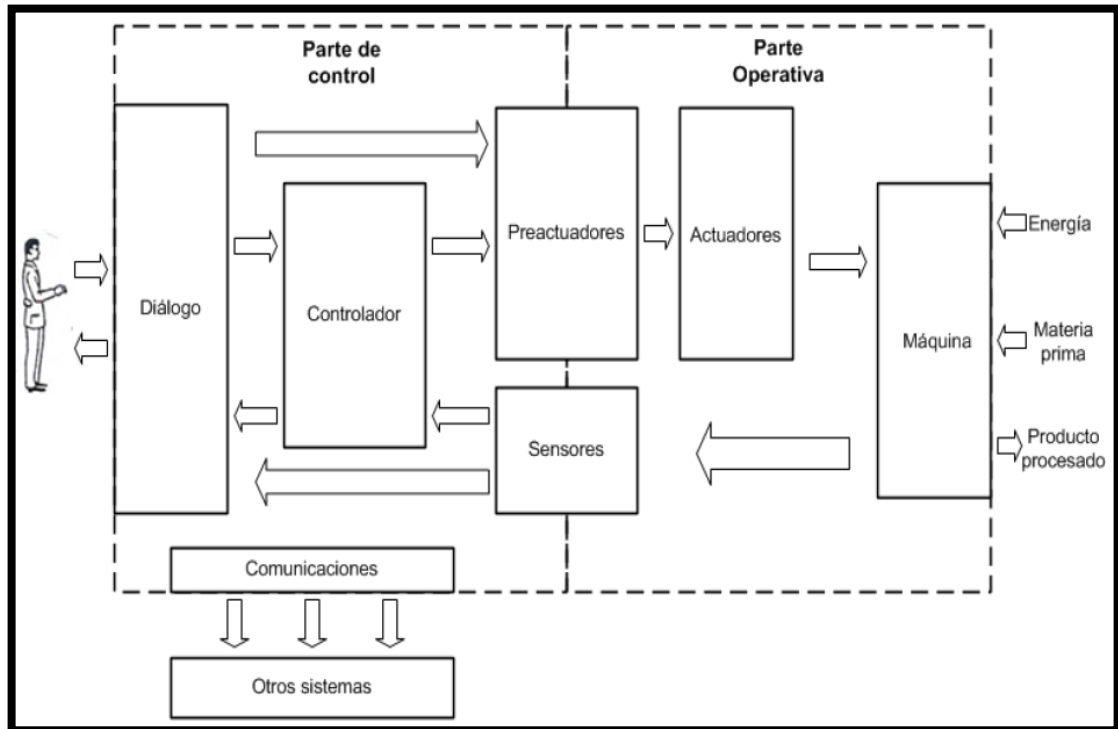
Un sistema autómata es un conjunto de elementos físicos conectados, que tiene como finalidad regular sus acciones automáticamente, es decir de forma independiente (sin intervención humana), corrigiendo errores de funcionamiento y regulando condiciones de actuación.

Un sistema automatizado se compone de dos partes: parte operativa (PO) y parte de control (PC), se presenta el modelo estructural de un sistema automático en la figura. [4]

Como se observa en la figura 3 la parte operativa se constituye principalmente del sistema que sustenta y desarrolla la acción, para nuestro estudio son aquellos elemento que permiten el flujo del líquido; también encontramos que la parte de

control se compone de la interfaz maquina humano (HMI¹¹), circuitos control, elementos de comunicación, pre-actuadores y sensores.

Figura 3. Estructura de un sistema automático



Fuente: Robot cartesiano neumático para el laboratorio de sistemas mecatrónicos.

[4]

Para el desarrollo de este proyecto se describe el banco de pruebas basado en la estructura de la figura 3, por esta razón se ha abordado el análisis físico simulado, separando su estructura en módulos que se describen a continuación:

A. **Máquina:** es la base del proyecto, aquel que permite simular las condiciones de temperatura y caudal del fondo de pozo y se diseña mano-facturable, con fácil

¹¹ HMI: Interfaz de usuario por sus siglas en idioma inglés, (Human Machine Interface) que se usa para referirse a la interacción entre humanos y máquinas; Aplicable a sistemas de Automatización de procesos.

ensamble, reduciendo sus costos, manteniendo condiciones de seguridad, re-fabricarle, reciclable, reusable, desmontable, fiable y ergonómico¹². Este módulo está compuesta por el circuito de tuberías, los tanques y el soporte (estructura metálica). [5]

- B. Sensores: son los elementos que se encargan de capturar las magnitudes físicas del sistema que son las variables de instrumentación, para transformarlas en variables eléctricas que puedan ser interpretadas por el control; para este proyecto los elementos de este módulo son: sensores de temperatura (PT100, PT1000), sensor de paleta rotativa(SIGNET2536), sensor de presión (MB300) y presostato(KPI)
- C. Actuadores: este módulo se compone de todos los elementos del banco con la capacidad de activar una acción, transformando una señal eléctrica en una actividad física, con la finalidad de generar un efecto autómatas sobre las condiciones del simulador; con estos se controla o regula las variables del proceso. En nuestro proyecto se tiene como actuadores motobomba (CPm 620), resistencia de calentamiento y válvula con control proporcional (**DANFOSS 032U856**).
- D. Pre-actuadores: los sistemas de control poseen como salidas señales eléctricas, que no necesariamente tiene la capacidad de sustentar un actuador directamente, por esta razón el pre-actuador es el elemento que realiza la interfaz entre el control y el actuador. Este módulo tiene dos elementos: variador de velocidad (VTL FC 51) y Relevador de estado sólido marca **WATLOW**.
- E. Control: el controlador es el dispositivo que permite interpretar las señales captadas por los elementos sensores, decidir las acciones de control

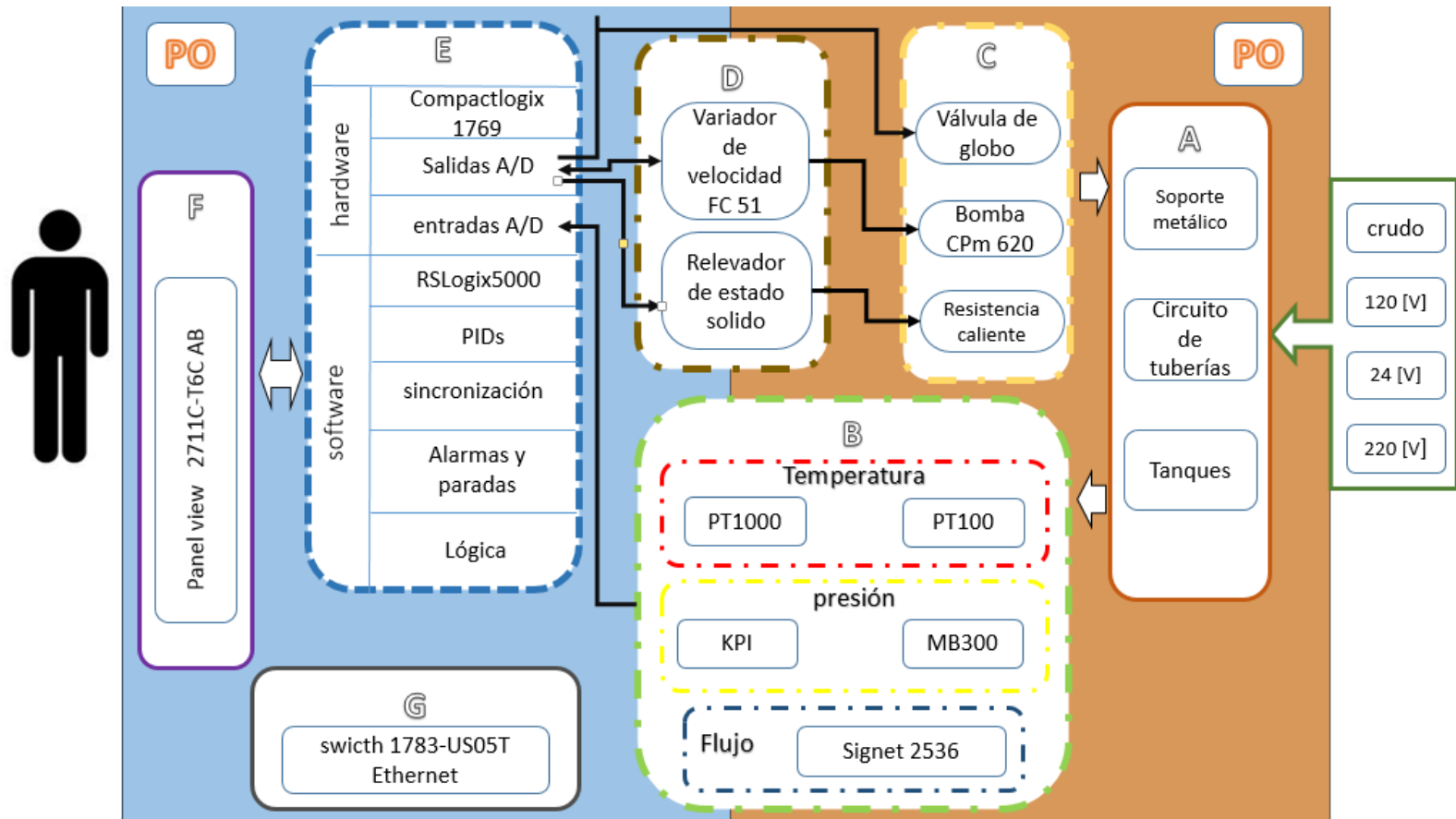
¹² La ergonomía es la disciplina tecnológica que se encarga del diseño de lugares de trabajo, herramientas y tareas que coinciden con las características fisiológicas, anatómicas, psicológicas y las capacidades del trabajador.1 Busca la optimización de los tres elementos del sistema (humano-máquina-ambiente), para lo cual elabora métodos de estudio de la persona, de la técnica y de la organización.

necesarias a través la implementación de algoritmos lógicos, para mantener las condiciones de simulación, y emitir señales de control los actuadores o pre-actuadores de un sistema. se compone por PLC.

- F. HMI: este módulo es la interfaz del sistema con el operador, es importante que sea dinámico y didáctico y que permita al operador sentirse cómodo con el uso del banco de pruebas, el elemento que compone este módulo es el panel view (2711C-T6C **AB**).
- G. Comunicación: para este proyecto consta de un swicth (1783-US05T) este permite la comunicación Ethernet con el PLC y el panel view, para realizar cambios en su programación o vigilar las condiciones de la misma.

En la figura 4 se observa la distribución por módulos que tiene este proyecto.

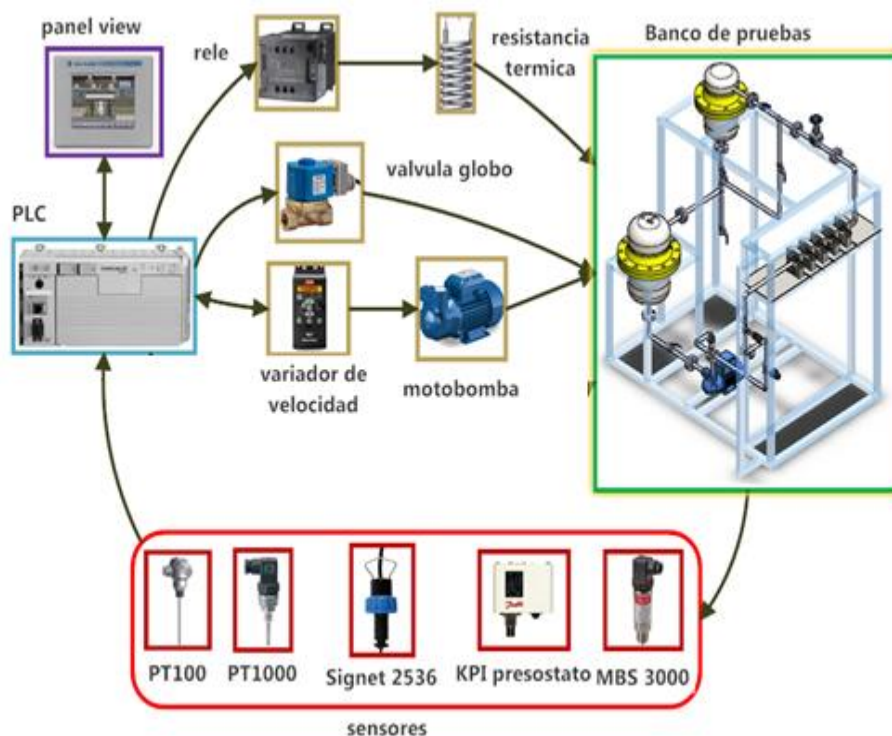
Figura 4. Módulos del banco de pruebas



2.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Se observa en la figura 5 un diagrama de bloques de los elementos de control y acción implementados en el banco de pruebas para: control de temperatura, control de caudal, homogenización del fluido, protecciones a desviaciones de presión y visualización de datos, en el que el PLC **1769 CompactLogix** de **Allan-Bradley**, que actúa como maestro del sistema, constituyendo un protocolo que determina prioridades en las acciones, paradas críticas y alarma de funcionamiento.

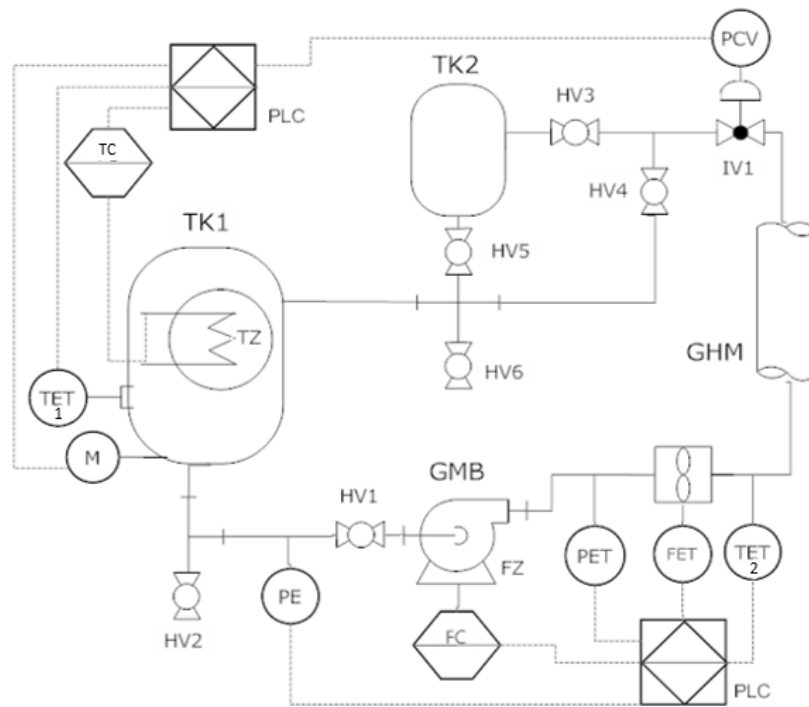
Figura 5. Diagrama de bloques del Banco de Pruebas



Los sensores funcionan como elementos de realimentación del sistema, sus señales se obtienen directamente del proceso y son transmitidas al PLC por diferentes señales de comunicación (HART, salida de pulso en frecuencia, 0 a

10[V] y 24[V]). El PLC captura las entradas que son interpretadas y analizadas por los algoritmos de programación lógicas establecidos en el entorno RSLogix5000, para determinar las acciones de control pertinentes, comparando la señal medida con la información suministrada por el operador a través del Panel View, establecida la acción, el PLC indica a los actuadores las correcciones a realizar para mantener el proceso estable y en las condiciones deseadas para la prueba. En la figura 6 se ilustra el diagrama que muestra el flujo del proceso en las tuberías, así como los equipos que intervienen en el proceso y la instrumentación instalada (P&ID), en esta figura es sencillo identificar los lazos de control y la ubicación de los equipos e instrumentación en el proceso. El sentido para la lectura de este diagrama es: derecha a izquierda, arriba abajo

Figura 6. P&ID



3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En el capítulo anterior se realizó una descripción del banco de pruebas como objeto de estudio el cual está compuesto por diferentes módulos: máquina, sensores, pre-actuadores, actuadores, control, interfaz hombre máquina y comunicación; en este capítulo se realiza un estudio detallado de estos componentes, realizando un análisis en los criterios de diseño y selección que los hacen aptos para operar y mantener las condiciones de simulación de la cara de formación de pozo.

3.1. MAQUINARIA

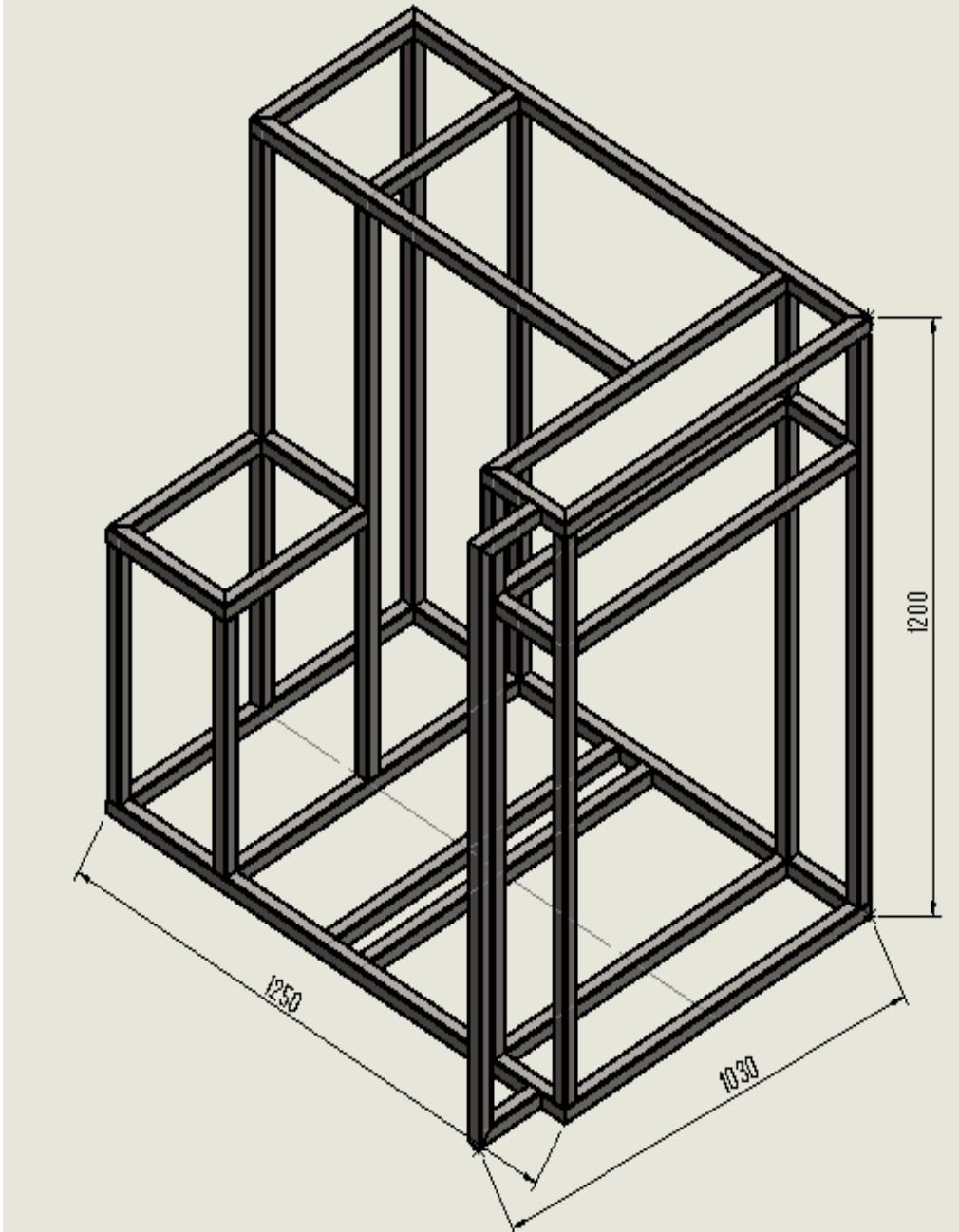
Es el módulo base para esta estructura, es aquel que asegura las condiciones físicas para el funcionamiento del banco de pruebas, ya que provee de los medios para realizar el fluido del crudo y soporta los componentes que son necesarios para ello. En este módulo se describe los soportes metálicos, el circuito de tuberías y los tanques de almacenamiento.

3.1.1. Soporte metálico. Se diseñó para la adecuación de dos tanques y un circuito de tubería que contiene válvulas, sensores y accesorios de tuberías como: codos, té y bridas, del mismo modo se construyó para soportar una carga superior a 200 [Kg], Para el soporte se seleccionó un tipo de acero ASTM A36¹³ con perfil cuadrado 40x40x2,5[mm], Las dimensiones exteriores del banco de pruebas es de 1,2 [m] de alto, 1,25 [m] de largo y 1,03 [m] de ancho, con la

¹³ ASTM A36: acero estructural

finalidad de tener asequibilidad a todos los elementos de este banco. En la figura 7 se muestra una ilustración del soporte metálico del banco de pruebas.

Figura 7: soporte metálico del Banco de Pruebas



Las propiedades del material son:

Tabla 1. Propiedades del Material del soporte

Nombre:	ASTM A36 Acero
Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal
Límite elástico:	2.5e+008 N/m ²
Límite de tracción:	4e+008 N/m ²
Módulo elástico:	2e+011 N/m ²
Coefficiente de Poisson:	0.26
Densidad:	7850 kg/m ³
Módulo cortante:	7.93e+010 N/m ²

Fuente: ASTM A36 [28]

El soporte metálico del Banco de pruebas se diseñó en la interfaz **SolidWorks**¹⁴, mediante el gestor de diseño '**Feature Manager**'¹⁵ con capacidad de realizar análisis estructurales, en lo cual permite realizar modificaciones en cualquier etapa de diseño.

Los resultados de los análisis se presentan analíticamente y gráficamente con una escala de colores que permiten visualizar los segmentos sometidos a la máxima carga, con el fin de determinar los puntos críticos. La escala determina que las áreas rojas indican donde fallará el marco de acero y el color azul indica que no hay riesgo de falla.

¹⁴ SolidWorks: programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico y simulación. La universidad UIS cuenta con la licencia para este trabajo.

¹⁵ Feature Manager: gestor de diseño de SolidWorks que permite realizar análisis de fallas

Los componentes de la tensión dependen de las direcciones en que se calculan, las tensiones cortantes desaparecen y los tres componentes de tensión normal restantes son las llamadas tensiones principales.

La tensión de Von Mises¹⁶ es la calculada a partir de los componentes de la tensión; en donde un nodo no define exclusivamente el estado de tensión en él, pero si nos proporciona información adecuada para evaluar la seguridad del diseño para múltiples materiales dúctiles.

A diferencia de los componentes de la tensión, la de Von Mises no tiene dirección. Está completamente definida por la magnitud con unidades de tensión y es utilizada por el criterio de fallos para evaluar los errores en los materiales. Se calcula a partir de la forma equivalente a partir de las tres tensiones principales:

$$\sigma'^2 = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2}{2} \quad (1)$$

Se analizaron las diferentes partes del soporte metálico sometido a los diferentes esfuerzos sometidos, siguiendo el criterio de Von Mises. Se obtuvieron los siguientes resultados analítica y gráficamente [6]:

¹⁶ Tensión de Von Mises: La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión, se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

Tabla 2. Análisis de Carga del soporte metálico

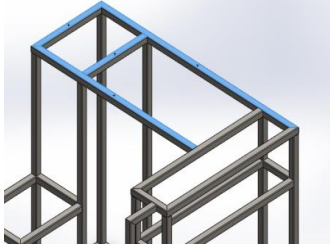
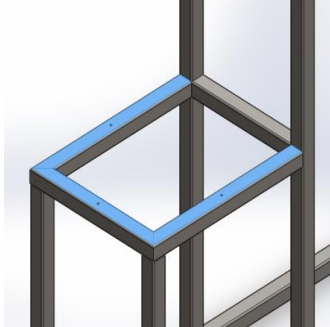
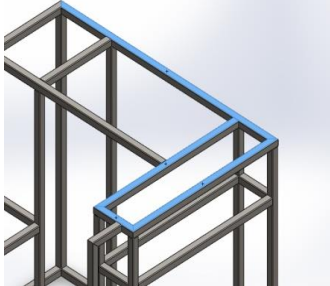
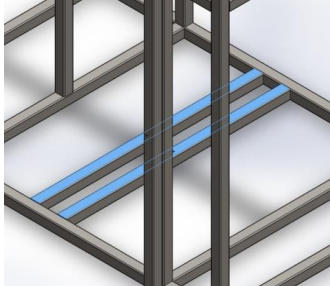
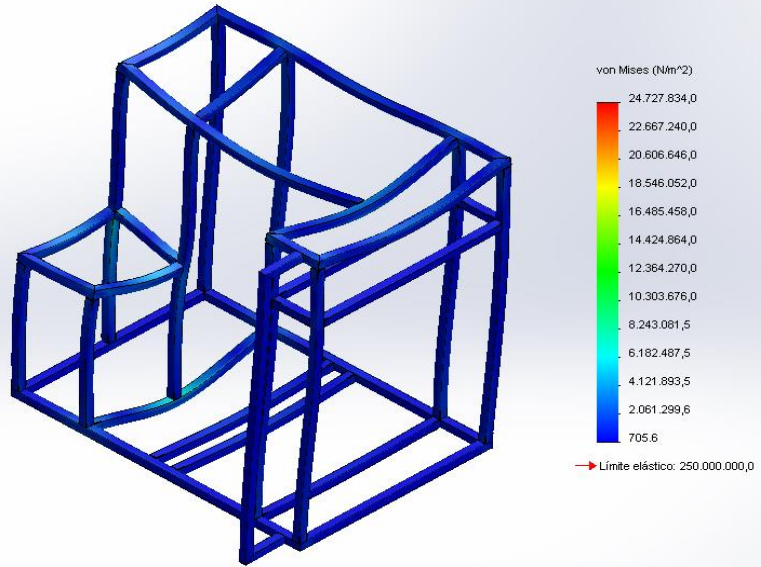
NOMBRE DE CARGA	CARGA EN LA IMAGEN	DETALLES DE CARGA	
Carga remota (Transferencia directa)-1		<p>Entidades:</p> <p>Tipo:</p> <p>Sistema de coordenadas:</p> <p>Fuerza Valores:</p> <p>Coordenadas de referencia:</p>	<p>4 cara(s)</p> <p>Carga (transferencia directa)</p> <p>Coordenadas cartesianas globales</p> <p>---, -70, --- kgf</p> <p>-568 1480 -235 mm</p>
Carga remota (Transferencia directa)-2		<p>Entidades:</p> <p>Tipo:</p> <p>Sistema de coordenadas:</p> <p>Fuerza Valores:</p> <p>Coordenadas de referencia:</p>	<p>3 cara(s)</p> <p>Carga (transferencia directa)</p> <p>Coordenadas cartesianas globales</p> <p>---, -80, --- kgf</p> <p>-568 700 250 mm</p>
Carga remota (Transferencia directa)-3		<p>Entidades:</p> <p>Tipo:</p> <p>Sistema de coordenadas:</p> <p>Fuerza Valores:</p> <p>Coordenadas de referencia:</p>	<p>4 cara(s)</p> <p>Carga (transferencia directa)</p> <p>Coordenadas cartesianas globales</p> <p>---, -40, --- kgf</p> <p>621 1480 0 mm</p>
Masa distribuida-1		<p>Entidades:</p> <p>Tipo:</p> <p>Sistema de coordenadas:</p> <p>Masa remota:</p>	<p>2 cara(s)</p> <p>Desplazamiento (Transferencia directa)</p> <p>Coordenadas cartesianas globales</p> <p>11 kg</p>

Tabla 3. Tensión de Von Mises en el soporte del Banco

Nombre	Tipo	Mín.	Máy.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	705.606 N/m ² Nodo: 17583	2.47278e+007 N/m ² Nodo: 29290

Nombre de modelo: Estructura Banco de Pruebas
 Nombre de estudio: Estudio Estructural Loop
 Tipo de resultado: Static: tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 1321.4



La Tabla 3 indica que la estructura no falla con la máxima carga de $2,4727e^7 \frac{N}{m^2}$ y es viable su construcción.

La construcción del soporte metálico del banco se realizó para que sea fácil su traslado y montaje, con este argumento se seccionó en 6 segmentos que lo componen, en la Figura 8, se muestra el anclaje por tornillo que se dispuso en los

anclajes; también se diseñó con el material y perfil menos costoso para hacer más rentable el diseño. A este se le agregaron ruedas para facilitar su desplazamiento.





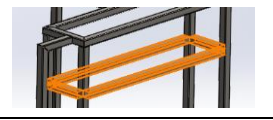

Figura 8: Acople del soporte metálico



Figura 9: Rueda para desplazamiento del marco metálico



Tabla 4. Segmentos modulares del soporte del banco

Nominación	Modulo
A	
B	
C	
D	
E	
F	

3.1.2. Circuito de tuberías. El circuito de tuberías está compuesto por diferentes secciones interconectadas a través de varias uniones (codos, tes, válvulas) formando un lazo cerrado en el cual circularán las muestras de crudo. Este sistema permite controlar el flujo del fluido desde su entrada (tanque de almacenamiento), hasta obtener un resultado (tanque de resultados). El procedimiento con el cual se llevó a cabo el diseño y construcción del banco de pruebas fue de la siguiente forma:

- Se establecieron las condiciones de diseño incluyendo temperatura.

- Se determinaron el diámetro de la tubería el cual dependió de las condiciones del proceso, es decir, el caudal, la velocidad y la presión del fluido.
- Se seleccionó el material de la tubería con base en la corrosión, fragilización y resistencia.
- Se calcularon los espesores mínimos de pared para la temperatura y presión de diseño, de manera que la tubería sea capaz de soportar los esfuerzos tangenciales producidos por la presión del fluido.
- Se analizaron los esfuerzos por flexibilidad para verificar los esfuerzos en la tubería, los esfuerzos en componentes locales del sistema, las fuerzas y momentos en los puntos terminales, para que estén en los límites aceptables, en todas las fases de operación, durante toda la vida de la planta.

Sabiendo que la variación del perfil de velocidad del fluido al entrar en contacto con los instrumentos de medición y accesorios de tubería, esta velocidad viene determinada en función del diámetro de tubería, por otro lado el desplazamiento de los fluidos presenta una disminución de presión, la cual es función de la velocidad media del fluido al cuadrado. Por esta razón se recomienda para diseño manejar fluidos con velocidades bajas, debido a esto se presenta en la Tabla 5 el intervalo de velocidades medias del fluido recomendadas [7, 8]:

$$D = \sqrt{\frac{354*Q}{V}} \text{ [mm]} \quad (2)$$

Donde el caudal máximo a simular será $Q = 1.99$ esta dado en $\left[\frac{m^3}{h}\right]$ y la velocidad media del crudo en la línea de descarga es de $V = 4,2$ está dada en $\left[\frac{m}{s}\right]$, entonces remplazando en la ecuación (2) se obtiene el diámetro de la tubería del banco de pruebas $D = 12,7$ [mm] [8].

Tabla 5. Intervalo recomendado de velocidad media del fluido

FLUIDO	TIPO DE SERVICIO	Ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	[0,5-1]	[0,15-0,30]
	Entrada de bomba	[1-3]	[0,3-0,9]
	Salida de bomba	[4-14]	[1,2-4,2]
	Línea de conducción	[4-8]	[1,2-2,4]
Líquido viscoso	Entrada de bomba	[0,2-0,5]	[0,06-0,15]
	Salida de bomba	[0,5-2]	[0,15-0,6]
Vapor de Agua		[30-50]	[9-15]
Aire o gas		[30-100]	[9-30]

Luego teniendo en cuenta su alta resistencia a fluidos abrasivos asimismo las características de temperatura, presión, grado de corrosión del fluido circulante y su gran uso en la industria por su bajo costo , se seleccionó la tubería de acero al carbono como la más viable para este sistema, también porque son las tuberías más usadas para estos circuitos de tubería, las propiedades mecánicas del Acero al carbono son: el límite de fluencia es $S_y = 36 [Kpsi] = 250 [MPa]$ y la resistencia a la tracción es $S_u = 80 [KPsi] = 550 [MPa]$.

En este caso se requiere que el banco de pruebas sea dinámicamente semejante con la cara de formación del pozo y para esto es necesario que el número de Reynolds sea idéntico en ambos.

El número de Reynolds mide la importancia relativa de cada una de las variables que intervienen en un fenómeno en que la fuerza predominante es la viscosidad, es decir la ρ, μ, V, D . Cuando mayor es el número de Reynolds menos importancia tiene la fuerza de viscosidad en el fenómeno, y viceversa.

Para la construcción del banco de pruebas se tuvieron en cuenta las condiciones de la fuerza de viscosidad en la cara de la formación del pozo, los números de Reynolds en el campo y en el prototipo habrán de ser iguales:

$$Re_c = Re_p \quad (3)$$

Donde Re_c es el número de Reynolds en el campo y Re_p es el número de Reynolds del prototipo [9].

Según esta ley de Reynolds se puede calcular el caudal a simular y el diámetro de la tubería que se requiere usar en la simulación, conociendo los datos del campo como son:

- Caudal del campo Q_c no sobrepasara los 300[BOPD] [2], por lo tanto

$$Q_c = 1.84 * 300[BOPD] = 552 \left[\frac{cm^3}{s} \right]. \quad (4)$$

- Diámetro de tubería de Campo $D_c = 2 \frac{7}{8} [in] = 7.3025 [cm]$.
- Longitud supuesta del tramo de tubería expuesto al campo magnético en campo $L_c = 25 [cm]$.
- Volumen expuesto al campo magnético en campo

$$V_s = \frac{\pi}{4} (7.3025)^2 (25) = 1047.06 [cm^3]. \quad (5)$$

- Diámetro supuesto del prototipo o simulador $D_s = 1.27 [cm]$.
- Longitud efectiva del tramo de tubería expuesto al campo magnético en el simulador $L_s = 20 [cm]$.
- Volumen expuesto al campo magnético en el simulador

$$V_s = \frac{\pi}{4} (1.27)^2 (20) = 25,33 [cm^3]. \quad (6)$$

Conociendo que el caudal Q en función de la velocidad característica del fluido v y del área transversal de la tubería A :

$$Q = v * A \quad (7)$$

Y el número de Reynolds se puede expresar como:

$$Re = \frac{V * D * \rho}{\mu} \quad (8)$$

Dónde:

V= velocidad media del fluido

D= diámetro de la tubería

ρ=densidad del fluido

μ=viscosidad dinámica

Reemplazando las ecuaciones (7) en la ecuación de la ley de Reynolds (8) tenemos:

$$\frac{\left(\frac{Q_C}{A_C}\right) * D_C * \rho}{\mu} = \frac{\left(\frac{Q_S}{A_S}\right) * D_S * \rho}{\mu} \quad (9)$$

Asimismo que la densidad **ρ** y la viscosidad dinámica **μ** del fluido son iguales, la expresión se reduce a:

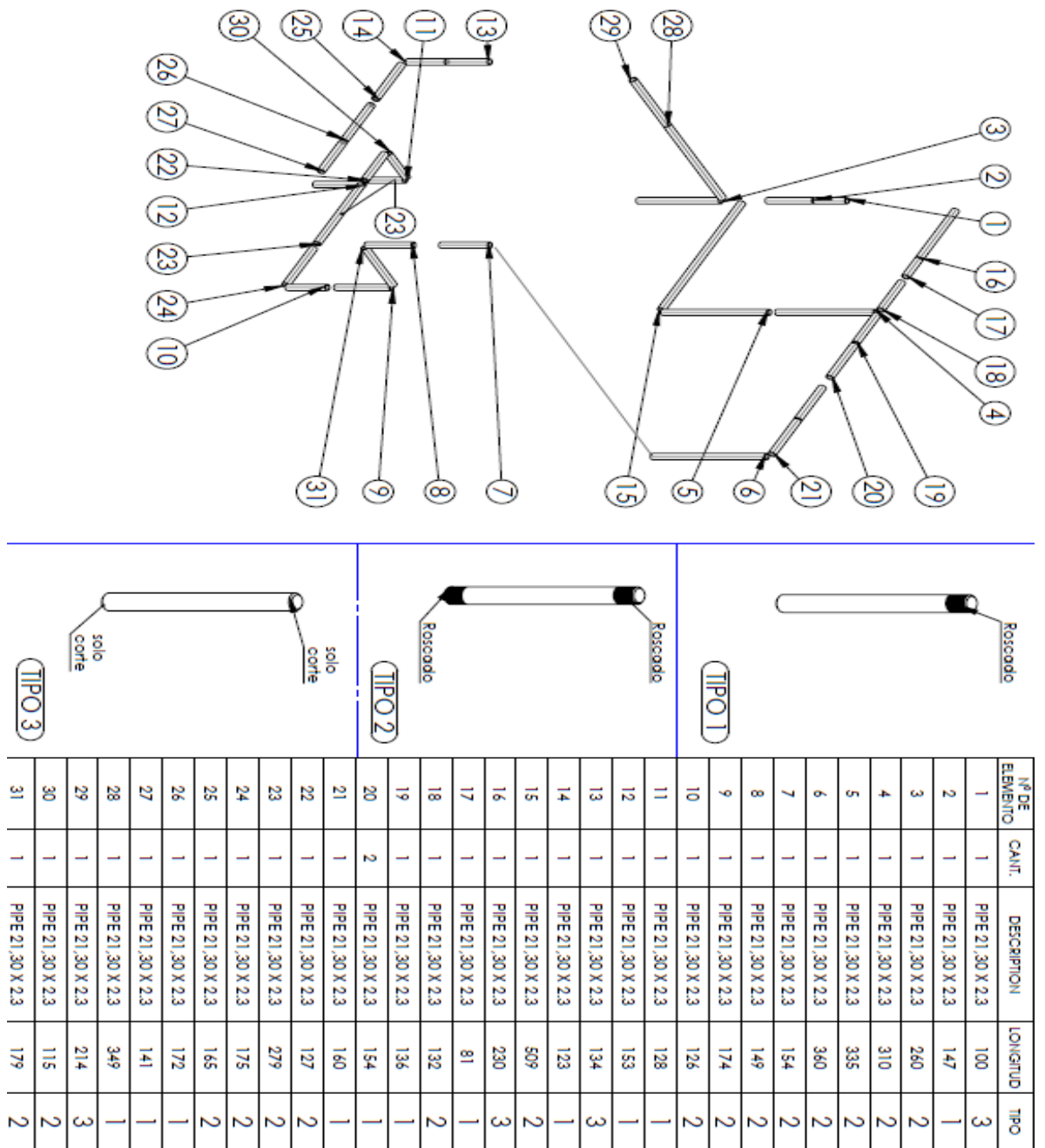
$$Q_s = Q_c \left(\frac{D_s}{D_c}\right) \quad (10)$$

Entonces el caudal a simular **Q_s** será:

$$Q_s = 552(1.27/7.3025) = 96[(\text{cm}^3)/\text{s}] \quad (11)$$

A continuación en la Figura 10 se encuentra el plano de Disposición de las tuberías del Banco de Pruebas, en el cual se especifica el orden de las tuberías dentro del banco de pruebas. La figura 10 también contiene una descripción de su longitud neta de cada una de las tuberías y el tipo de rosca que se utilizó para acoplar el circuito.

Figura 10. Plano de Disposición de las tuberías del Banco de Pruebas



3.1.3. Tanques de almacenamiento. Para el diseño de los tanques del banco de pruebas se debe establecer la temperatura de diseño del metal, la gravedad

específica y la tolerancia de la corrosión según recomendaciones de fabricantes dentro de la industria local; para esta aplicación en particular y con las condiciones que se requieren se construyó con las siguiente especificaciones: como es un tanque pequeño el espesor máximo del cuerpo es de $\frac{1}{2}$ " , la temperatura mínima es de 25°C , la tensión máxima es de 21000 lbs/pulg^2 y el material usado es acero estructural según el estándar de la A.S.T.M (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS) [10], para el soldado de materiales con un esfuerzo mínimo a tensiones menores a $8 * 10^4 \text{ (lb/pulg}^2)$ los electrodos de arco manual deben estar hechos de materiales cuya clasificación sea AWS: E-60XX

Figura 11: Tanque de almacenamiento TK1

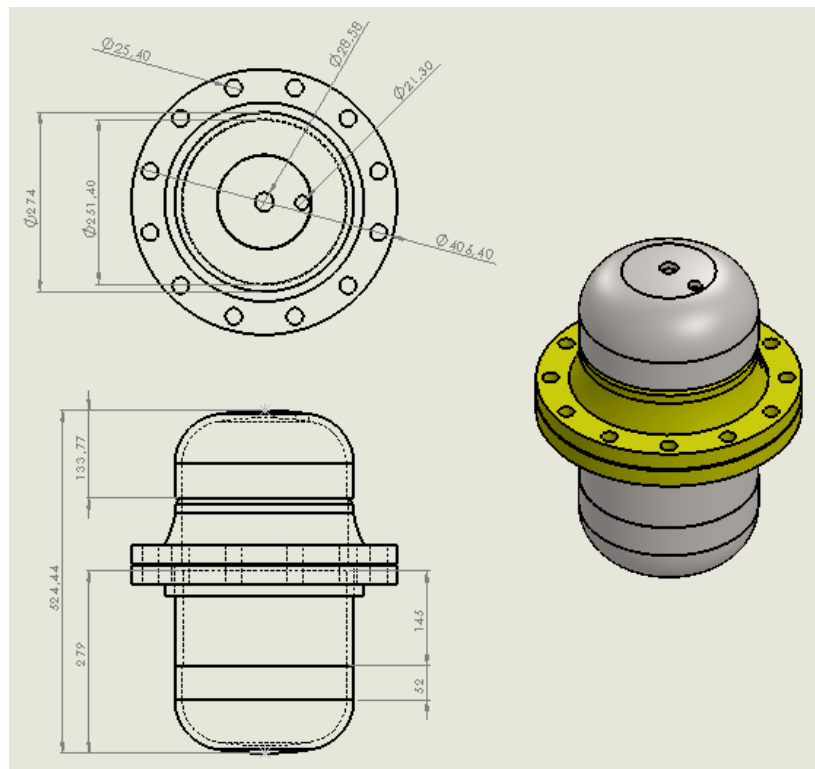
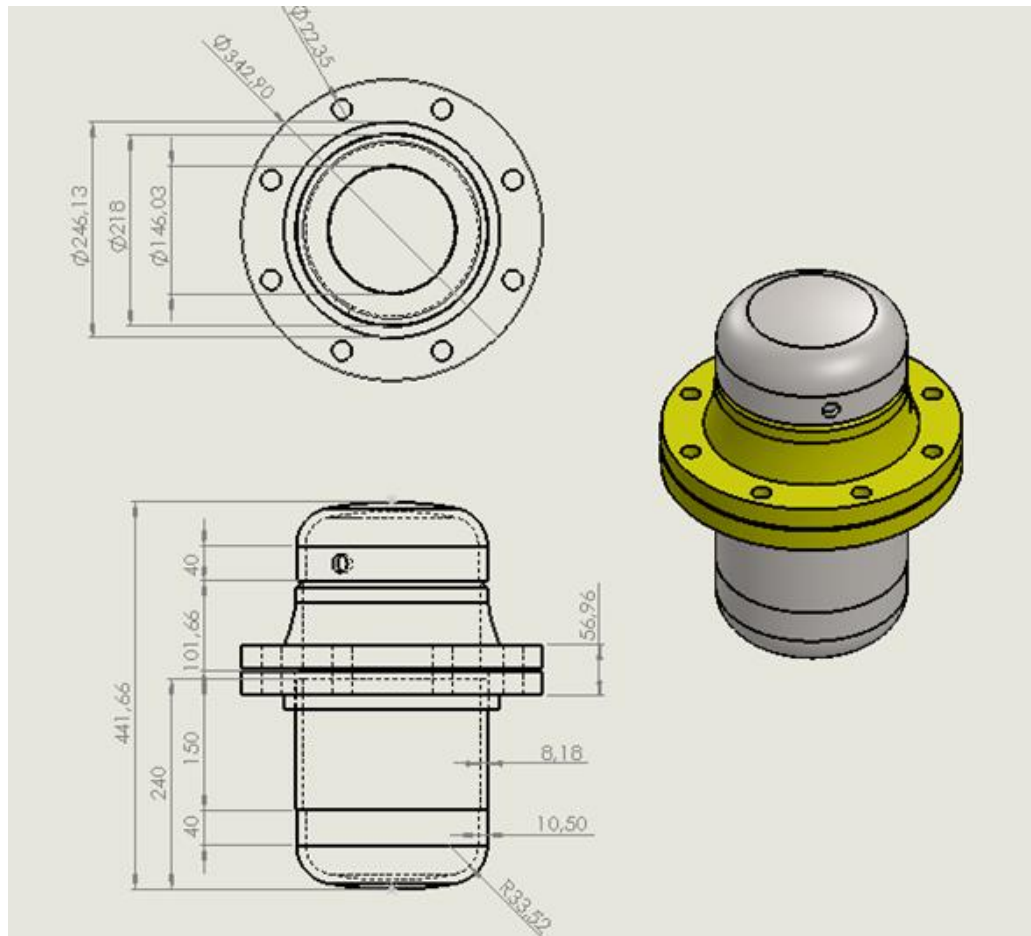


Figura 12: Tanque de Resultados TK2



Para el diseño de los tanques se usó la norma API 650 [11] que es la norma que fija la construcción de tanques soldados para el almacenamiento de petróleo. La presión interna a la que pueden llegar a estar sometidos es de 15 psi, y una temperatura máxima de 90 °C. Con estas características, son aptos para almacenar a la mayoría de crudos del CEC.

El volumen del tanque es de 15 Litros, estará en disposición vertical y según la norma se decide utilizar un tanque de techo fijo que se usa para contener líquidos con bajo contenido de ligeros como son: agua, petróleo crudo, etc.

3.2. SENSORES Y TRANSMISORES

Son una parte vital en la estructura del banco, ellos se encargan de realimentar el sistema y cerrar el lazo de control, esto permite mantener estable las condiciones de simulación y responder más efectivamente a los cambios que se realizan; actúan capturando las variables físicas para transformarlas en señales eléctricas.

En nuestro banco contamos con 2 sensores de temperatura (uno para el tanque y otro en la línea de descarga de la motobomba), 1 sensor de presión, 1 presostato y 1 sensor de flujo.

Los sensores son dispositivos capaces de capturar una señal física y transformarla en otra señal que sea más fácil de manejar, normalmente ésta es una señal eléctrica.

Los transmisores son equipos capaces de captar señales y enviarlas a un receptor en otra señal que es escalable. Normalmente se usan señales neumáticas o eléctricas (4 a 20 mA, 0 a 10V, protocolos de comunicación digital, etc.) [11].

3.2.1. Sensores transmisores de temperatura. Para el banco de pruebas se requiere de dos adquisiciones de datos de temperatura, en el tanque de almacenamiento donde se simulan las condiciones térmicas de los pozos y antes del lazo de pruebas, esto es con el fin de adquirir los datos de temperatura en el proceso de calentamiento y a la salida de la motobomba.

El mercado ofrece diferentes tipos de sensores de temperatura, entre los que se encuentra:

Tabla 6. Clases establecidas para sensores RDT

Tipos sensores de temperatura		
Tipos	sistemas	rango de medida °C
Eléctricos	Termocuplas	-200 a 2800
	Termo resistencias	-250 a 850
	Termistores	-195 a 450
Mecánicos	Sistemas de dilatación	-195 a 760
	Termómetros bimetálicos	0 a 450
	Termómetro de liquido	-195 a 760
Radiación térmica	Pirómetros	-40 a 4000
	Cámaras infrarrojas	
	Termómetro laser	

Fuente: Instrumentación industrial [12].

Se realizó un estudio para seleccionar el sensor de temperatura basado en su costo, linealidad, exactitud, rapidez, condiciones ambientales y rango de temperatura. En este estudio se determinó que la termo-resistencia que satisface las necesidades del banco de pruebas, además de su rapidez, un criterio que fue importante en la selección, fue su operación en el banco de pruebas.

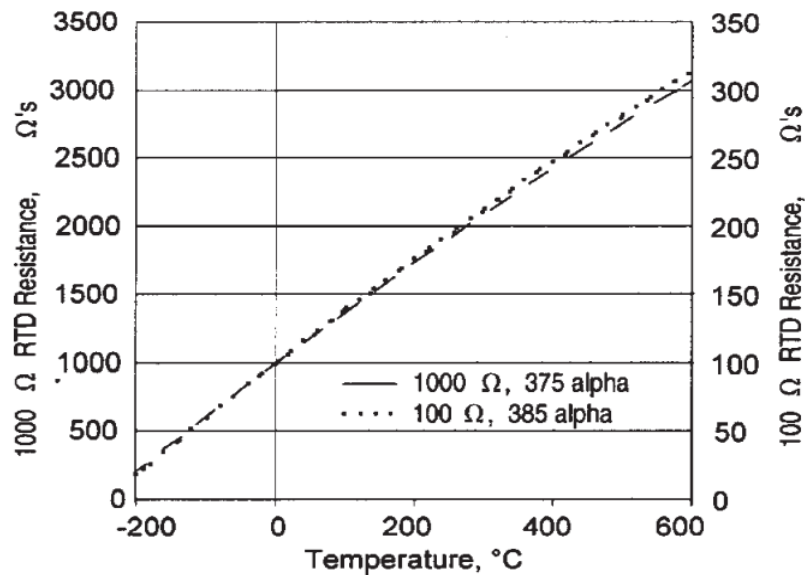
Tabla 7. Clases establecidas para sensores RDT

CLASES	TMP	OMHS
Clase 2B	$\pm 0,60^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,24 \Omega$
Clase B	$\pm 0,30^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,12 \Omega$
Clase A	$\pm 0,15^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,06 \Omega$
Clase 1/3B	$\pm 0,10^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,04 \Omega$
Clase 1/5B	$\pm 0,06^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,02 \Omega$
Clase 1/10B	$\pm 0,03^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,01 \Omega$

Fuente: Instrumentación industrial [12].

En esta tabla se identifican las termo-resistencias por la clase de RTD, donde una Clase B es de platino con una resistencia de 100 Ohm a 0°C con un margen de error de $\pm 0,30$ [°C] o $\pm 0,12$ [Ohm]. Los valores de resistencia a 0[°C] más habituales son los de 100 y 1000 [Ohm]. La PT100 varía 38,5 Ohm cada 100°C y la PT1000 varía 385 Ohm cada 100°C [13].

Figura 13: curva característica PT100 y PT1000




Fuente: Instrumentación industrial, Antonio Solé [12].

El banco de pruebas tiene como sensores de temperatura:

- PT 100 MBT 3560 DANFOSS: Sensor de temperatura con transmisor Integrado para aplicaciones industriales.

Tabla 8. Especificaciones del sensor de temperatura MBT 3560 Danfoss

Especificaciones principales		
Rangos de medición	Cualquier combinación entre -50°C y +200°C	
Intervalo mínimo	25°C	
Señales de salida	4-20 mA	radiométricas 10-90%
Rendimiento		
Precisión	< ± 0,5 % FS (tip.)	< ± 1 % FS (máx.)
Tiempos de respuesta	Agua 0,2 m/s	
	t0.5 = 10 seg.	t0.9 = 30 seg.
Carga máxima del tubo de protección	100 bares	

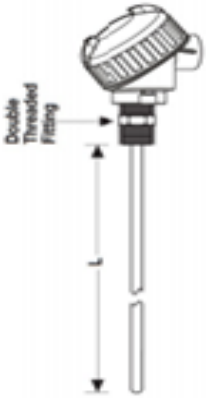


Fuente: Sensor de temperatura con transmisor integrado para aplicaciones industriales, MBT 3560 [14].

- RTD de Ø1/4" x 6" con rosca al proceso de 1/4" NPT clase A: Sensor de temperatura PT100.

Tabla 9. Especificaciones del sensor PT 100

Especificaciones principales		
Rangos de medición	Cualquier combinación entre -40°C y +400°C	
Intervalo mínimo	25°C	
Señales de salida	4-20 mA -	
resistencia aislamiento	>10MΩ a 20°C; 1MΩ a 400°C	
Precisión	< ± 0,4 % FS (tip.)	< ± 1 % FS (máx.)
Estabilidad	Máxima desviación de Ro 0.04% después de 100 horas a 400°C	
Coefficiente de Temperatura	0.003850	



Fuente: www.ryultda.com [15]

Tabla 10. Especificaciones del sensor de temperatura MBT 3560 DANFOSS

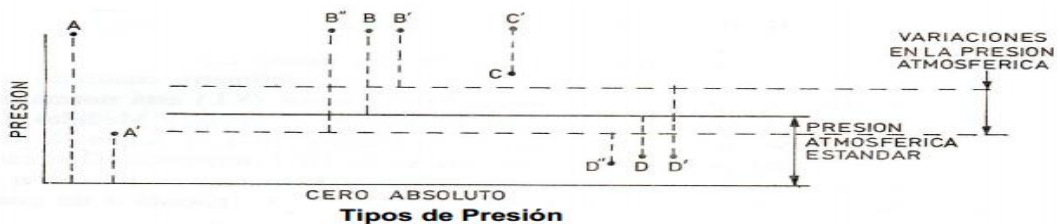
Especificaciones principales		
Rangos de medición	1 bar hasta 600 bar	
linealidad	$\leq \pm 0.2\%$ FS	
Señales de salida	4-20 mA -	
Tiempos de respuesta	< 4 ms	
Precisión	< $\pm 0,5\%$ FS (tip.)	< $\pm 1\%$ FS (máx.)
	condiciones de trabajo	
Precisión	< $\pm 0,5\%$ FS (tip.)	< $\pm 1\%$ FS (máx.)
temperatura de trabajo	-40 \rightarrow +85°C	
Estabilidad de vibración	sinusoidal	20 g, 25 Hz - 2 kHz
	intermitente	7.5 grms, 5 Hz - 1 kHz



Fuente: Transmisor de presión para aplicaciones industriales Tipo MBS 3000 [16].

3.2.2. Sensor transmisor de presión. Para reconocer la presión de la línea se requiere un sensor que capte el valor de fuerza en un área específica y la variación de la misma, y sea transmitida de forma exacta y precisa en una señal eléctrica que sea proporcional a la influencia de la fuerza. La señal eléctrica indica el valor de presión recibida. Su información mantendrá las condiciones de proceso seguras en presión para los instrumentos y los operadores, además aportará datos a las investigaciones venideras de los diversos prototipos aquí probados.

Figura 14. Tipos medición de presión



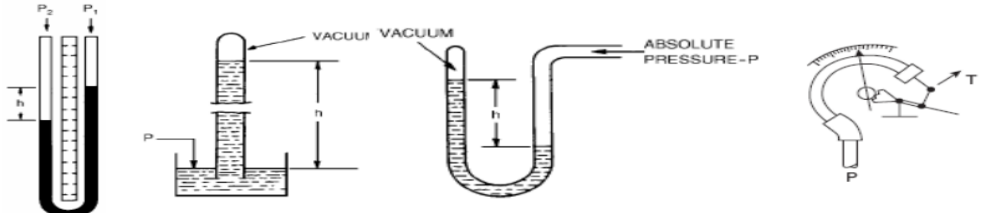
Fuente: Instrumentación electrónica moderna [13]

Existen diferentes sistemas para realizar las medidas de presión:

- Presión absoluta: mide respecto al cero absoluto de presión (A y A').
- Presión atmosférica: es la presión ejercida por la atmósfera terrestre.
- Presión relativa: es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica (B, B' y B'')
- Presión diferencial: es la diferencia entre dos presiones, (C y C').
- Vacío: es la diferencia de presiones entre la presión atmosférica existente y la presión absoluta, es decir, es la presión medida por debajo de la atmosférica (D, D' y D'').

Se hace una descripción corta de los diferentes tipos de sensores en la tabla 11
 Se determinó que para el banco de pruebas es conveniente que soporte condiciones de vibración generadas por la motobomba, por esta razón el equipo seleccionado es fiable ante esa condición.

Tabla 11. Especificaciones del sensor de temperatura MBT 3560

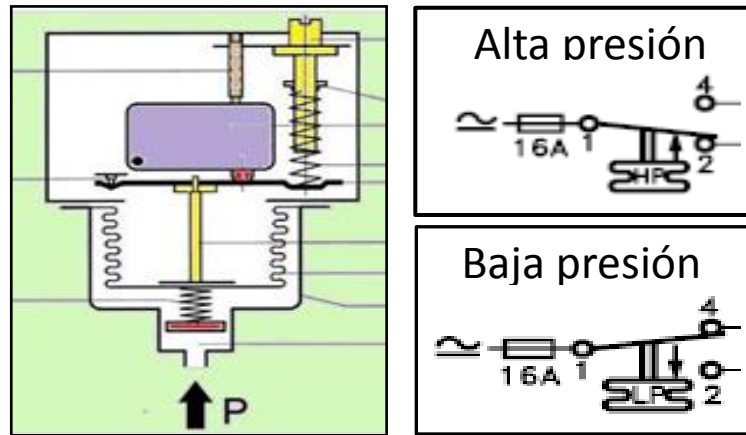
Tipos sensores de presión	
tipo	sistema
mecánicos	
	<p style="text-align: center;">De Medida Directa Elástico</p>

Tipos sensores de presión	
tipo	sistema
piezoeléctrico	
electromecánico	
neumático	

Fuente: instrumentación electrónica moderna [13]

3.2.3. Presostato. Este funciona como un conmutador por presión, que se acciona por la presión percibida. Su funcionamiento se basa en la presión que ejerce un fluido sobre un pistón de área muy precisa.

Figura 15. Presostato



Fuente: www.sensorstecnic.com [17]

En la figura 15 se observa como la presión ejercida es captada por el sistema fuelle resortado, y este acciona lo que usualmente se usan como conmutador (SPDT: Single pole, double throw) que es un relé que conmuta un polo común entre dos polos alternativos uno para el estado alto y otro para el estado bajo de presión.

3.2.4. Sensor de flujo. El banco de pruebas a través de un sensor de flujo mide el caudal generado, el cual realimenta el lazo de control de caudal, influyendo en la velocidad de la motobomba. Existen diferentes tipos de medidores de flujo:

Tabla 12. Tipos sensores de flujo

Tipos de sensores de flujo	
clases	Principio
Elementos Deprimógenos	Ecuación de Bernoulli
Flujometro Electromagnético	Ley de Faraday
Turbina y paleta rotativa	Pieza rodante que son impulsadas por el flujo del fluido

Tipos de sensores de flujo	
clases	Principio
Ultrasonido	Propagación de ondas de sonido en un fluido
Desplazamiento Positivo	Llenado de cámaras de tamaños conocidos
Rotámetros	Indicación Local
Flujometro másico	Coriolis y Másicos Térmicos.

Fuente: Sole Antonio Ceus [12]

Estos dispositivos tiene un costo elevado por este motivo se escoge el sensor de paleta rotativa, ya que el presupuesto del banco de pruebas es limitado y los sensores con mayor precisión tiene un costo muy elevado.

EL sensor de paleta rotativa es accesible y nos brinda la exactitud requerida para el proceso, su funcionamiento es simple donde las pulsaciones aumentan proporcional al caudal. El sensor con el que cuenta el banco de pruebas es el GF Signet 2536:

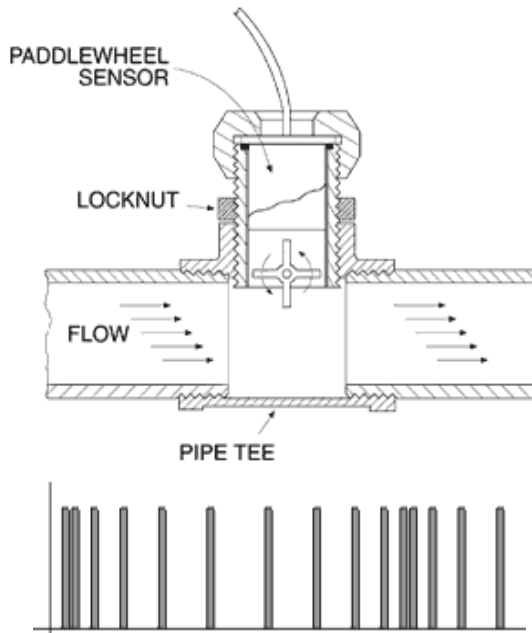
Tabla 13. Especificaciones del sensor de flujo GF Signet 2536

Especificaciones principales	
Rangos de medición	0,3 a 6 m/s (1 a 20 pies/s)
tipo de salida	Transistor de colector abierto, 10 mA máx.
Señales de salida	49 Hz por m/s nominal
voltaje de alimentación	3,3 a 24 VCC regulada
capacidad lineal	±1% de margen completo @ 25 °C
repetitividad	±0,5% de margen completo @ 25 °C
condiciones de trabajo	
Precisión de trabajo	1,7 bar (25 lb/pulgada ²) máx.
temperatura de trabajo	85 °C (185 °F)



Fuente: Signet 2536 Rotor-X Paddlewheel Flow Sensors [18]

Figura 16: sensor de flujo paleta rotativa principio de funcionamiento



Fuente: www.newport.ca [19]

3.3. ACTUADORES

Son los elementos que efectúan las acciones que generan los cambios en las condiciones de simulación del banco de pruebas, son elementos fiables que permitan obtener los rangos deseados para cada una de las variables y es un criterio muy importante para su selección la capacidad que tiene para mantener contacto con el fluido.

3.3.1. Motobomba. El banco de pruebas cuenta con un sistema de bombeo de circulación, el cual aporta presión al crudo, la selección de la bomba se hizo con agua en las líneas de circulación debido a que el crudo a circular tiene

características muy parecidas al agua, luego se realizó un factor de corrección para valorar el desempeño de la bomba para el crudo del CEC.

El banco de pruebas requiere una potencia hidráulica suministrada por la bomba para satisfacer las condiciones de operación de trabajo, esta se enuncia así:

$$P_A = H_A * \gamma * Q \quad (16)$$

Donde la potencia de la bomba en watts es P_A , la altura manométrica en metros H_A , el peso específico del fluido γ y el caudal en metros cúbicos por segundo Q .

Para hallar H_A se requiere utilizar la ecuación general de la energía [8], en la cual se relacionan las diversas formas de energía que se presentan en la trayectoria de un fluido, dicha ecuación es:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_A - H_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (17)$$

Donde $\frac{P_1}{\gamma}, \frac{P_2}{\gamma}$ es la energía debido a la presión, Z_1, Z_2 es la energía potencial y $\frac{V_1^2}{2g}, \frac{V_2^2}{2g}$ es la energía cinética, H_A es la energía se le adiciona al fluido por medio de un actuador mecánico como en este caso es la bomba, H_L es la perdida de carga del sistema debido a la fricción en tubería y accesorio del sistema. Según las condiciones del fluido en los puntos A y B respectivamente y evaluando las pérdidas de carga se encuentra la energía que añade la bomba al fluido es:

$$H_A = \left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right] + [Z_2 - Z_1] + \left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \right] + H_L \quad (18)$$

En el diseño crítico se analizó, el punto de operación de caudal máximo, donde las pérdidas de presión por fricción y accesorios son considerables, a continuación se establecen estas pérdidas.

Pérdidas de carga de energía del sistema

Esta pérdida de carga la compone el efecto de la tubería y accesorios, el término para definirla es H_L el cual se define como la pérdida de carga de energía del sistema.

$$H_L = Per_{Tub} + Per_{acc} \quad (19)$$

Donde Per_{Tub} son las pérdidas en la tubería y Per_{acc} es la pérdida por los accesorios en la tubería.

Las condiciones para el cálculo de pérdida de energía debido a la fricción en secciones rectilíneas en tubos cilíndricos, tanto para el flujo laminar como para el flujo turbulento se efectúa mediante la ecuación de Darcy que enuncia estas pérdidas en función del factor de fricción, la energía cinética y la relación entre la longitud y el diámetro [8], a continuación se presenta la ecuación:

$$H_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (20)$$

Donde f es el factor de fricción, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro de la tubería y $\frac{v^2}{2g}$ es la carga de velocidad, f depende de la actuación laminar o tubular del fluido, el número de Reynolds determina este factor de fricción f .

La naturaleza del fluido es definida por el número de Reynolds, la cual relaciona la fuerza de inercia respecto a la fuerza viscosa [7], el número de Reynolds se denota:

$$Re = \frac{Vm * D * \rho}{\mu} \quad (21)$$

Donde Vm es la velocidad media del fluido, D es el diámetro de la tubería, ρ es la densidad del fluido y μ la viscosidad dinámica. En la práctica el número de Reynolds menores a 2000 este será para un fluido laminar y un número de Reynolds superior a 4000, será turbulento.

En el flujo laminar el factor de fricción f depende inversamente del número de Reynolds [7], con la siguiente ecuación:

$$f_L = \frac{64}{Re} \quad (22)$$

Donde f_L es el factor de fricción del flujo laminar y Re es el número de Reynolds.

En flujo turbulento el factor de fricción depende de dos cantidades adimensionales, el Re y la rugosidad relativa de la tubería. Sabiendo que la rugosidad relativa es la relación entre el diámetro de la tubería y la rugosidad promedio ε [7].

$$\varepsilon_{relativa} = \frac{D}{\varepsilon} \quad (22)$$

Esta rugosidad depende entonces del tipo de material y el método de fabricación. En la tabla 14 se presentan algunos valores de rugosidad para tubos comerciales.

Otra forma utilizada es el diagrama de Moody, este diagrama muestra la gráfica de fricción f_l vs Re , con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa D/ε , en la intersección del Re y D/ε , como se muestra en la figura 17. Teniendo en cuenta las características de los fluidos, se selecciona una tubería sin soldadura de acero al carbono de ½ "A53-API5L-A106 SCH40.

Tabla 14. Rugosidad de tubos comerciales.

MATERIAL	RUGOSIDAD ε [M]
Plástico	3.0×10^{-7}
Tubo extruido	1.5×10^{-6}
Acero comercial o soldado	4.6×10^{-5}
Hierro Galvanizado	1.5×10^{-4}
Hierro dúctil recubierto	1.2×10^{-4}
Hierro dúctil no recubierto	2.4×10^{-4}

Fuente: Tomado del Libro Mott Robert L

Según la tabla 15 se muestra la viscosidad dinámica y cinética del agua que para este proyecto se usaron como referencia debido al comportamiento del crudo liviano de las muestras del CEC en unidades SI.

Tabla 15. Viscosidad dinámica y cinemática en unidades SI

TEMPERATURA T °C	VISCOSIDAD DINAMICA μ (N.s/m ²)x10 ⁻³	VISCOSIDAD CINEMATICA V(m ² /s)x10 ⁻⁶
0	1.787	1.787
5	1.519	1.519
10	1.307	1.307
20	1.002	1.004
30	0.798	0.801
40	0.653	0.658
50	0.547	0.553
60	0.467	0.475
70	0.404	0.413
80	0.355	0.365
90	0.315	0.326
100	0.282	0.29

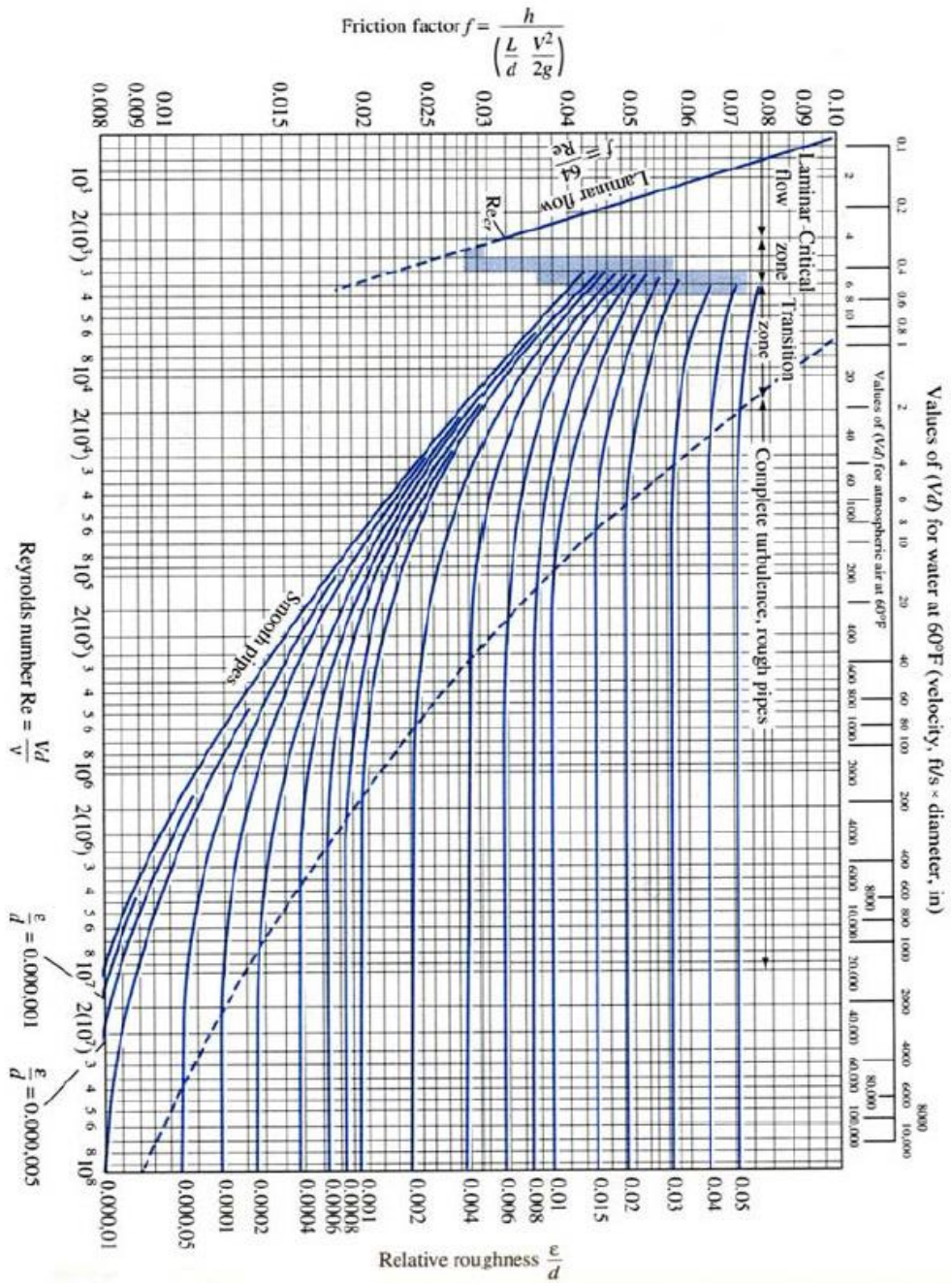
Fuente: Tomado del Libro Mott Robert L

$$Re = \frac{0.0127 \cdot 4,2 \cdot 998.2}{0.355 \times 10^{-3}} = 149983 \quad (23)$$

Como el flujo es turbulento, según la gráfica de Moody en la figura 17 se calcula el factor de fricción para una rugosidad de $4,6 \times 10^{-5}$ y un diámetro de tubería de **0,5** pulgada, se obtiene un factor de fricción de **0.017**.

Midiendo la distancia desde la salida del tanque de alimentación, hasta la entrada del tanque de resultados es de 3,89 [m] para el segmento de circulación del fluido de crudo. Utilizando la anterior información y usando la ecuación de Darcy se encuentra las pérdidas de tubería,

Figura 17. Curva del factor de fricción vs número de Reynolds y $\epsilon_{relativa}$



Fuente: Crane. Flujo de fluidos en válvulas accesorios y tubería [20]

$$H_{L-circulacion} = 0.017 * \frac{4.92}{0.0127} * \frac{4.2^2}{2*9.81} = 1.21 [m] \quad (24)$$

Calculo de pérdidas por accesorios de tubería.

La naturaleza del fluido en las curvas ha sido investigada completamente, ya sea en régimen laminar o turbulento, se establece con una condición conocida como flujo secundario. Este es un movimiento de rotación perpendicular al eje de la tubería, que se superpone al movimiento principal en la dirección del eje. La resistencia debida a la fricción de las paredes de la tubería y la acción con la fuerza centrífuga combinadas produce esta rotación y se calculó con la siguiente ecuación:

$$H_{rs} = \xi * \frac{v^2}{2 * g} \quad (25)$$

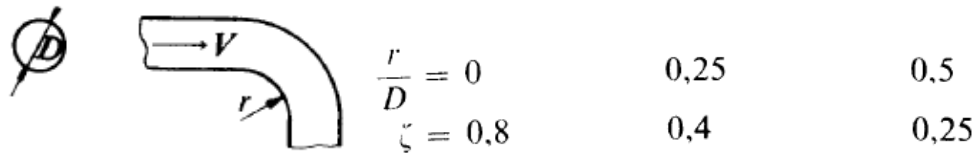
Dónde: H_{rs} Pérdida de carga secundaria.

ξ Coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria.

v Velocidad media de la tubería.

Calculo de pérdidas Codos

Figura 18. Coeficiente de pérdidas para codos



Fuente. Claudio Mataix, Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas [9]

Para está aplicación: $D = 12.7 \text{ mm}$ y $r = 3.18 \text{ mm}$ entonces:

$$\frac{r}{D} = 0.25 . \text{ Por lo tanto } \xi = 0.4$$






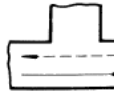

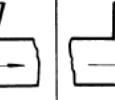
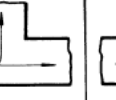
$$H_{rS} = 0.4 * \frac{4,2^2}{2*9,81} = 0,35(26)$$

Durante el recorrido de circulación del crudo debe vencer 9 codos, entonces:

$$H_{rS} = 9 * 0.35 = 3.15 \quad (27)$$

Calculo de pérdidas Tees

Figura 19. Coeficiente de pérdida para Tees

Figura					
ζ	0.5	1.0	1.5	3.0	0.05
Figura					
ζ	0,1	0,15	2,0	3,0	

Fuente. Claudio Mataix, Mecánica de Fluidos y máquinas hidráulicas [21]

Para este caso se tomó un $\xi = 2$

Entonces la pérdida por tees es de:

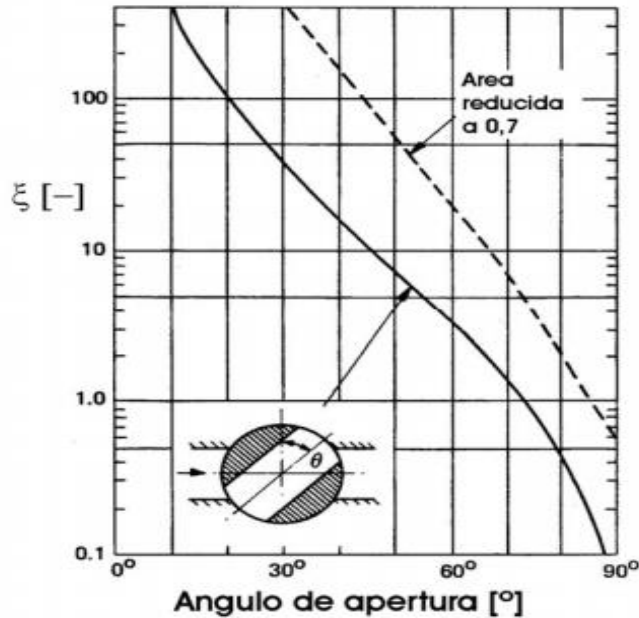
$$H_{rS} = 2 * \frac{4,2^2}{2*9,81} = 1,79 \quad (27)$$

Durante el recorrido de circulación del fluido se encuentra con 4 Tees, entonces:

$$H_{rS} = 4 * 1,79 = 7,16 \quad (28)$$

Calculo de pérdidas Válvula de bola

Figura 20. Válvula de globo con y sin reducción de diámetro respecto de la entrada. Coeficiente de pérdidas de carga en función del ángulo de apertura. 90°=abierta



Fuente: Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas, Claudio Mataix. [21]

Suponemos que la válvula está abierta en su totalidad entonces $\xi = 0.1$ aproximadamente entonces la pérdida de la válvula de globo es de:

$$H_{rs} = 0.1 * \frac{4,2^2}{2*9,81} = 0,09 \quad (29)$$

Con esta información se procede a realizar el cálculo de la altura manométrica de la bomba en el tramo de circulación, teniendo en cuenta las condiciones de energía en el punto A mínimas y las condiciones deseadas en la entrada en el tanque de resultados.

$$H_{A\ CIRCULACION} = H_{L-circulacion} + [0.76 - 0] + Per_{acc} \quad (30)$$

$$H_{A\ CIRCULACION} = 1.21 + 0.76 + 10.4 \quad (31)$$

$$H_{A\ CIRCULACION} = 12,37 \text{ [m]} \quad (32)$$

Con esta $H_{A\ CIRCULACION}$ estamos en la capacidad de estimar el valor tentativo de la potencia hidráulica necesaria de la bomba de alimentación del tramo de circulación que satisface las condiciones del sistema.

$$P_{A\ CIRCULACION} = 12,37 \times [998 \times 9.81] \times 0.000096 \quad (33)$$

$$P_{A\ CIRCULACION} = 11.6 \text{ [W]} = 0.0155558 \text{ [HP]} \quad (34)$$

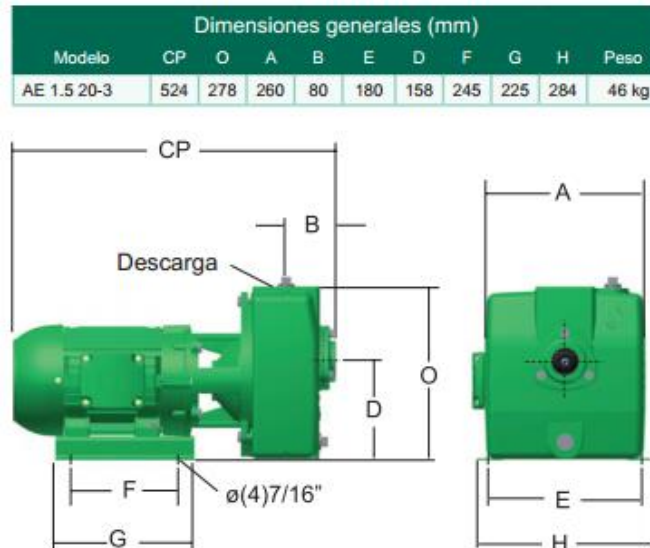
Si la eficiencia de la Bomba es de 85% entonces la potencia real de la Bomba es:

$$P_{REAL} = \frac{0.0155558}{0.85} = 0.018 \text{ [HP]}$$

La bomba seleccionada en este proyecto fue teniendo en cuenta las condiciones mencionadas en esta sección donde se determinaron las pérdidas de carga de energía del sistema por tubería y accesorios para el recorrido de circulación del fluido. Entre los fabricantes de bombas que se analizaron estuvieron IHM, Barnes y Pedrollo, debido a que se consiguen en el mercado local ofreciendo consigo garantía, desempeño y tradición en la industria, a continuación se presenta cada uno de los fabricantes que cumplen con las necesidades del proceso.

- Bomba Barnes

Figura 21. Modelo AE 1.5 20-3



Fuente: Catálogo Motobombas Barnes [22]

Tabla 16. Características Principales de la Motobomba AE 1.5 20-3

Características de la bomba	
Tipo de bomba	Centrífuga
Tipo de acoplamiento	Monobloque
Tipo de impulsor	Semiabierto balanceado dinámicamente (ISO G63)
Cantidad de impulsores	1
Tipo de cierre del eje	Sello mecánico 1 1/4" tipo 1
Temperatura max. del líquido	158°F (70°C) Continua

Modelo	Ref.	Succión	Descarga	Potencia (HP)	Fases	Amperaje		H max. (mca) *	Q max. (GPM) **
						220 V	440 V		
AE 1.5 20-3	1D0500	1 1/2"	1 1/2"	2,0	Trifásico	7,1	3,55	27	100

* La altura (H) máxima se logra con la válvula totalmente cerrada

** El caudal (Q) máximo se logra con la válvula totalmente abierta

Fuente: Catálogo Motobombas Barnes [22]

- **Motobomba IHM**

Figura 22. Modelo 40A-5.0MW-CIT44NS



Fuente: www.igihm.com [23]

Tabla 17 Características Principales Motobomba IHM

Modelo	40A-5.0MW-CIT44NS
Succión x Descarga	4"x3" NPT
Motor	Trifasico
Potencia	5 HP
Altura Dinámica a m³/h	50
Tensión de Alimentación	220/440
Costo (Peso colombiano)	2'045.300

Fuente: www.igihm.com [23]

- **Bomba PEDROLLO**

Figura 23 Motobomba Pedrollo CPm 620



Fuente: Catálogo Pedrollo Bombas Centrífugas [24]

Tabla 18: Características Principales Motobomba Pedrollo CPm 620

DATOS DE FUNCIONAMIENTO A $n=3450$ 1/min

MODELO BOMBA		POTENCIA		Q	H											
					m											
~	3~	kW	HP	m ³ /h	0	0.6	1.2	1.8	2.4	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4		
						l/s	0	0.167	0.333	0.500	0.667	0.833	1.000	1.167	1.333	1.500
				l/min	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
CPm 580	CP 580	0.30	0.40	H	17.5	15.5	14	12	10	7	4					
CPm 600	CP 600	0.37	0.50		21.5	20	19	17	15	12.5	9.5	6				
CPm 610X	CP 610X	0.60	0.85		30	28.5	27	25.5	23.5	21	17.5	14				
CPm 620	CP 620	0.75	1		35	34	33	31.5	29.5	27	24	20.5	17	13		
CPm 630	CP 630	1	1.35		45	43	41	39	37	35	32	29	25	21		

H = ALTURA MANOMETRICA TOTAL EN METROS. **Q** = CAUDAL

Fuente: Catálogo de Pedrollo Electrobombas Centrífugas [24]

Según la información recopilada y las cotizaciones suministradas por cada proveedor, la motobomba seleccionada para el banco de pruebas fue la Pedrollo

CPm 620 debido a su costo de \$ 460.000 y también porque su potencia es de solo 1 HP siendo así la potencia más baja en las tres motobombas trifásicas cotizadas ya que en esta aplicación se requiere una potencia baja.

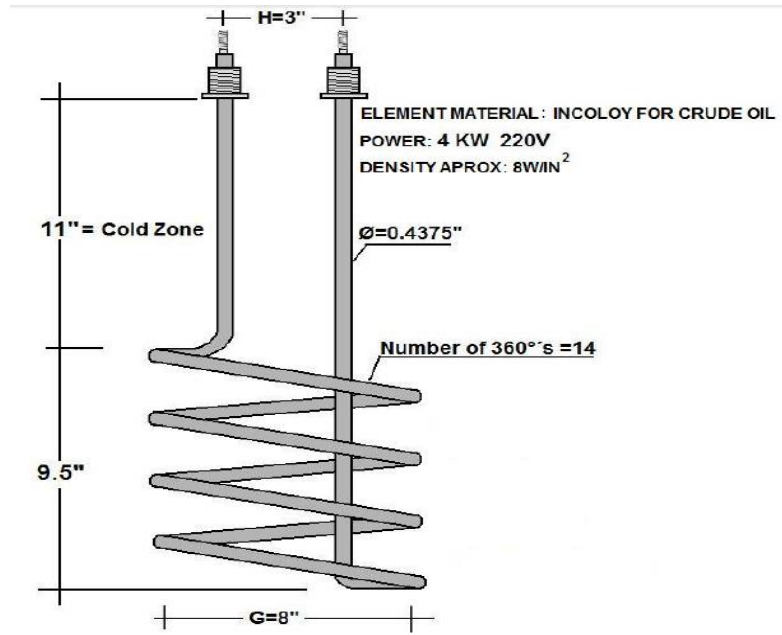
3.3.2. Resistencia de calentamiento. En esta aplicación se diseñó una resistencia en espiral de inmersión en el tanque de almacenamiento TK1 debido a que son ideales para el calentamiento directo en líquidos, incluyendo aceites y soluciones de transferencia de calor. Su forma de espiral permite una mayor área de transferencia de calor permitiendo que el crudo aumente su temperatura rápidamente.

El material seleccionado para la resistencia es Incoloy para crudo, óptimo por sus características de resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión en ambientes ácidos, resistencia en atmosferas que contienen sulfuro, resistencia a la oxidación y a la carbonización en ambientes de altas temperaturas. El acoplamiento de la resistencia eléctrica al tanque de almacenamiento se realiza mediante tapón roscado.

La potencia generada es de 4 [KW] a una tensión de 220[V]. En la Figura 25 muestra claramente las dimensiones de la resistencia eléctrica de calentamiento.

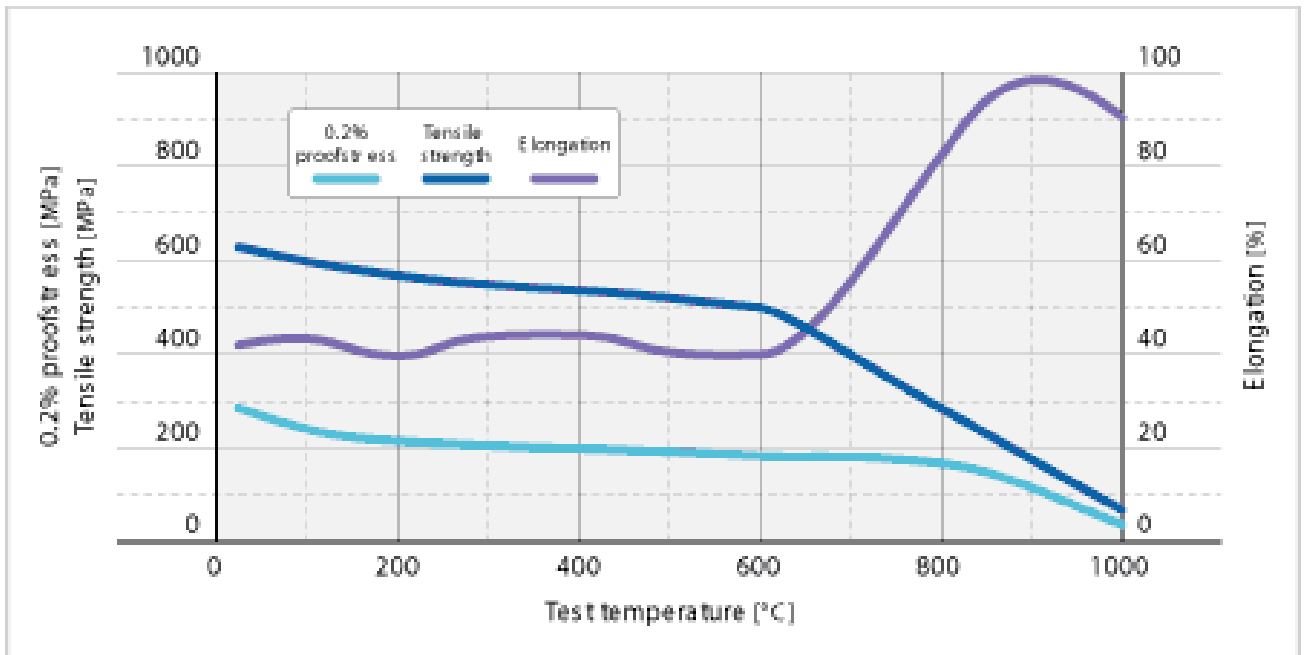
Este material Incoloy o súper-aleaciones están hechas con base de níquel, y tienen características que incluyen gran resistencia a la corrosión en ambientes acuosos, excelente fuerza y resistencia a la oxidación en altas temperaturas, y facilidad para hacer fabricaciones.

Figura 24: Resistencia Eléctrica de Calentamiento



Fuente: Urbina Ltda.

Figura 25: comportamiento del Incoloy



Fuente: Urbina Ltda

En la anterior observamos el comportamiento del material a diversos factores ambientales. Las cualidades del material se encuentran en la tabla 19.

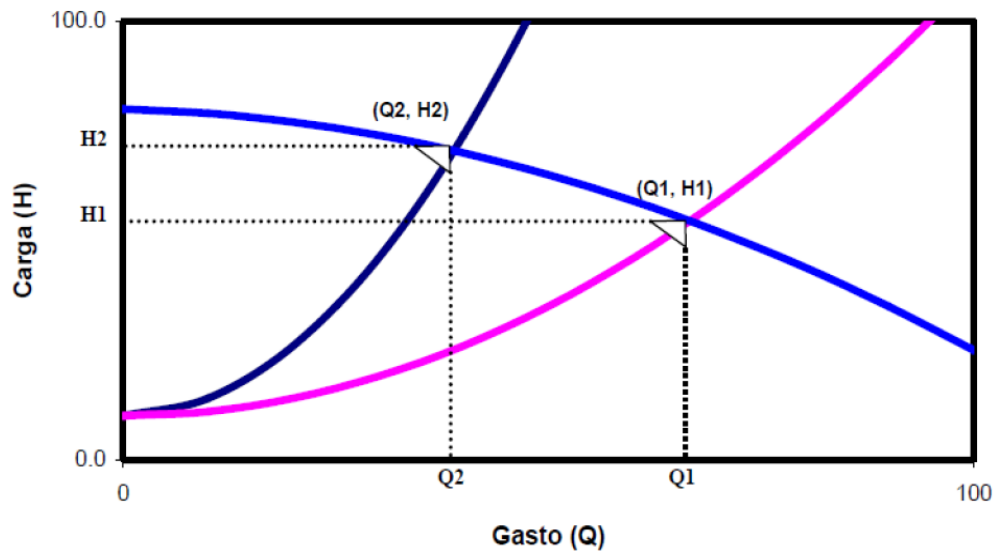
Tabla 19. Propiedades del material Incoloy

<u>MATERIAL CERTIFICATION</u>					
HEAT NUMBER: 971764			ALLOY: 316		
MELTER: ALLEGHENY					
<u>CHEMICAL ANALYSIS</u>					
C:	MN:	P:	S:	SI:	CR:
.014	1.2	.03	.0002	.5	16.1
MO:	CU:	TI:	CO:	AL:	NI:
2.05	.34		.44		10.1
<u>MECHANICAL PROPERTIES AND TEST</u>					
TENSILE PSI:	YIELD PSI:	% ELONGATION:		ROCKWELL HARDNESS	
100000	50500	53		86	

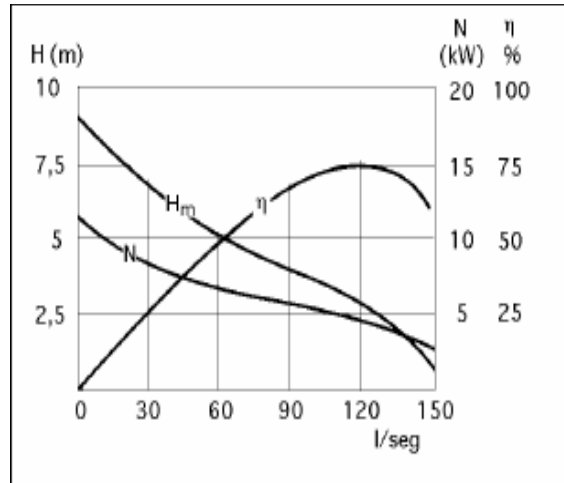
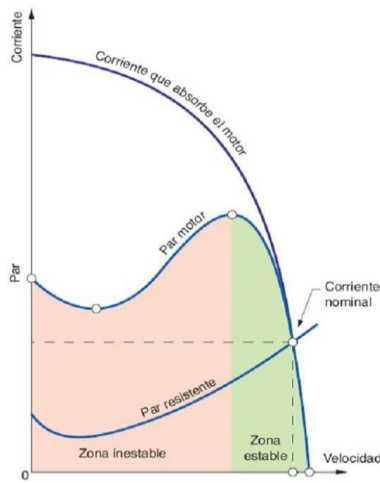
Fuente: Urbina Ltda

3.3.3. Válvula de globo. Este dispositivo contribuye al control de caudal del banco de pruebas, permite manipular la presión en las tuberías graduando el paso de fluido, lo que conlleva que a la motobomba trabaje a condiciones más cercanas a sus nominales para generar el mismo caudal [12], el trabajo de los motores de alterna es deficiente a bajas frecuencias y condiciones de torque no nominal, al generar una mayor presión en la columna de líquido que el motor mueve, genera mayor esfuerzo para obtener el mismo caudal, esto beneficia al motor como se observa en su curva de comportamiento característico en frecuencia. En la figura 26 se puede ver la curva característica par motor, corriente y par resistente, donde se señala cual es la zona más estable para su trabajo.

Figura 26. Comportamiento de un motor según su par y su eficiencia



— Curva 2 — Curva 1 — Bomba

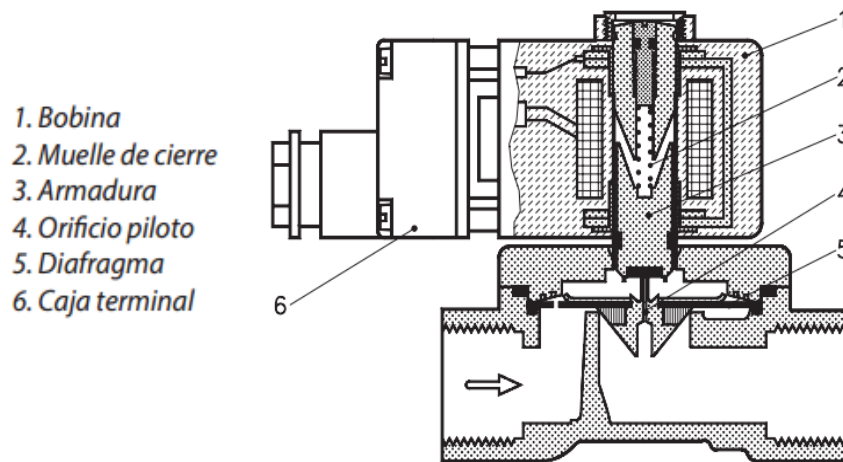


Fuente: diseño de un módulo didáctico para la asignatura instrumentación electrónica [25]. <http://www.flowserve.com/>

Se selecciona una válvula tipo globo, porque tiene una buena linealidad debido a las demás válvulas, y se encuentra aplicadas en muchas áreas de trabajo. La

válvula seleccionada es válvula solenoide proporcional EV260B DANFOSS, que es una línea bien posicionada en el mercado industrial y con mucha confiabilidad.

Figura 27. Cuerpo válvula de globo



Fuente: Válvulas solenoides proporcionales servo accionadas de 2 vías Tipo EV260B [26].

Tabla 20. Especificaciones de la válvula de globo con servo acción EV260B

Especificaciones principales		
Max temperatura ambiente	50 °C	
señal piloto	4 – 20 mA	0 – 10 V cc
presión diferencial	0,5 - 10 bar	
voltaje de alimentación	21 a 30 V	
viscosidad	50 cSt, máx.	
temperatura medio	-10 °C	80 °C
cuerpo de la válvula	Latón	
tubo de la válvula	Acero inoxidable	
muelle	Acero inoxidable	
vástago	Acero inoxidable	
Se cierra en caso de fallo del suministro eléctrico		

La fotografía muestra la válvula EV260B Danfoss, que tiene un cuerpo de latón y un tubo de acero inoxidable. El solenoide es de color azul y está conectado a un cable gris. El logotipo de Danfoss es visible en el cuerpo de la válvula.

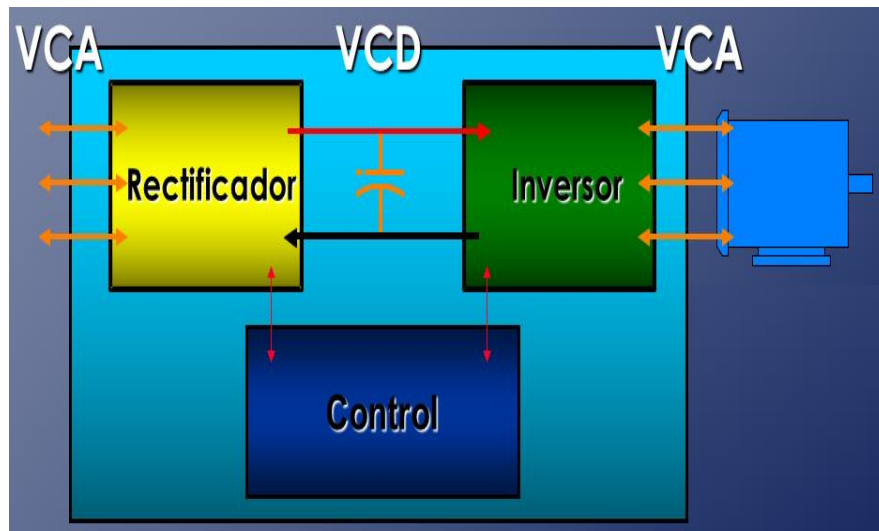
Fuente: Válvulas solenoides proporcionales servo accionadas de 2 vías Tipo EV260B [26].

3.4. PRE-ACTUADORES

Estos se acoplan a la estructura como intérpretes del control, son importantes para la simulación de las condiciones ambientales, porque proveen a los actuadores de la potencia que necesita con la regulación determinada por el control.

3.4.1. Variador de velocidad. Son el dispositivo más usado en la industria para realizar control sobre los sistemas motorizados, tiene la capacidad ajustar la velocidad de un motor variando sus condiciones en la alimentación, también realiza arranques suaves, control de torque etc., por estas razones el banco de pruebas tiene como elemento de control principal un variador de velocidad. Para seleccionar el variador de velocidad se tuvo presente las características del motor: tipo de motor, potencia, tensión de alimentación y corriente nominal.

Figura 28. Esquema de bloques de un variador de velocidad



Fuente: presentación DANFOSS variadores de velocidad

El banco de pruebas cuenta con un variador de frecuencia VLT FC 51 que es una gama económica que ofrece DANFOSS (reconocido por su sistema amigable y

fácil programación), que cumple con los requisitos para la simulación del caudal. El FC 51 es un dispositivo compacto y muy versátil con capacidad de carga de 1 [Hp], su panel de visualización y sistema de navegación es muy eficiente y practico.

Tabla 21. Especificaciones VLT FC 51

Especificaciones principales		
Tensión de alimentación	1X200-240V	
	3X200-240V	
	3X380-480V	
Frecuencia de alimentación	50/60 Hz	
Factor de potencia	(>0,98)	
Tensión de salida	0 - 100% de la tensión de alimentación	
Frecuencia de salida	0-200 Hz	
Entradas y salidas		
Entradas digitales	5	24 V
Entradas de pulsos	1	20 - 5000 Hz
Entradas análogas	2	0-10 V o 4 - 20 mA
Salidas análogas	1	0-10 V o 4 - 20 mA
Comunicación		
Bus de campo	Protocolo FC	Modbus RTU
Ambiente		
Max tmp ambiente	50 ° C	
Media de tmp	40 ° C	
Protección	IP 20	



Fuente: VLT micro drive, FC 51. DANFOSS [27]


3.4.2. Relevador de estado sólido. Para manejar la temperatura generada por la resistencia de calentamiento se usa un relevador de estado sólido, que controla la corriente que es inyectada a la resistencia para obtener la temperatura deseada.

Estos elementos son los más usados en la industria para el calentamiento de resistencias en sistemas térmicos por corriente.

La marca WALTON es reconocida a nivel mundial por sus elementos para el accionamiento y control de sistemas térmicos, son equipos fiables, lo que inclinó la selección del DIN-A-MITE B como el dispositivo elevador de corriente. En la tabla 22 se presentan algunas de las características principales de este dispositivo.

Tabla 22. Especificaciones técnicas DIN-A-MITE B DB10-24C0-0200

Especificaciones principales	
Max. corriente de fuente	16.6ms, 380A pico
señal piloto	4.5 a 32 V DC
disipación	1.2 watts por A por línea
voltaje de línea	120 a 240 V
temperatura medio	-40 a 85 °C
Alarma de salida	80 °C
salida de alarma e indicador LED	
entrada de control e indicador LED	



Fuente: DIN-A-MITE Style B User's Manual [28]

3.5. CONTROLADOR

En el controlador se caracteriza, programa y parametriza el comportamiento y la operación del banco de pruebas. Es el encargado de la gestión los datos enviados por los equipos de periferia (transmisores y pre-actuadores) para determinar la acción que mantendrá las condiciones operativas del banco.

Su importancia radica en facilitar las condiciones seguras y prácticas de trabajo, que permitan eliminar riesgos en la operación de banco de pruebas mientras vigilan y controlan las condiciones de trabajo.

3.5.1. PLC. El controlador lógico programable (PLC programmable logic controller) es hoy en día el equipo electrónico robusto de control más usado en la industria para los procesos automáticos, diseñado para trabajar en ambientes industriales, procesos secuenciales las 24 horas del día.


El PLC se usa fundamentalmente en aquellas instalaciones en donde es necesario un proceso de maniobra, control y señalización, por sus reducidas dimensiones, la extremada facilidad de su montaje, la posibilidad de programar, rapidez de trabajo y autosuficiencia fue seleccionado como maestro del banco de pruebas.

En la selección de controlador se tuvieron en cuenta dos marcas: SIEMENS y ALLAN BRADY.

A pesar de que los productos de otras marcas (SIEMENS SCHNEIDER MITSUBISHI etc) son usados en todo tipo de industrias, ALLAN BRADY es una de las marcas mejor posicionadas en la industria petróleo por su robustez¹⁷ y lo especializado de sus bloques lógicos programables para este tipo de industria. Por este motivo se escoge para el banco de pruebas el PLC

¹⁷ Robustez: nos referimos a la capacidad y proceso de reacción apropiada ante condiciones de esfuerzo de hardware y software.

Tabla 23. Especificaciones técnicas S7 1211 C

La CPU compacta 1211C	
3 variantes con distintas tensiones de alimentación y mando.	
Fuente de alimentación integrada, a elegir con entrada de corriente alterna de rango amplio (85. 264 V AC o 24 V DC).	
Fuente de alimentación integrada de 24 V para sensores/carga: Permite conectar directamente sensores y encóders. Con una intensidad de salida de 300 mA también sirve para alimentar la carga.	
6 entradas digitales integradas de 24 V DC (sumidero/fuente (IEC tipo 1, sumidero)).	
4 salidas digitales integradas, a elegir entre 24 V DC o relé.	
2 entradas analógicas integradas 0 ... 10 V.	
2 salidas de impulsos (PTO) con una frecuencia hasta de 100 kHz.	
Salidas con modulación de ancho de impulsos (PWM) con una frecuencia hasta de 100 kHz.	
Interfaz Ethernet integrada (TCP/IP nativa, ISO-on-TCP)	
3 contadores rápidos (100 kHz), con entrada parametrizable para habilitación y reset; pueden funcionar simultáneamente como contadores hacia adelante y hacia atrás con entradas separadas o para conectar encóders incrementales.	
Ampliación con interfaces de comunicación	

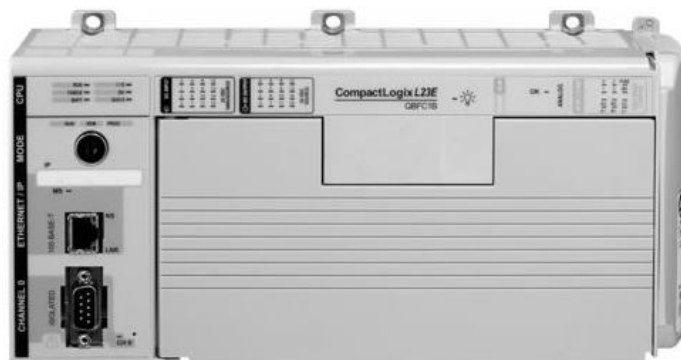
La CPU compacta 1211C	
adicionales, p. ej., RS485 o RS232.	
Ampliación con señales analógicas o digitales directamente en la CPU mediante Signal Board (respetando la dimensión de montaje de la CPU).	
Ampliación opcional de la memoria (SIMATIC Memory Card).	
Regulador PID con funcionalidad de autoajuste.	
Reloj de tiempo real integrado.	
Entradas de alarma	
Bornes desmontables en todos los módulos.	
Simulador (opcional)	
Con 10 entradas/salidas integradas	
Ampliable con:	

Fuente: catálogo SIMATIC S7-1200 [29]

Tabla 24. Especificaciones técnicas compactlogix 1769

Controladores CompactLogix 1769	
Aplicación de controlador	Para uso general
Tareas del controlador	32; 100 programas/tarea
Tareas de evento	Tag consumido, instrucción EVENT, E/S remotas, eje y activadores de eventos de movimiento
Característica	1769-L30ER
Memoria disponible para el usuario	1 MB

Tarjeta de memoria	1784-SD1 (1 GB)
Puertos de comunicación	1 EtherNet/IP
Entradas y salidas digitales	16DI
	16DO
Entradas analogas	4AI
Salidas analogas	2AO
Entrada de salida rapida	6HSC
Capacidad de expansión de módulo	8 módulos 1769
	1 banco de módulos
Clasificación de distancia respecto a la fuente de alimentación eléctrica	4 módulos
Fuente de alimentación eléctrica	1769-PA2, 1769-PB2, 1769-PA4, 1769-PB4



Fuente: CompactLogix Controllers Specifications [30]


3.6. INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (HMI)

Esta permite la interacción entre el operador y el banco de pruebas, es fundamental para la operación porque a través de él se escriben las condiciones de trabajo que se quieren simular.

3.6.1. Panel de visualización. Para que este equipo tuviera el impacto requerido, se seleccionó una pantalla que fuera a color, referencia ALLAN BRADLEY ya que el controlador y el HMI deben ser de la misma marca para facilitar la comunicación entre los equipos. Se seleccionó un panelview C 600, un panel cromático.

Tabla 25. Especificaciones panel C600

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO	
PanelView C600	2711C-T6C
Tamaño	5.7 pulg (115 x 86 mm)
Resolución	320 x 240 pixeles
Tipo	Transmisiva a color CSTN
Entrada de operador	Táctil analógica
Puerto de comunicación	RS422/RS485 (conector), Ethernet
Puerto de programación	Puerto de dispositivo USB; Ethernet también admite programación
Requisitos de alimentación eléctrica	18...30 VCC
Temperatura de funcionamiento	0...50 °C



Fuente: Terminales HMI PanelView [31]

3.7. COMUNICACIÓN

Para que algunos de los elementos del banco de pruebas puedan compartir datos por bus de campo es necesario de un equipo que haga la gestión de la comunicación.

3.7.1. ADAM-4520 conversor RS232-485. Es un dispositivo que permite la comunicación Modbus, es un conversor de RS 485 a RS232

Tabla 26. Especificaciones ADAM-4520/4522


Especificaciones ADAM-4520/4522	
General	
Conectores	1 x plug-in bloque terminal
	(#14 ~ 22 AWG)
	(RS-422/485)
	1 x DB9-F (RS-232)
Tensión de alimentación	10 ~ 30 VDC
Voltaje de aislamiento	3,000 VDC (ADAM-4520)
Comunicación serial	
Entrada	RS-232 (4-wire)
Salida	RS-485 (2-wire) or RS-422 (4-wire)
Modos de velocidad(bps)	1,200, 2,400, 4,800, 9,600, 19.2 k, 38.4 k, 57.6 k, 115.2 k, RTS control y RS-422 (switchable)



Fuente: ADAM-4520/4522/RS-232 to RS-422/485 Converter [32]

3.7.2. Swicth Ethernet. Un conmutador o switch es un dispositivo digital lógico para interconectar equipos que operar en segmentos de red para mantener la estructura y las características de la red, permitiendo interacción entre ellos.

Tabla 27. Especificaciones ADAM-4520/4522

Switches no administrados Ethernet Stratix 2000		
Características	Interruptor Ethernet ideal para redes pequeñas y aisladas	
	Autonegociacion de ajustes de velocidad y duplex	
	Opera con alimentación eléctrica de 20 VCA o 24 VCC	
	Detección automática de cruce de cables	

Fuente: Stratix 2000 Ethernet Unmanaged switches [33]

4. LÓGICA DE CONTROL Y SHUTDOWN

4.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

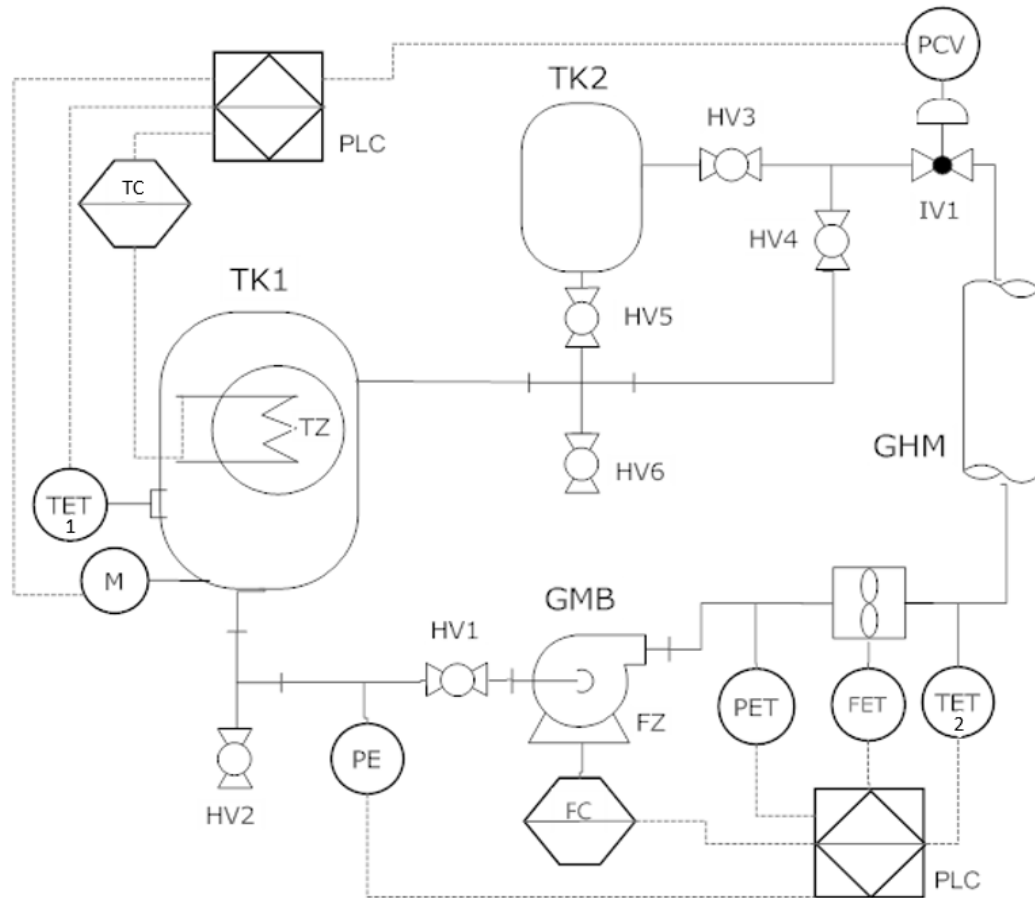
Simula las condiciones de extracción de los pozos de campo escuela colorado, sus rangos de operación son: temperatura 0 a 75°C, caudal de 0 a 300 [BOPD] y manifiesta presiones hasta 40 [Psi]; cuenta con la capacidad de controlar las condiciones de temperatura con una resistencia térmica y generar caudales variables con una motobomba, los elementos de control de primer nivel son: caudal con un variador de velocidad y una válvula de globo con control proporcional, temperatura un relevador de estado sólido. Para medir las condiciones del banco se cuenta con 2 sensores de temperatura ubicados de manera estratégica para obtener los datos más importantes para los estudios, sensor de presión y un sensor de flujo; además como instrumento para protección de condiciones inseguras tenemos un presostato.

Componentes

- TET-1/TET-2: sensores de temperatura
- PE: presostato
- HV-1/ HV-2/ HV-3/ HV-4/ HV-5/ HV-6: válvulas manuales
- IV-1_PCV: válvula de globo con control proporcional
- TZ: resistencia de calentamiento
- TK1/TK2: tanques
- GMB: motobomba
- GHM: herramienta magnética
- FC: variador de velocidad
- PET: sensor de presión

- FET: sensor de flujo
- TC: relevador de estado solido

Figura 29: P&ID



4.2. DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN

El hidrocarburo es ingresado TK1 a través de un embudo por el agujero de desgasificación, se cuenta con una capacidad de carga de 15 [L] para hidrocarburos ligeros; en este tanque se realiza el calentamiento que es efectuado por TZ que es una resistencia con capacidad de 400 [W], aquí mismo se mide la temperatura con TET-1 y se vigilan las condiciones de nivel del tanque con PE que

se abre al detectar niveles de presión bajos en la columna de fluido, protegiendo de condiciones inseguras para la operación a TZ y GMB.

El caudal de este banco es accionado por GMB que es regulado por FC e PCV para obtener los rangos de simulación de las líneas de extracción en campo. GMB capta el crudo de TK1 y lo entrega a un lazo de tubería donde se miden las condiciones de caudal temperatura y presión. En este se encuentra PET que vigila las condiciones de presión después de GMB para reconocer situaciones inseguras, TET-2 actúa como referencia para el proceso de calentamiento en TK1 realizado por TZ regulado por TC, y FET actúa como referencia de realimentación para la generación del caudal.

El crudo entregado por GMB es afectado por GHM con la finalidad de modificar sus características reológicas y luego es almacenado en TK2 para realizar estudios posteriormente.

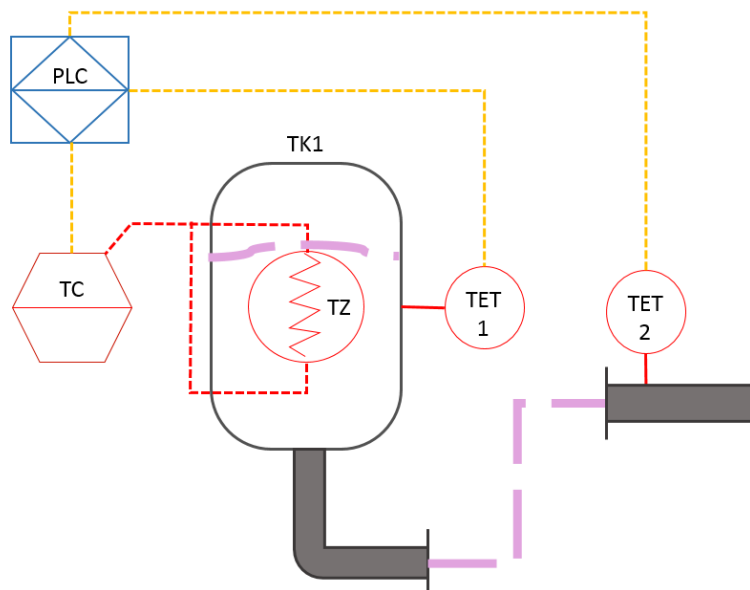
El banco de pruebas es atendido por un operador y cuenta con un sistema de control automático basado en un PLC que está programado con la lógica para efectuar lo anteriormente explicado además prevenir y alarmar condiciones inseguras, las señales son supervisadas en el HMI como ayuda para el operador.

El banco de pruebas cuenta con un botón tipo hongo rotativo de parada de emergencia ubicado en el tablero de control que determinara una parada crítica.

4.3. DESCRIPCIÓN DE LOS LAZOS

4.3.1. Lazos de temperatura. Los sensores de temperatura TET-1 y TET- 2 transmiten en ubicaciones diferentes del banco de pruebas, con las señales que ellos envía se decide la acción de control que se efectúa en TK1 por TZ. Se usa TET-1 como referencia para obtener la temperatura más cercana al proceso realizado por GHM.

Figura 30: Lazos de temperatura



A. TET-1 a HMI:

- Entrada Señal de temperatura en corriente 4 a 20 [mA]
- Salida visualización en HMI
- Compara con valor de sobrecalentamiento
- Compara con Setpoint¹⁸

¹⁸ Set point: punto de consigna y es el valor que busca un sistema.

- Compara con la media de TET-2.

La operación consiste en:

- obtener la medida de temperatura para visualizarla en el HMI para que el operador conozca las condiciones del sistema.

B. TET-2 a TZ:

- Entrada Señal de temperatura en corriente 4 a 20 [mA]
- Salida para regular acción de TZ a través de TC
- Setpoint de temperatura entrada HMI
- Salida visualización en HMI
- Comparar con Setpoint de temperatura
- Compara con valor de sobrecalentamiento

La operación consiste en:

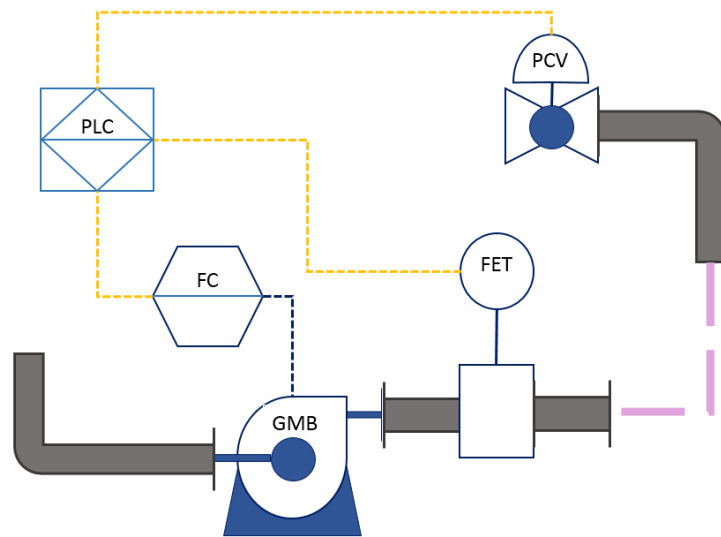
- Obtiene la medida para compararla con el setpoint de temperatura escrito por HMI
- Obtener la medida de temperatura para visualizarla en el HMI para que el operador conozca las condiciones del sistema en el lazo.
- Realizar paradas por sobrecalentamiento

4.3.2. Control y shutdown de temperatura. Se tienen un control de temperatura regulado por un controlador clásico PI que toma como referencia el setpoint y genera como salida una señal reguladora que a través de TC actúa en TZ calentando el crudo, se tiene criterios de sobrecalentamiento para proteger algunos de los instrumentos del equipo.

Emite una señal de shutdown¹⁹ por sobrecalentamiento, esta deshabilita la acción de TZ en el crudo inhibiendo la salida del controlador hasta que la señal medida en TET-1 sea igual a setpoint temperatura, también se deshabilita el lazo de control cuando PE detecta baja presión.

4.3.3. Lazos de caudal. El sensor de flujo FET transmite ubicado después de GMB esto asegura las condiciones de caudal para efectuar la acción de GHM, con las señal que él envía se decide la acción de control que se efectúa por FC, PCV y GMB. PCV actúa como un respaldo que permite trabajar con GMB en las condiciones donde los cambios de frecuencia sean más notorios.

Figura 31: lazos de caudal



A. FET a FC:

- Entrada Señal caudal por generación de pulsos en colector abierto
- Salida visualización en HMI
- Compara con setpoint

¹⁹ Shutdown: operación de cierre o bloqueo.

- Señal de salida para FC
- Señal de referencia de velocidad de FC

La operación consiste en:

- Obtiene la medida del caudal generado por GMB, compara con setpoint y realiza cambios en la salida del controlador.
- Obtiene referencia de FC y regula la salida del controlador

B. FET a PCV:

- Entrada Señal caudal por generación de pulsos en colector abierto
- Salida apertura porcentual para PCV
- Salida visualización en HMI de la apertura de la PCV

La operación consiste en:

- Obtiene la medida del caudal generado por GMB, compara con setpoint y realiza cambios en la apertura de la válvula para manipular las presiones de línea.

4.3.4. Control y shutdown de caudal. Se tienen un control de caudal regulado por 2 controladores clásico PI que toma como referencia el setpoint de caudal y genera como salida dos señales reguladoras: FC actúa cambiando la velocidad en GMB modificando el caudal para mantenerlo en los rangos de simulación, en PCV aumenta la presión en la línea para optimizar el efecto de la variación de frecuencia en GMB.

Este lazo entra en shutdown por sobrepresión detectada en PET o por baja presión vigilada por PE, si se detecta una sobrepresión el sistema efectúa una rampa de desaceleración para GMB y lleva la apertura de PCV a 100, esta acción lleva el caudal del banco a 0. Si se detecta una baja presión en PE se desacelera GMB para evitar cavitación.

4.3.5. Lazos de presión. El sensor de presión PET mide después de GMB y PE vigila la presión antes de GMB, aseguran condiciones del sistema seguras para el operador y los instrumentos.

A. PET a PLC:

- Entrada Señal de presión en corriente 4 a 20 [mA]
- Salida visualización en HMI
- Compara con criterio de sobrepresión del sistema
- Salida de shutdown sobrepresión del sistema

La operación consiste en:

- Obtiene la medida de la presión generada por GMB, compara con criterio de sobrepresión y valida la salida de shutdown.
- Obtiene la medida de la presión y la visualiza en pantalla

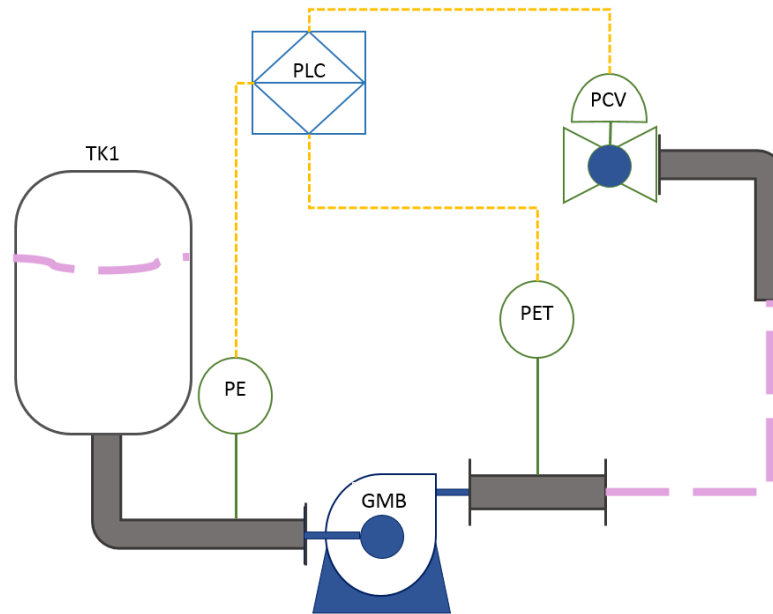
B. PE a PLC:

- Entrada Señal de presión 0 o 24 [v]
- Salida de shutdown por baja presión

La operación consiste en:

- Mientras el nivel del crudo en el tanque mantenga a PE activo, no se emite la señal de shutdown que no permite el arranque del sistema o deshabilita su uso.

Figura 32: Lazos de presión



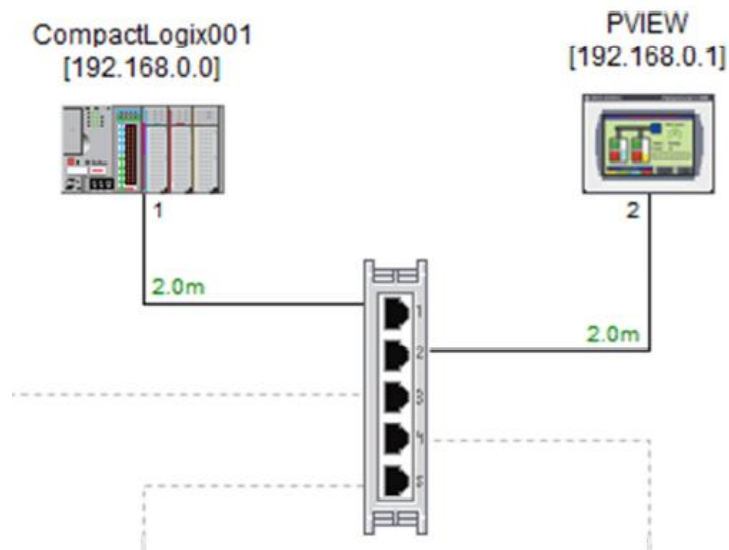
4.3.6. Control y shutdown de presión. Se usan estos lazos como protecciones a bajo nivel y a altas presiones. Estos lazos entran en shutdown por sobrepresión detectada en PET o por baja presión vigilada por PE, si se detecta una sobrepresión el sistema efectúa una rampa de desaceleración para GMB y lleva la apertura de PCV a 100, esta acción lleva el caudal del banco a 0. Si se detecta una baja presión en PE se desacelera GMB para evitar cavitación. Las señales de shutdown por presión son consideradas como des-habilitadoras de arranque.

5. SOFTWARE Y PROGRAMACIÓN

Este capítulo trata el software del banco de pruebas, que es el encargado de implementar la lógica y mantener autónomos los procesos y acciones que simulan las condiciones de fondo de pozo y extracción.

Para el desarrollo del software se consideró la arquitectura del hardware, fue indispensable establecer qué tipo de red se iba a utilizar para comunicarse con el controlador y la arquitectura de esta. En la figura 33 se presenta la estructura de la red Ethernet del banco de pruebas.

Figura 33. Arquitectura de la red Ethernet



Fuente: Proctek Ltda

Entonces para desarrollar la aplicación en el software es importante conocer sobre las herramientas que nos brinda ALLAN BRADLEY para realizar la programación de cada uno de los dispositivos usados. En los siguientes sub-índices se hace una

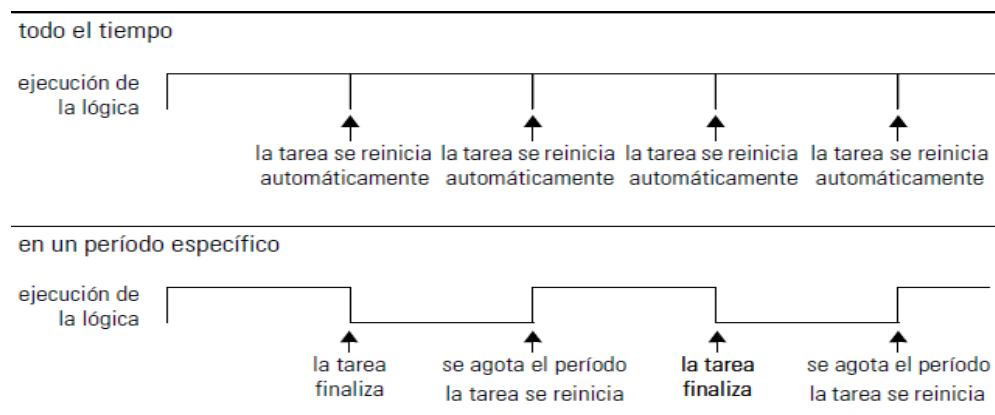
explicación breve de los programas y al tiempo se explicará sobre la programación que se realizó para el trabajo del banco de pruebas

5.1. RSLOGIX5000

“El RSLogix 5000 está diseñado para programar controladores de la familia Logix 5000 y para la plataforma logix de Rockwell Automation. Utiliza varios tipos de lenguaje de programación como Escalera, Bloques de funciones, texto estructurado y esquemas de funciones secuenciales [34]”.

Para la programación del controlador contamos con una herramienta que nos permite configurar las salida y entradas (digitales, análogas y de alta frecuencia) del PLC, genera señales internas, utilizar contadores, timers²⁰, secuencias primarias, secuencias de error, etc. Fácil de usar, simple y cumple con las necesidades del usuario.

Figura 34. Ciclos posibles para la ejecución de una rutina



Fuente: Guía de inicio rápido para controladores Logix5000 [35]

²⁰ Timers: señales de reloj, son ciclos de tiempo configurables

entero, valor de punto flotante (coma flotante), cadena, etc. En la figura 36 se explica cómo se estructuran los datos.

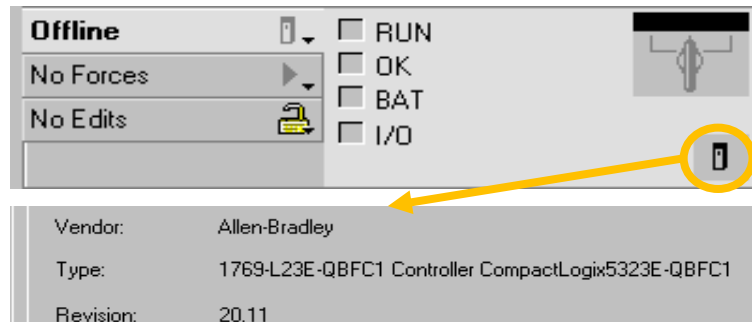
Figura 36. Estructura para los tipos de datos

Data Type	Description
NIL	Null pointer
BOOL	Bits
BYTE	Bytes (8 bits)
CHAR	Characters (8 bits)
WORD	Words (16 bits)
INT	Integers (16 bits)
DWORD	Words (32 bits)
DINT	Double integers (32 bits)
REAL	Floating-point numbers (32 bits)

Fuente: siemens automation

Una vez asignados los tags, se configuro el controlador donde se selecciona el tamaño de chasis²² y el número de slot²³.

Figura 37. Configuración del tipo de controlador



Fuente: Rockwell automation

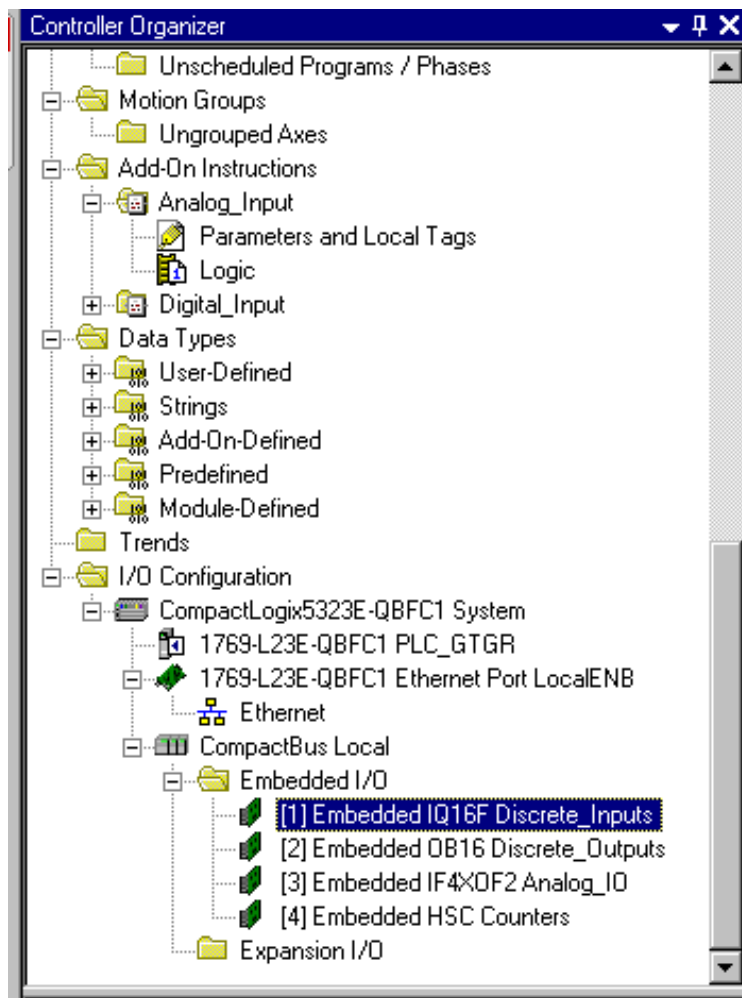
Seguido a esto se configuraron los módulos de entradas y salidas del PLC, el controlador 1769-L23E-QBFC1 seleccionado en el banco de pruebas posee

²² Chasis: tipo de controlador, referencia adquirida

²³ Slot : número de ranuras

embebido 4 módulos que son: un módulo de 16 entradas digitales, otro módulo de 16 salidas digitales, un tercer módulo de 4 entradas y 2 salidas analógicas, y por ultimo un módulo de contadores rápidos. También posee un puerto de comunicación Ethernet para redes TCP/IP y un puerto para comunicación serial.

Figura 38. Módulos de entradas y salidas del controlador 1769-L23E-QBFC1



6. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó el banco de pruebas con conocimientos multidisciplinarios logrando así unirlos e implementarlos para obtener un mejor resultado y cumpliendo con las condiciones requeridas para la investigación de inhibición de Parafinas de los pozos del CEC.
- Se diseñó un banco de pruebas que a través del accionamiento y medición de diferentes tipos de equipos electrónicos que permite simula las condiciones del crudo en la cara de formación del pozo.
- Se seleccionó el cableado de la instrumentación electrónica con la finalidad de aislar las diferentes señales de los sensores para evitar mediciones erróneas por ruido inducido, también se separó el cableado de instrumentación del cableado de potencia.
- Se seleccionó cada uno de los elementos dentro del banco de pruebas cumpliendo las condiciones de operación para el proceso y teniendo en cuenta las posibilidades expectantes de implementación con diferentes herramientas de análisis de crudos debido al diseño flexible realizado en el banco de pruebas.
- Se concluye que los sistemas automátatas, permiten mantener y generar más condiciones de simulación, y obtener más datos del sistema.
- Se analizaron los equipos de pre actuación y su eficiencia en el sistema, encontrando que aportan al desarrollo de las condiciones de simulación

seguras por que generan condiciones eléctricas estables controladas por un maestro de control y obteniendo mayores rangos de trabajo.

- La estructura del banco de pruebas se diseñó en forma modular ensamblados por acoplamiento de tornillo roscado, asimismo facilitando el acceso a todos los elementos que lo conforman, sin perder la estética y ergonomía en el sistema.
- El sistema de unión por brida implementados en el banco de pruebas, le concede una característica modular, que accede integrar un amplio número de accesorios contemplados en el actual diseño, logrando con estos expandir las posibilidades de experimentación, facilitar el transporte, montaje, mantenimiento, reemplazo de equipos y componentes del banco susceptible a daño.
- Se estudió para el desarrollo de este proyecto diferentes tipos de comunicación entre el PLC y los equipos de periferia, donde se concluye que los protocolos de comunicación facilitan la interacción de datos en el campo de trabajo, porque permite linealizar y escalar las señales de comunicación en medios portadores.
- Se estableció que la organización del cableado en los tableros de potencia y control es importante, porque facilita las marcas y distribución de este a la hora de trabajar en los mismos.
- Los resultados finales del diseño logran versen afectados por las limitaciones económicas y de tecnología con que se dispuso en el proceso de construcción y que terminaron siendo parte importante a la hora de producir márgenes de errores dentro de los resultados.

- El diseño y construcción de la resistencia se realizó teniendo en cuenta que el material seleccionado evitara que el crudo se carbonice con la exposición al calor sobre la resistencia, aislando el elemento térmico.
- Se diseñó el banco de pruebas con las mínimas distancias posibles entre los sensores que integran el circuito de tubería evitando errores en el censado por turbulencia.
- La utilización del Banco de Pruebas genera un avance en las investigaciones dentro del Campo Escuela Colorado en el área de extracción de crudos parafínicos, en las cuales las condiciones de caudal de flujo, presión y temperatura se pueden controlar sin presentar riesgos de seguridad a las personas que operen dichos procesos.

7. RECOMENDACIONES

- La manipulación del sensor PT100 debe hacerse de la manera más cuidadosa posible, ya que estos son elementos bastante sensibles y que si son sometidos a algún tipo de golpe o fuerte vibraciones podría averiarse y empezar a censar datos con un gran margen de error o incluso dejar de funcionar.
- Elaborar un plan de revisión para que sea aplicado periódicamente, en donde se realicen pruebas para determinar si los equipos de medición se encuentra trabajando adecuadamente y no presentar un nivel de incertidumbre muy alto.
- Para evitar accidentes o daño en el banco de pruebas se recomienda seguir los pasos del manual de operación (Anexo A), además de seguir un patrón de desarrollo de las practicas a realizar.
- Para evitar daños en la motobomba por cavitación se recomienda que el tanque de almacenamiento permanezca con la cantidad de crudo suficiente prescrita en el manual de operación.
- Se recomienda rediseñar un nuevo sistema de agitación en el tanque de alimentación en las próximas mejoras del banco de pruebas para asegurar una homogenización más eficiente.

REFERENCIAS

- [1] C. E. Colorado, «portal UIS,» 14 octubre 2013. [En línea]. Available: <http://www.uis.edu.co/webUIS/.html>.
- [2] A. Emiliano, Determinación del Umbral de Cristalización de las Parafinas en el Crudo del Campo Colorado, Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2008.
- [3] V. C. y. G. Diana, *mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos*, bucaramanga: tesis de grado, 2009.
- [4] R. M. J. D. U. John E. Hopcroft, Teoría de autómatas, lenguajes y programación, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A, 2007.
- [5] S. C. rizo, introduccion al proyecto de produccion, ingenieria concurrente, para el diseño de producto, Valencia: servicio de publicaciones, 2002.
- [6] R. L. Mott, diseño de elementos de maquinas, mexico: pearson, 2006.
- [7] S. Chapman Román, Uso del Analisis de FLExibilidad de sistemas de tuberias para la seleccion y especificacion de soportes dinamicos, dayton, 1997.
- [8] J. E. Shigley, Diseño en ingenieria mecanica, Mexico: Mc Graw-Hill, 1984.
- [9] C. M. y. Plana, Mecanica de Fluidos y Maquinas Hidraulicas, Madrid: Ediciones del Castillo, 1982.
- [10] ASME, «Codigo ASME para calderas y recipientes a presion,» Three Park Avenue, New York, 2010.
- [11] W. C. Dunn, «fundamentos de la instrumentacion indsutrial y el control de procesos,» Mc Graw Hill, New york, 2005.
- [12] A. C. Solé, «Instrumentacion Industrial,» Alfa Omega Marcombo, Barcelona, 1997.

- [13] A. D. H. William D Copper, «Instrumentación Electrónica Moderna,» Pearson, Mexico, 1991.
- [14] Danfoss, «Sensor de temperatura con transmisor integrado para aplicaciones industriales, MBT 3560».
- [15] RyUrbina, «www.ryultda.com,» [En línea].
- [16] Danfoss, «Transmisor de presión para aplicaciones industriales Tipo MBS 3000».
- [17] sensorstecnic, «www.sensorstecnic.com,» [En línea].
- [18] GF, «Signet 2536 Rotor-X Paddlewheel Flow Sensors».
- [19] w. newport.ca, «www. newport.ca,» 3 julio 2005. [En línea]. [Último acceso: 1 octubre 2014].
- [20] Crane, Fluidos en valvulas, Accesorios y tuberías, 2003.
- [21] C. Mataix., *Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas,*
- [22] Barnes, *Catalogo de bombas barnes.*
- [23] www.igihm.com, «www.igihm.com,» [En línea].
- [24] Pedrollo, *Catalogo de productos pedrollo.*
- [25] A. A. William Vera, «diseño de un modulo didactico para la asignatura instrumentacion electronica,» 2011.
- [26] Danfoss, «Válvulas solenoides proporcionales servo accionadas de 2 vías Tipo V260B».
- [27] Danfoss, «VLT micro drive, FC 51.».
- [28] Walton, «DIN-A-MITE Style B User's Manual».
- [29] Siemens, *s7 1200 catalogo.*
- [30] A. BRADLEY, «CompactLogix Controllers Specifications».
- [31] A. BRADLEY, «Terminales HMI PanelView».
- [32] ADAM, «ADAM-4520/4522/RS-232 to RS-422/485 Converter».

- [33] A. BRADLEY, «Stratix 2000 Ethernet Unmanaged switches».
- [34] B. ALLAN, «ROCKWELL AUTOMATION,» [En línea].
- [35] A. Bradley, «Guía de inicio rápido para controladores Logix5000».
- [36] I. y. M. JTP, «NOMENCLATURA PARA DIAGRAMAS DE TUBERIAS E INSTRUMENTACIÓN (P&ID)».
- [37] ASME, «API 650 y 653 Diseño, montaje y construcción de tanques soldados de acero,» Three Park Avenue, New York, 2007.

BIBLIOGRAFIA

A. A. William Vera, «diseño de un modulo didactico para la asignatura instrumentacion electronica,» 2011.

A. BRADLEY, «CompactLogix Controllers Specifications».

A. Bradley, «Guía de inicio rápido para controladores Logix5000».

A. BRADLEY, «Stratix 2000 Ethernet Unmanaged switches».

A. BRADLEY, «Terminales HMI PanelView».

A. C. Solé, «Instrumentacion Industrial,» Alfa Omega Marcombo, Barcelona, 1997.

A. D. H. William D Copper, «Instrumenatcion Electronica MOderna,» Pearson, Mexico, 1991.

A. Emiliano, Determinación del Umbral de Cristalización de las Parafinas en el Crudo del Campo Colorado, Bucaramanga: UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, 2008.

ADAM, «ADAM-4520/4522/RS-232 to RS-422/485 Converter».

ASME, «API 650 y 653 Diseño, montaje y construccion de tanques soldados de acero,» Three Park Avenue, New York, 2007.

ASME, «Codigo ASME para calderas y recipientes a presion,» Three Park Avenue, New York, 2010.

B. ALLAN, «ROCKWELL AUTOMATION,» [En línea].

Barnes, Catalogo de bombas barnes.

C. E. Colorado, «portal UIS,» 14 octubre 2013. [En línea]. Available: <http://www.uis.edu.co/webUIS/.html>.

C. M. y. Plana, Mecanica de Fluidos y Maquinas Hidraulicas, Madrid: Ediciones del Castillo, 1982.

C. Mataix., Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas,.

Crane, Fluidos en valvulas, Accesorios y tuberias, 2003.

Danfoss, «Sensor de temperatura con transmisor integrado para aplicaciones industriales, MBT 3560».

Danfoss, «Transmisor de presión para aplicaciones industriales Tipo MBS 3000».

Danfoss, «Válvulas solenoides proporcionales servo accionadas de 2 vías Tipo V260B».

Danfoss, «VLT micro drive, FC 51.».

GF, «Signet 2536 Rotor-X Paddlewheel Flow Sensors».

I. y. M. JTP, «NOMENCLATURA PARA DIAGRAMAS DE TUBERIAS E INSTRUMENTACIÓN (P&ID)».

J. E. Shigley, Diseño en ingeniería mecánica, Mexico: Mc Graw-Hill, 1984.

Pedrollo, Catálogo de productos pedrollo.

R. L. Mott, diseño de elementos de máquinas, Mexico: Pearson, 2006.

R. M. J. D. U. John E. Hopcroft, Teoría de autómatas, lenguajes y programación, Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A, 2007.

RyUrbina, «www.ryultda.com,» [En línea].

S. C. rizo, introducción al proyecto de producción, ingeniería concurrente, para el diseño de producto, Valencia: servicio de publicaciones, 2002.

S. Chapman Román, Uso del Análisis de FLEXIBILIDAD de sistemas de tuberías para la selección y especificación de soportes dinámicos, Dayton, 1997.

sensorstecnic, «www.sensorestecnic.com,» [En línea].

Siemens, s7 1200 catálogo.

V. C. y. G. Diana, mejora de la movilidad del crudo parafínico mediante campos magnéticos, Bucaramanga: tesis de grado, 2009.

W. C. Dunn, «fundamentos de la instrumentación industrial y el control de procesos,» Mc Graw Hill, New York, 2005.



w. newport.ca, «www. newport.ca,» 3 julio 2005. [En línea]. [Último acceso: 1 octubre 2014].

Walton, «DIN-A-MITE Style B User's Manual».

www.igihm.com, «www.igihm.com,» [En línea].

ANEXOS

ANEXO A: MANUAL DE OPERACIONES

 	MANUAL DE OPERACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	APROBO:
		FECHA:
		PÁGINA:
MANUAL DE OPERACIÓN BANCO DE PRUEBAS		
1. INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD.		
1.1. Instrucciones generales		
Antes de proceder a efectuar los ensayos, el montaje, la puesta en funcionamiento, el mantenimiento o las operaciones, lea el Manual de Operaciones y cumpla las instrucciones contenidas en el mismo.		
1.2. Normas de Seguridad		
Cumpla con:		
<ul style="list-style-type: none">• Las normas de seguridad de la Institución.• Las regulaciones para la prevención de accidentes,• Las pautas y regulaciones técnicas reconocidas.		
El hecho de no dar cumplimiento a las normas de seguridad, tendrá como consecuencias riesgos que comprometen el personal o daños a los elementos que integran el banco de pruebas, por ejemplo:		
<ul style="list-style-type: none">• Peligros para el personal del laboratorio, al hacer contacto con las tuberías a altas temperaturas• Daños en los sensores, al usar voltajes superiores a los que se requiere según el DataSheet• Fallas en las observaciones de los ensayos.		

1.3. Condiciones de conexión.

Todos los trabajos que deban efectuarse en las conexiones eléctricas del Banco de Control, Banco de Potencia y Banco de Pruebas, únicamente pueden ser llevados a cabo, por parte de electricistas.

1.4. Letreros y señales de advertencia.

Cumpla con todas las indicaciones que se han puesto en el banco de pruebas, tales como: las señales o inscripciones de advertencia y de peligro.

1.5. Trabajos en el Banco de Pruebas

Los trabajos deben ser efectuados en el banco de pruebas, solamente pueden llevarse a cabo por parte de personal calificado.

Como personal calificado se subentiende el personal, que, además de su preparación en el campo profesional, experiencia e instrucción específica, tiene suficiente conocimientos de:

- Las regulaciones de seguridad de la institución.
- Las regulaciones para la prevención de accidentes,
- Las pautas y regulaciones técnicas reconocidas.
- Ser apto para evaluar el trabajo que le sea asignado y también para reconocer y evitar posibles peligros.
- Estar autorizado por los responsables de la seguridad del laboratorio, con el fin de llevar a cabo los trabajos requeridos.

2. INSTRUCCIONES IMPORTANTES

2.1. Instrucciones Importantes

El uso de este manual de operaciones, facilita el adecuado manejo de los sensores, actuadores y sistemas de control en la puesta en marcha.

El fabricante no acepta responsabilidad alguna por los siguientes daños:

- Mantenimiento negligente,
- Operación impropia,
- Instalación defectuosa,
- Conexión equivocada o inexperta de la máquina eléctrica.
- Daños que resulten, directa o indirectamente, de cambios efectuados en el sistema, unilateralmente, por parte del usuario, o que se generen por causa del incumplimiento de las recomendaciones dadas por el fabricante.
- Daños que tengan lugar por causa del uso de partes de reposición/accesorios, que no hayan sido recomendados o suministrados por el fabricante.

2.2. Instalación

Este Banco de pruebas es apropiado instalarlo en recintos cerrados y cuya temperatura, para el enfriamiento, fluctúe entre 0° C hasta +40° C, para no afectar los instrumentos de medición. También la tensión que alimenta el banco de potencia es de 220 V.

Figura 1: Conexión trifásica pentafila.



2.3. Transporte

Para levantar y transportar el sistema, dé cumplimiento a las regulaciones de prevención de accidentes aplicables y a las regulaciones técnicas

aceptadas generalmente.

- Regulaciones de prevención de accidentes
- Normas estándar DIN: DIN 15003 Aparejos elevadores, Dispositivos de suspensión de cargas

2.4. Daños ocasionados por el transporte

- Cuando haya cualquier daño ocasionado por el transporte, prepare la documentación pertinente e informe de ello, inmediatamente, tanto a la compañía transportadora, como a la autoridad del laboratorio.

3. OPERACIÓN O PUESTA EN MARCHA

3.1. Descripción general

El banco de pruebas se utiliza para simular las condiciones ambientales de los pozos de extracción de crudo, los fenómenos físicos que monitorea son: temperatura, caudal y presión, que son los más relevantes para el proceso. Sus rangos de temperatura se encuentran entre 25 a 75 °C, el caudal a simular se encuentra entre 0 y 300 [BOPD] y los rangos de presión son [0 a 40][Psi].

3.2. Descripción del Proceso.

Este sistema consta de un tanque principal de almacenamiento “TK1”, con capacidad de carga de 15[L] de volumen a presión atmosférica. En este tanque se homogeniza el fluido almacenado y se efectúa el calentamiento por medio de una resistencia de inmersión.

El crudo almacenado desciende por el primer segmento de tubería “LP01” para ser captado por la motobomba centrífuga de 1 [HP] “MB”, esta empuja el crudo por el segundo segmento de tubería “LP02” donde se realiza la adquisición de datos a través de los sensores de temperatura, presión y

caudal. Seguido el tercer segmento de tubería “LP03” consta de un tramo intercambiable para facilitar el ajuste de prototipos para la investigación.

El cuarto segmento tubería “LP04” inicia con una válvula de globo con control proporcional y actuador eléctrico “VG” que aseguran una presión en la tubería aguas abajo; Este segmento termina en el tanque de resultados “TK2” con la finalidad de captar el crudo expuesto a los prototipos para luego ser extraído y estudiado. Del anterior segmento se separa “LP05” que lleva el fluido a TK1.

El sistema de control de este banco está basado en lazos de control cerrados locales con actuadores eléctricos. Un lazo de control de temperatura conformado por dos sensores de temperatura y una resistencia de calentamiento “R.TK1” en TK1, un lazo de control de caudal del cual hacen parte un sensor de caudal, una motobomba centrífuga MB, un variador de velocidad y una válvula de globo de control proporcional de caudal; dos lazos cerrados de presión conformado por un sensor de presión y un presostato que actúa como un sistema de protección de presión. Cada uno de estos lazos son controlados por un autómata programable (PLC) que se encuentra en un tablero de control individualizado a una distancia prudente de la influencia de los prototipos de investigación.

La potencia de esta planta es distribuida por un tablero de alimentación, donde se soporta el consumo energético estudiado para el funcionamiento del banco de pruebas.

3.3. Flexibilidad del Sistema

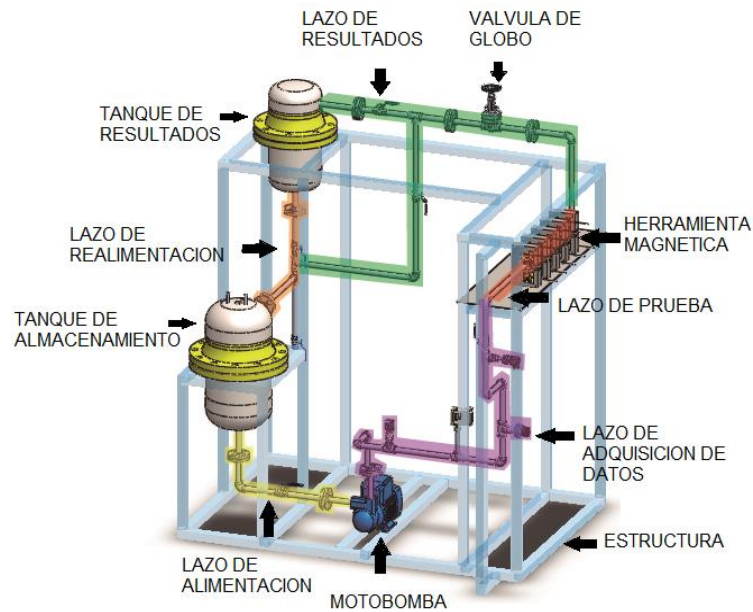
Este banco está diseñado para que pueda ser modificado según especificaciones particulares o necesidades para el investigador, su diseño puede cambiar para adaptarse a otros fluidos, realizando cambios en especificaciones técnicas como: material de las tuberías, rangos de simulación, seguridad ambiental y selección de la instrumentación.

Este sistema permite mejoramiento constante y evolución de su diseño, debido a que es manufacturable, ergonómico, modificable, flexible, reusable y robusto, estas son sus principales características.

3.4. Descripción del diseño

En este índice se describe cada una de las cualidades y características que explican la razón de los segmentos de la planta de simulación, siguiendo el sentido del flujo del proceso y tomando como referencia inicial el tanque de almacenamiento hasta el tanque de resultados hasta cerrar el circuito. Como se muestra en la figura 2.

Figura 2: Lazos del banco de pruebas



Nota: La tubería del banco de pruebas es de $\varnothing=1/2''$ de acero al carbono en todo su recorrido, excluyendo el acoplador del sensor de flujo con $\varnothing=1 1/2''$.

- TK1 : El proceso comienza en TK1 que es el tanque principal del banco de pruebas con un cuerpo de acero al carbono, construido bajo norma, este tiene una capacidad efectiva de 15[L], con una altura de niple de 145 [mm], un diámetro interior de 251 [mm] un altura para las tapas de 137

[mm] y una altura total de 524.4 [mm] para obtener una altura efectiva de calentamiento de 310 [mm]. En el TK1 se efectúa la agitación del crudo que otorga homogeneidad al fluido, este sistema consta de dos agitadores de 12 [V] para fluidos ligeros que se encuentran en el exterior del tanque, entran en contacto con el fluido por medio de 2 agujeros de $\varnothing=1/8$ " en la zona baja del niple. Además TK1 posee una vía de desgasificación en la tapa superior que también realiza desempeña el papel de punto para la recarga del fluido. Para la circulación del crudo se cuenta con una salida y una entrada de $\varnothing=1/2$ " ubicadas en la parte más baja de la tapa inferior y en la parte más alta de la tapa superior respectivamente.

- R-TK1: Inmersa en el tanque se encuentra una resistencia tubular R-TK1 en espiral en incoloy1 para inmersión en crudo $\varnothing=0.4375$ " con terminales rectos y rosca de montaje a 4000[W]/220[V] que realiza el calentamiento del fluido, esta resistencia es diseñada con protecciones para fluido oleosos, que no producen acumulación de productos quemados en su área de incidencia, aislando el proceso de calentamiento.
- RTD2 PT100: Para censar la temperatura del crudo en el tanque se dispone de una RTD2 PT100 de $\varnothing=1/4$ " x 6" con rosca al proceso de clase A con cabeza de protección ATEX
- LP01: Es el segundo segmento del banco, es una línea de tubería que sale TK1, esta tiene forma En L consta de un primer tramo de tubería seguido por una T cuya finalidad es habilitar a través de la válvula mariposa "MV01" el desagüe del banco; el segmento continua con un tramo de tubería direccionado a la motobomba MBF01, su paso es regulado por la válvula mariposa "MV02".
- MB: Bomba centrífuga CPM 620 PEDROLLO de 1 [HP] con motor Eléctrico trifásico 220[V] a 60 [Hz] con protección térmica incorporada en el bobinado, Su cuerpo metálico posee una altura de $H=180$ mm, largo de $L=296$ mm y ancho de $W=140$ mm, con un peso de 10.8 [Kg], actúa como generador del caudal que se desea para el banco simulando las condiciones de las líneas de extracción de crudo con rangos 0 a 300 [BOPD].

- LP02: Este segmento consta de 3 tramos de tubería donde se ubica los sensores de presión, temperatura y caudal, distanciados entre ellos y de cualquier elemento que genere turbulencia (codos, motobomba, válvulas, etc.) con una distancia mínima de 20 [cm].
- Sensor transmisor de presión MBS 3000 DANFOSS Rangos de presión relativa desde 1 bar hasta 600 bar, Señales de salida 4 a 20 [mA] con elemento sensor un manómetro (presión relativa), tensión de alimentación de 9 a 32 [Vcc], con un rango de temperatura del fluido de -40 a 85°C.
- Sensor transmisor de temperatura MBT 3560 DANFOSS con rango de medición -50 a 200°C, Señales de salida 4 a 20 [mA] con elemento sensor Pt 1000, tensión de alimentación de 10 a 30 [Vcc].
- Sensor transmisor de flujo 2536 +GF+ SIGNET, con Margen de Velocidad de Flujo 0,1 a 6 [m/s], salida de colector abierto con Frecuencia de 49 [Hz] por 1 [m/s] nominal, como elemento sensor rotor rueda de Paletas, tensión de alimentación 3,3 a 24 Vcc.
- LP03: Segmento que está compuesto por tres tramos de tubería, el tramo principal es intercambiable de acero inoxidable con un largo de 1000mm, se ubica sobre una base rígida que es apta para sostener más de 50kg de peso, y una cabina que aísla electromagnéticamente los prototipos de ambiente, esto permite que los instrumentos no sean afectados por los procesos que se llevan a cabo allí, El acceso al operador se realiza por la compuerta frontal.
- LP04: Inicia con un tramo de tubería que lleva a una válvula de globo con control proporcional marca DANFOSS referencia, con actuador eléctrica, señal de control de 0 a 10 [V] cuerpo metálico, seguido por otro tramo de tubería que termina en una unión tipo T que luego conduce por otro tramo hacia TK2, el paso del fluido en esa dirección está controlada por una válvula mariposa.
- TK2: Es un tanque con una capacidad de 7[L] con una altura 325[mm] un diámetro de 251[mm], su finalidad dentro del banco de pruebas es la de

almacenar el crudo tratado, esto permite separar una muestra para realizar estudios sobre los efectos de los prototipos en la reología del crudo expuesto a ellos.

- LP05: Es el último segmento del banco de pruebas está compuesto por 4 segmentos de tubería, en ellos hay 3 válvulas mariposas que controlan el paso de del flujo a TK1 o permiten la extracción de muestras de crudo.

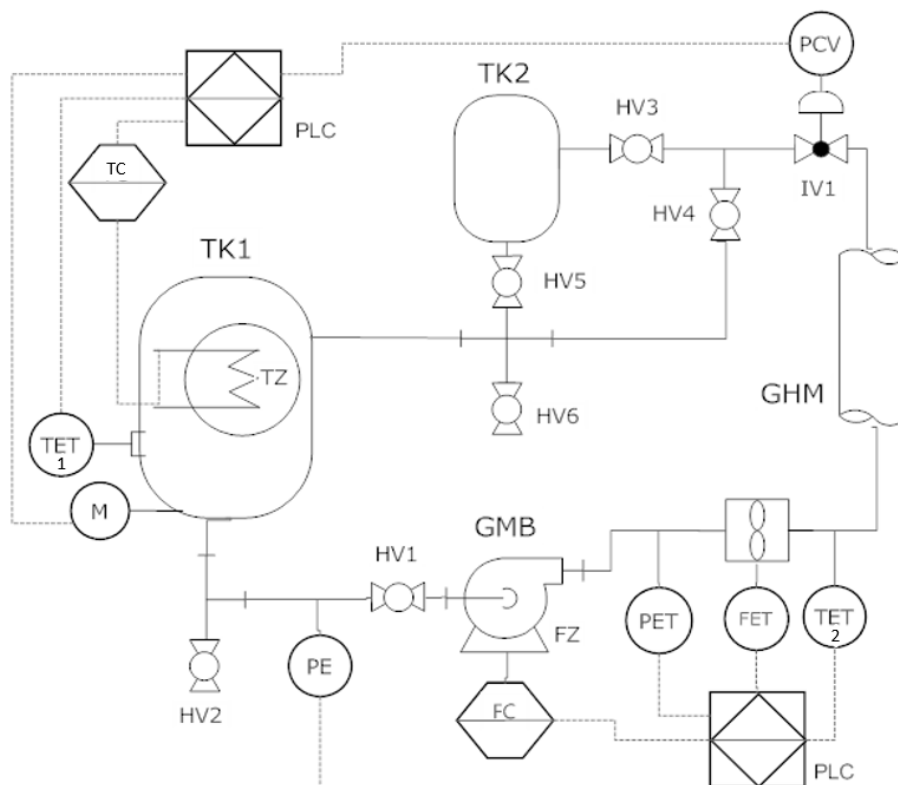
Figura 3: Banco de Pruebas



4. Lógica de control

El sistema de control de este banco está basado en lazos de control cerrados locales con actuadores eléctricos. Un lazo de control de temperatura conformado por dos sensores de temperatura y una resistencia de calentamiento en el tanque de almacenamiento. Un lazo de control de caudal del cual hacen parte un sensor de caudal, una motobomba centrífuga, un variador de velocidad y una válvula de globo de control proporcional; dos lazos cerrados de presión conformados por un sensor de presión y un presostato. Cada uno de estos lazos son controlados por un autómata PLC que se encuentra en un tablero de control individualizado a una distancia prudente de la influencia de los prototipos de investigación y una pantalla que permite la visualización y manejo de las variable de control.

Figura 4: P&ID Del Banco de Pruebas



Componentes y Nomenclatura

- TET-1/TET-2: sensores de temperatura
- PE: presostato
- HV-1/ HV-2/ HV-3/ HV-4/ HV-5/ HV-6: válvulas manuales
- IV-1_PCV: válvula de globo con control proporcional
- M: bomba de agitación
- TZ: resistencia de calentamiento
- TK1/TK2: tanques
- GMB: motobomba
- GHM: herramienta magnética
- FC: variador de velocidad
- PET: sensor de presión

- FET: sensor de flujo
- TC: relevador de estado solido

4.1. Descripción del control.

El hidrocarburo es ingresado TK1 a través de un embudo por el agujero de desgasificación, se cuenta con una capacidad de carga de 15 [L] para hidrocarburos ligeros; en este tanque se realiza el calentamiento que es efectuado por TZ que es una resistencia con capacidad de 400 [W], aquí mismo se mide la temperatura con TET-1 y se vigilan las condiciones de nivel del tanque con PE que se abre al detectar niveles de presión bajos en la columna de fluido, protegiendo de condiciones inseguras para la operación a TZ y GMB.

El caudal de este banco es accionado por GMB que es regulado por FC e IV1_PCV para obtener los rangos de simulación de las líneas de extracción en campo. GMB capta el crudo de TK1 y lo entrega a un lazo de tubería donde se miden las condiciones de caudal temperatura y presión. En este se encuentra PET que vigila las condiciones de presión después de GMB para reconocer situaciones inseguras, TET-2 actúa como referencia para el proceso de calentamiento en TK1 realizado por TZ regulado por TC, y FET actúa como referencia de realimentación para la generación del caudal.

El crudo entregado por GMB es afectado por GHM con la finalidad de modificar sus características reológicas y luego es almacenado en TK2 para realizar estudios posteriormente.

El banco de pruebas es atendido por un operador y cuenta con un sistema de control automático basado en un PLC que está programado con la lógica para efectuar lo anteriormente explicado además prevenir y alarmar condiciones inseguras, las señales son supervisadas en el HMI como ayuda para el operador

El banco de pruebas cuenta con un botón tipo hongo rotativo de parada de emergencia ubicado en el tablero de control que determinara una parada crítica.

4.2. Descripción de los lazos de control

4.2.1. Lazos de temperatura: Los sensores de temperatura TET-1 y TET- 2 transmiten en ubicaciones diferentes del banco de pruebas, con las señales que ellos envía se decide la acción de control que se efectúa en TK1 por TZ. Se usa TET-1 como referencia para obtener la temperatura más cercana al proceso realizado por GHM.

- **TET-1 a HMI:** Entrada Señal de temperatura en corriente 4 a 20 [mA] Salida visualización en HMI, Compara con valor de sobrecalentamiento, Compara con Setpoint y Compara con la media de TET-2.

La operación consiste en: obtener la medida de temperatura para visualizarla en el HMI para que el operador conozca las condiciones del sistema.

- **TET-2 a TZ:** Entrada Señal de temperatura en corriente 4 a 20 [mA], Salida para regular acción de TZ a través de TC, Setpoint de temperatura entrada HMI, Salida visualización en HMI, Compara con Setpoint de temperatura y Compara con valor de sobrecalentamiento.

La operación consiste en: Obtiene la medida para compararla con el setpoint de temperatura escrito por HMI, obtener la medida de temperatura para visualizarla en el HMI para que el operador conozca las condiciones del sistema en el lazo y realizar paradas por sobrecalentamiento

- **Control y shutdown de temperatura:** Se tienen un control de temperatura regulado por un controlador clásico PI que toma como referencia el setpoint y genera como salida una señal reguladora que a través de TC actúa en TZ calentando el crudo, se tiene criterios de sobrecalentamiento para proteger algunos de los instrumentos del

equipo.

Emite una señal de shutdown por sobrecalentamiento, esta deshabilita la acción de TZ en el crudo inhibiendo la salida del controlador hasta que la señal medida en TET-1 sea igual a setpoint temperatura, también se deshabilita el lazo de control cuando PE detecta baja presión.

4.2.2. Lazos de caudal: El sensor de flujo FET trasmite ubicado después de GMB esto asegura las condiciones de caudal para efectuar la acción de GHM, con la señal que él envía se decide la acción de control que se efectúa por FC IV1_PVC y GMB. IV1_PVC actúa como un respaldo que permite trabajar con GMB en las condiciones donde los cambios de frecuencia sean más notorios.

- **FET a FC:** Entrada Señal caudal por generación de pulsos en colector abierto, salida visualización en HMI, compara con setpoint, señal de salida para FC y señal de referencia de velocidad de FC

La operación consiste en: Obtiene la medida del caudal generado por GMB, compara con setpoint y realiza cambios en la salida del controlador y obtiene referencia de FC y regula la salida del controlador.

- **FET a IV1_PVC:** Entrada Señal caudal por generación de pulsos en colector abierto, salida apertura porcentual para IV1_PVC y salida visualización en HMI de la apertura de la IV1_PVC.

La operación consiste en: Obtiene la medida del caudal generado por GMB, compara con setpoint y realiza cambios en la apertura de la válvula para manipular las presiones de línea.

- **Control y shutdown de temperatura:** Se tienen un control de caudal regulado por un controlador clásico PI que toma como referencia el setpoint y genera como salida dos señales reguladoras: FC actúa cambiando la velocidad en GMB modificando el caudal para mantenerlo en los rangos de simulación e IV1_PCV aumenta la presión en la línea para optimizar el efecto de la variación de frecuencia en GMB.

Este lazo entra en shutdown por sobrepresión detectada en PET o por baja presión vigilada por PE, si se detecta una sobrepresión el sistema efectúa un

rampa de desaceleración para GMB y lleva la apertura de IV1_PVC a 100, esta acción lleva el caudal del banco a 0. Si se detecta una baja presión en PE se desacelera GMB para evitar cavitación.

4.2.3. Lazos de presión: El sensor de presión PET mide después de GMB y PE vigila la presión antes de GMB, aseguran condiciones del sistema seguras para el operador y los instrumentos.

- **PET a PLC:** Entrada Señal de presión en corriente 4 a 20 [mA], salida visualización en HMI, compara con criterio de sobrepresión del sistema, salida de shutdown sobrepresión del sistema.

La operación consiste en: Obtiene la medida de la presión generada por GMB, compara con criterio de sobrepresión y valida la salida de shutdown y obtiene la medida de la presión y la visualiza en pantalla.

- **PE a PLC:** Entrada Señal de presión 0 o 24 [v], salida de shutdown por baja presión.

La operación consiste en: Mientras el nivel del crudo en el tanque mantenga a PE activo, no se emite la señal de shutdown que no permite el arranque del sistema o deshabilita su uso.

- **Control y shutdown de temperatura:** Se usan estos lazos como protecciones a bajo nivel y a altas presiones. Estos lazos entra en shutdown por sobrepresión detectada en PET o por baja presión vigilada por PE, si se detecta una sobrepresión el sistema efectúa un rampa de desaceleración para GMB y lleva la apertura de IV1_PVC a 100, esta acción lleva el caudal del banco a 0. Si se detecta una baja presión en PE se desacelera GMB para evitar cavitación. Las señales de shutdown por presión son consideradas como deshabilitadoras de arranque.

5. MANTENIMIENTO

5.1. Instrucciones de seguridad

Los trabajos de mantenimiento solamente pueden ser llevados a cabo cuando el banco de pruebas este detenido.

Asegúrese de que la máquina se encuentra protegida contra una conexión accidental y de que esté provista del correspondiente rótulo de advertencia.

Nota: ¡Cuando use aceites y grasas de lubricación, o productos de limpieza o partes de reposición, de cumplimiento a las regulaciones de seguridad y a las normas de prevención de accidentes del fabricante respectivo!

El trabajo de mantenimiento del suministro de energía eléctrica a la máquina o de los elementos eléctricos auxiliares y de control, debe ser efectuado únicamente por electricistas profesionales, de acuerdo con la norma DIN VDE 0105.

Asegúrese de que la máquina se encuentre conectada, pero de tal manera que no esté activada.

Nota: ¡Cerciórese de que el banco de pruebas no esté activado!, ¡Haga la conexión a tierra y corte el circuito!

5.2. Limpieza del banco de pruebas

No lavar el interior de las tuberías del banco de pruebas con agua, usar varsol después de cada corrida para purgar el banco de pruebas y no afectar nuevos ensayos.

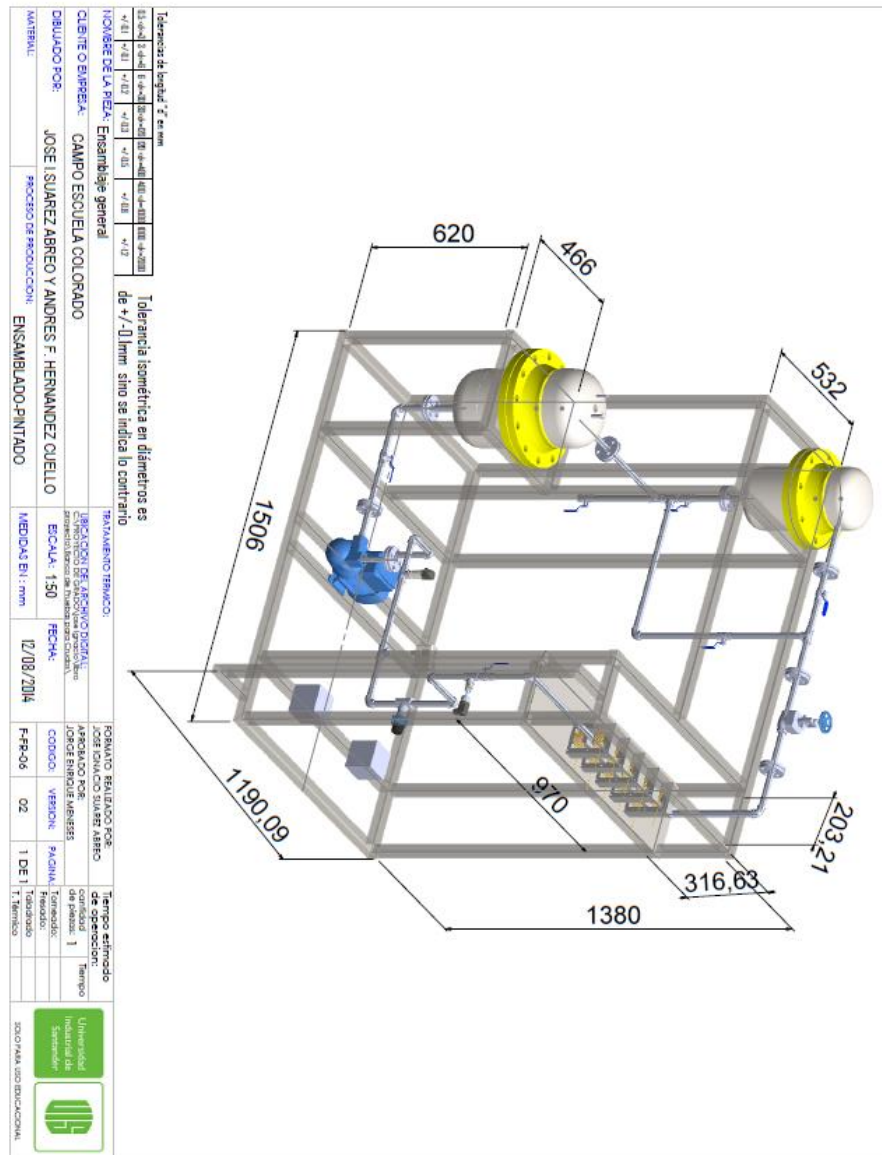
En el caso de que haya depósitos considerables de mugre, no desmonte la el banco de prueba, remueva el enmugrecimiento usando productos de limpieza adecuados y con el banco de pruebas totalmente desactivado.

Nota: Espere un tiempo aproximado de 30 minutos después de cada prueba para limpiar el banco de pruebas si hubo algún derrame de crudo, debido que el banco maneja altas temperaturas.

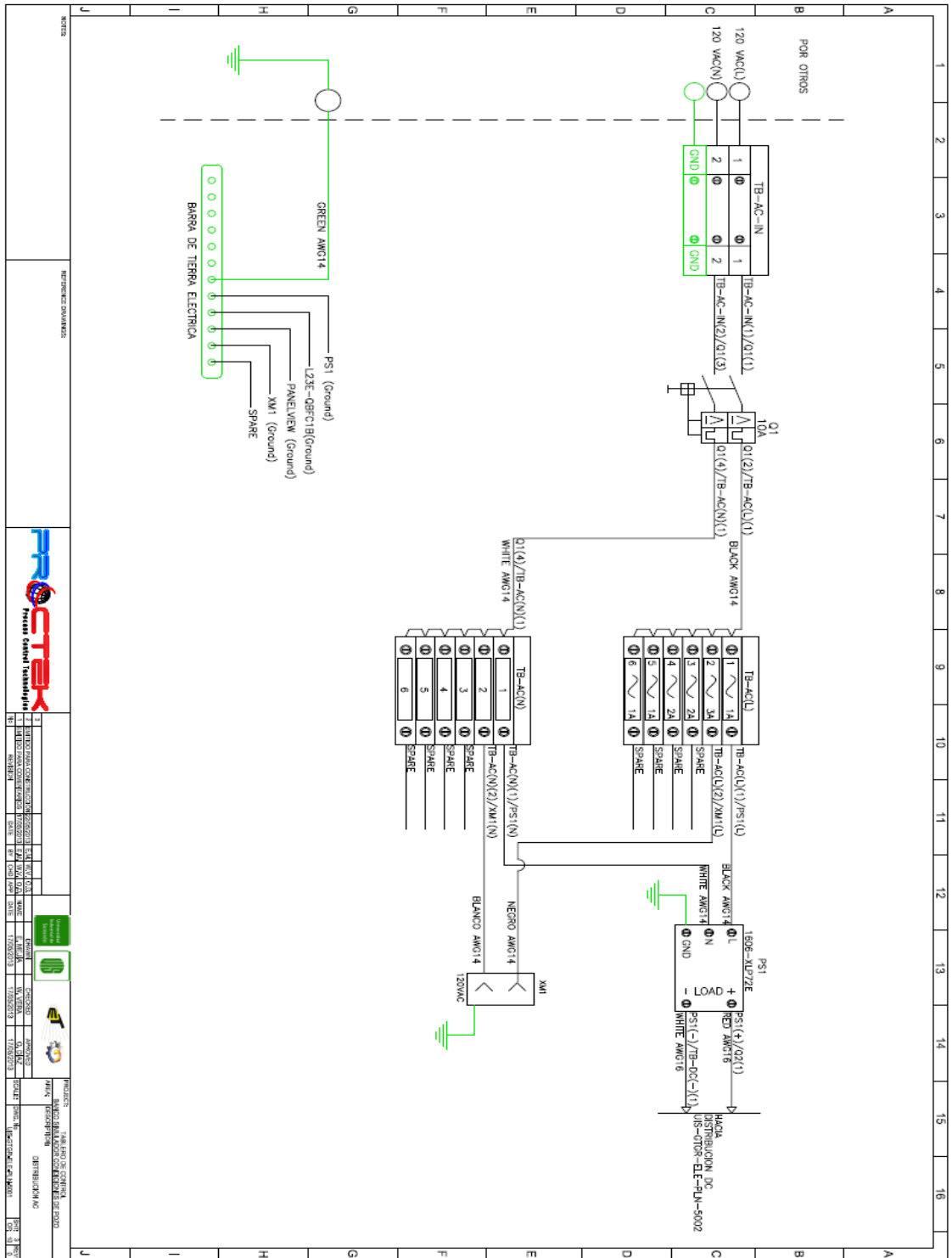
No abrir los tableros de control ni de potencia sin autorización del encargado del laboratorio. Solo se abrirán si los datos de programación se desean cambiar por otros que se requiera para nuevos ensayos y diferentes rangos de medición en las variables, teniendo en cuenta que no exceda los rangos del fabricante de cada uno de los sensores y actuadores del banco.

Nota: No tocar los terminales de conexión eléctrica del banco de prueba durante la jornada de limpieza o durante los ensayos. Las conexiones pueden tener un alto voltaje.

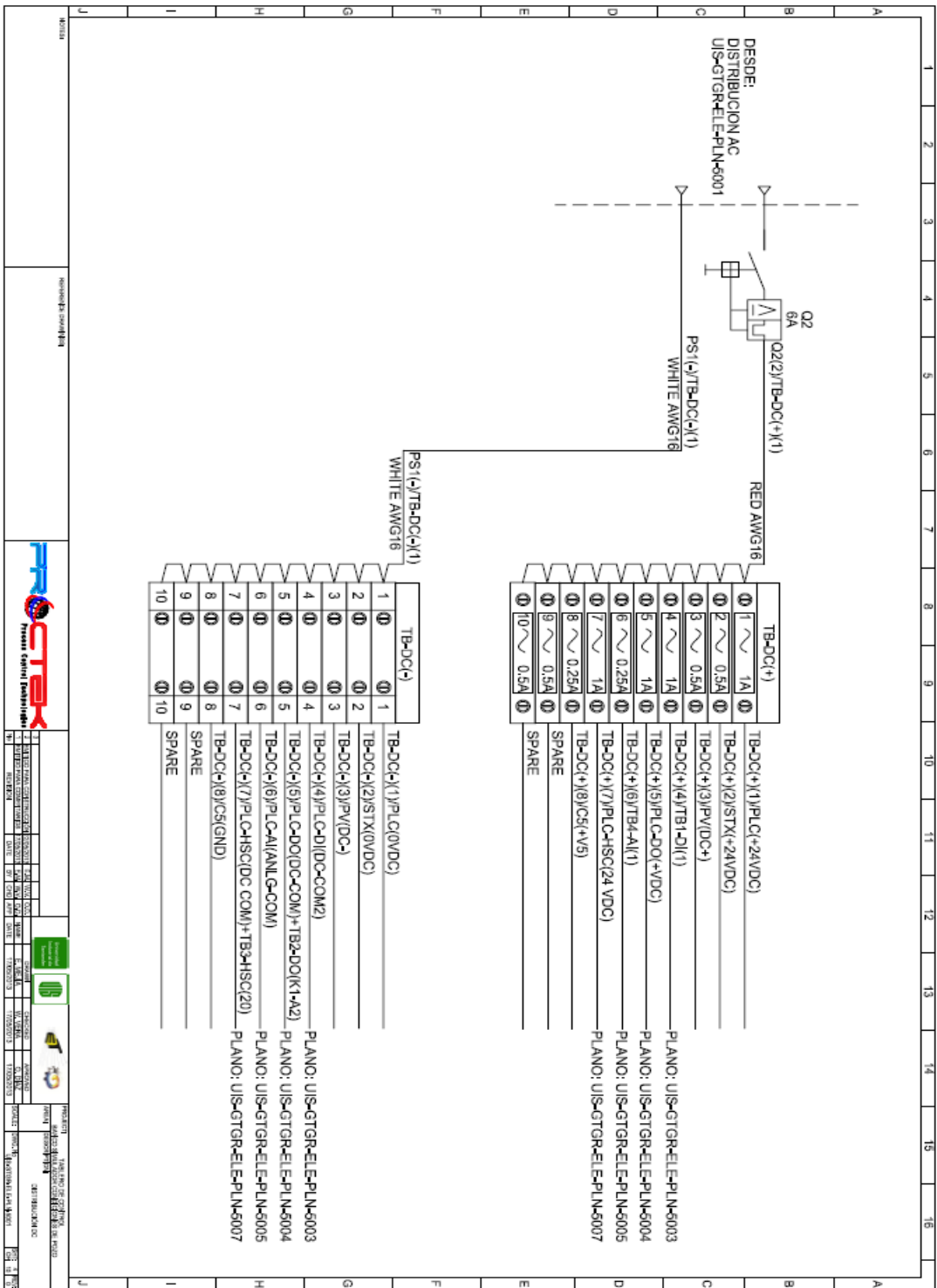
ANEXO B: PLANOS BANCO DE PRUEBAS



ANEXO C: PLANOS ELECTRICOS DEL TABLERO ELECTRICO



NOTAS		REFERENCIAS EXTERNAS		REVISIONES		ESTADO		FECHA		AUTORES		PROYECTOS	
1	REVISIÓN	1	REVISIÓN	1	REVISIÓN	1	REVISIÓN	1	REVISIÓN	1	REVISIÓN	1	REVISIÓN
2	REVISIÓN	2	REVISIÓN	2	REVISIÓN	2	REVISIÓN	2	REVISIÓN	2	REVISIÓN	2	REVISIÓN
3	REVISIÓN	3	REVISIÓN	3	REVISIÓN	3	REVISIÓN	3	REVISIÓN	3	REVISIÓN	3	REVISIÓN
4	REVISIÓN	4	REVISIÓN	4	REVISIÓN	4	REVISIÓN	4	REVISIÓN	4	REVISIÓN	4	REVISIÓN
5	REVISIÓN	5	REVISIÓN	5	REVISIÓN	5	REVISIÓN	5	REVISIÓN	5	REVISIÓN	5	REVISIÓN
6	REVISIÓN	6	REVISIÓN	6	REVISIÓN	6	REVISIÓN	6	REVISIÓN	6	REVISIÓN	6	REVISIÓN
7	REVISIÓN	7	REVISIÓN	7	REVISIÓN	7	REVISIÓN	7	REVISIÓN	7	REVISIÓN	7	REVISIÓN
8	REVISIÓN	8	REVISIÓN	8	REVISIÓN	8	REVISIÓN	8	REVISIÓN	8	REVISIÓN	8	REVISIÓN
9	REVISIÓN	9	REVISIÓN	9	REVISIÓN	9	REVISIÓN	9	REVISIÓN	9	REVISIÓN	9	REVISIÓN
10	REVISIÓN	10	REVISIÓN	10	REVISIÓN	10	REVISIÓN	10	REVISIÓN	10	REVISIÓN	10	REVISIÓN
11	REVISIÓN	11	REVISIÓN	11	REVISIÓN	11	REVISIÓN	11	REVISIÓN	11	REVISIÓN	11	REVISIÓN
12	REVISIÓN	12	REVISIÓN	12	REVISIÓN	12	REVISIÓN	12	REVISIÓN	12	REVISIÓN	12	REVISIÓN
13	REVISIÓN	13	REVISIÓN	13	REVISIÓN	13	REVISIÓN	13	REVISIÓN	13	REVISIÓN	13	REVISIÓN
14	REVISIÓN	14	REVISIÓN	14	REVISIÓN	14	REVISIÓN	14	REVISIÓN	14	REVISIÓN	14	REVISIÓN
15	REVISIÓN	15	REVISIÓN	15	REVISIÓN	15	REVISIÓN	15	REVISIÓN	15	REVISIÓN	15	REVISIÓN
16	REVISIÓN	16	REVISIÓN	16	REVISIÓN	16	REVISIÓN	16	REVISIÓN	16	REVISIÓN	16	REVISIÓN



REVISIONES

PROYECTO: UPS PARA CENTRO DE DATOS

CLIENTE: INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

FECHA: 15/05/2017

PROYECTISTA: J. GARCIA

REVISOR: J. GARCIA

APROBADO: J. GARCIA

PROYECTO: UPS PARA CENTRO DE DATOS

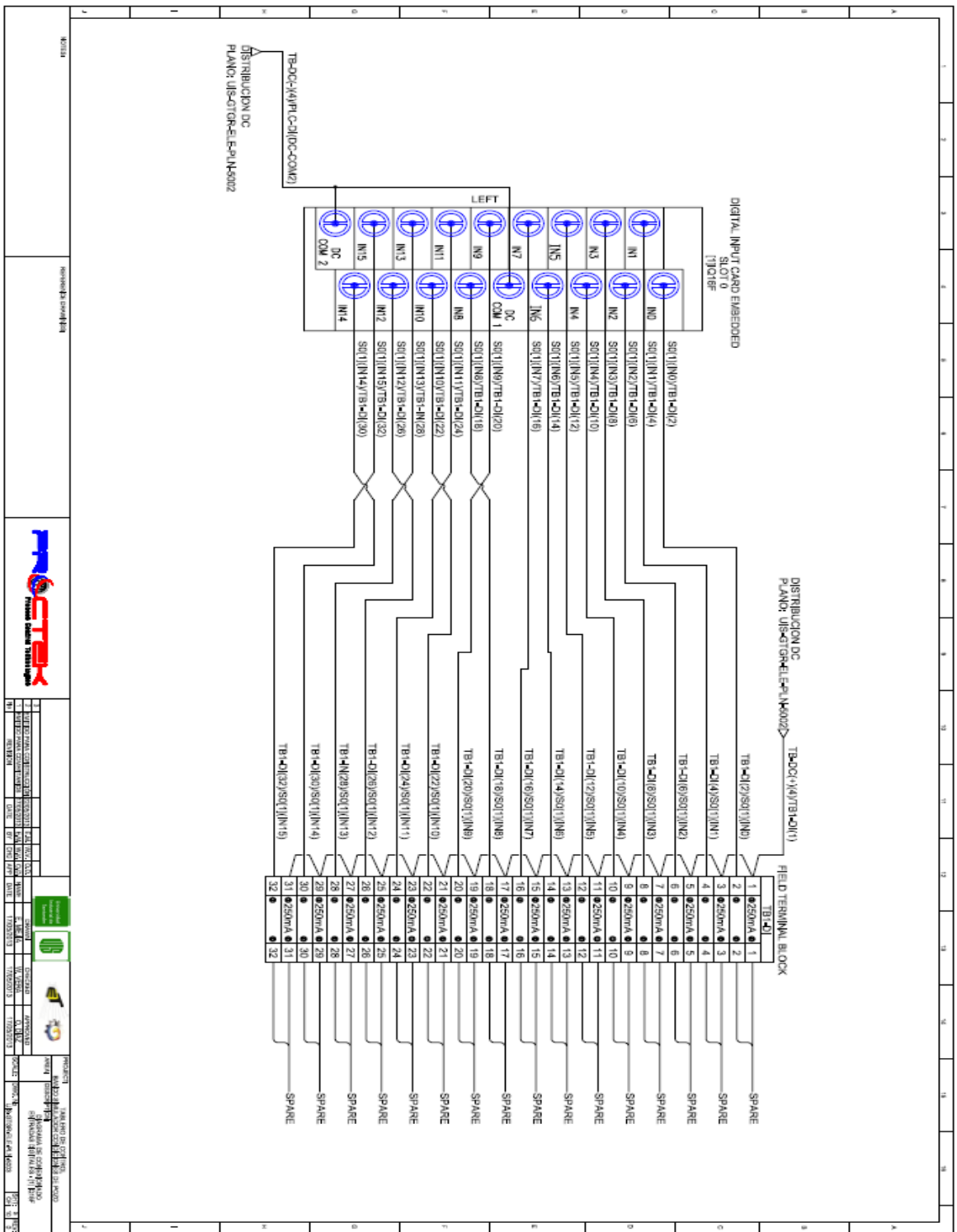
CLIENTE: INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

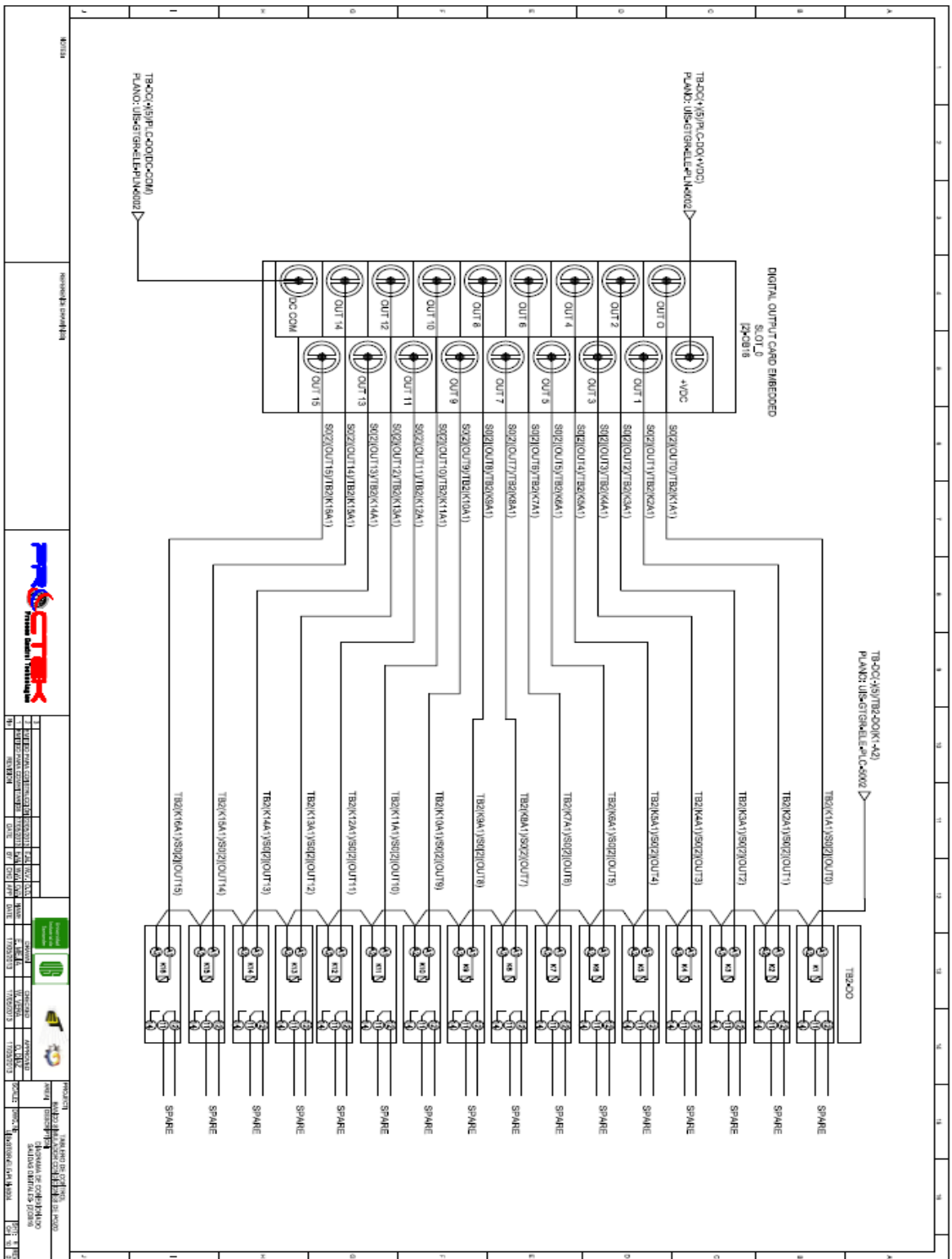
FECHA: 15/05/2017

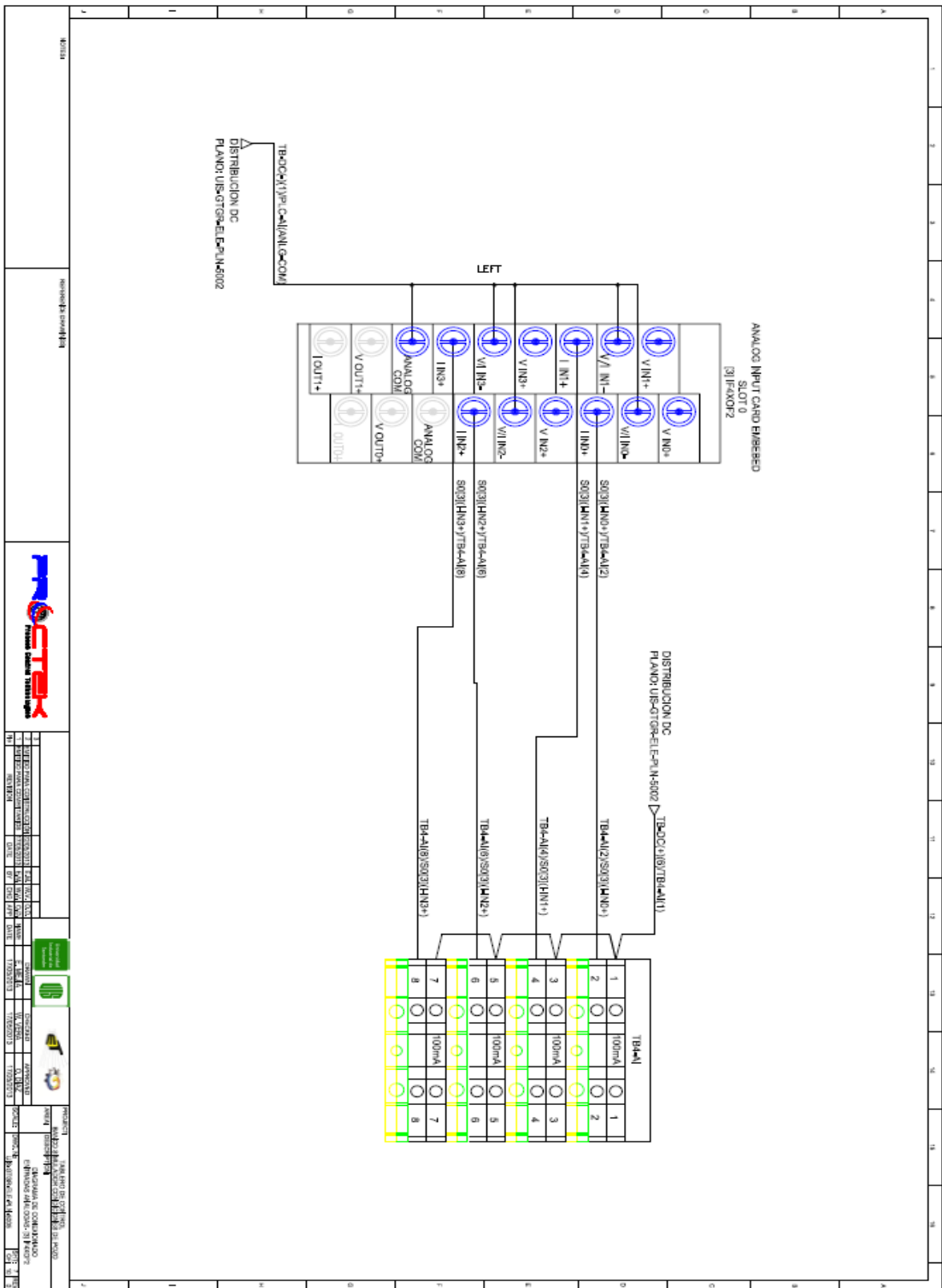
PROYECTISTA: J. GARCIA

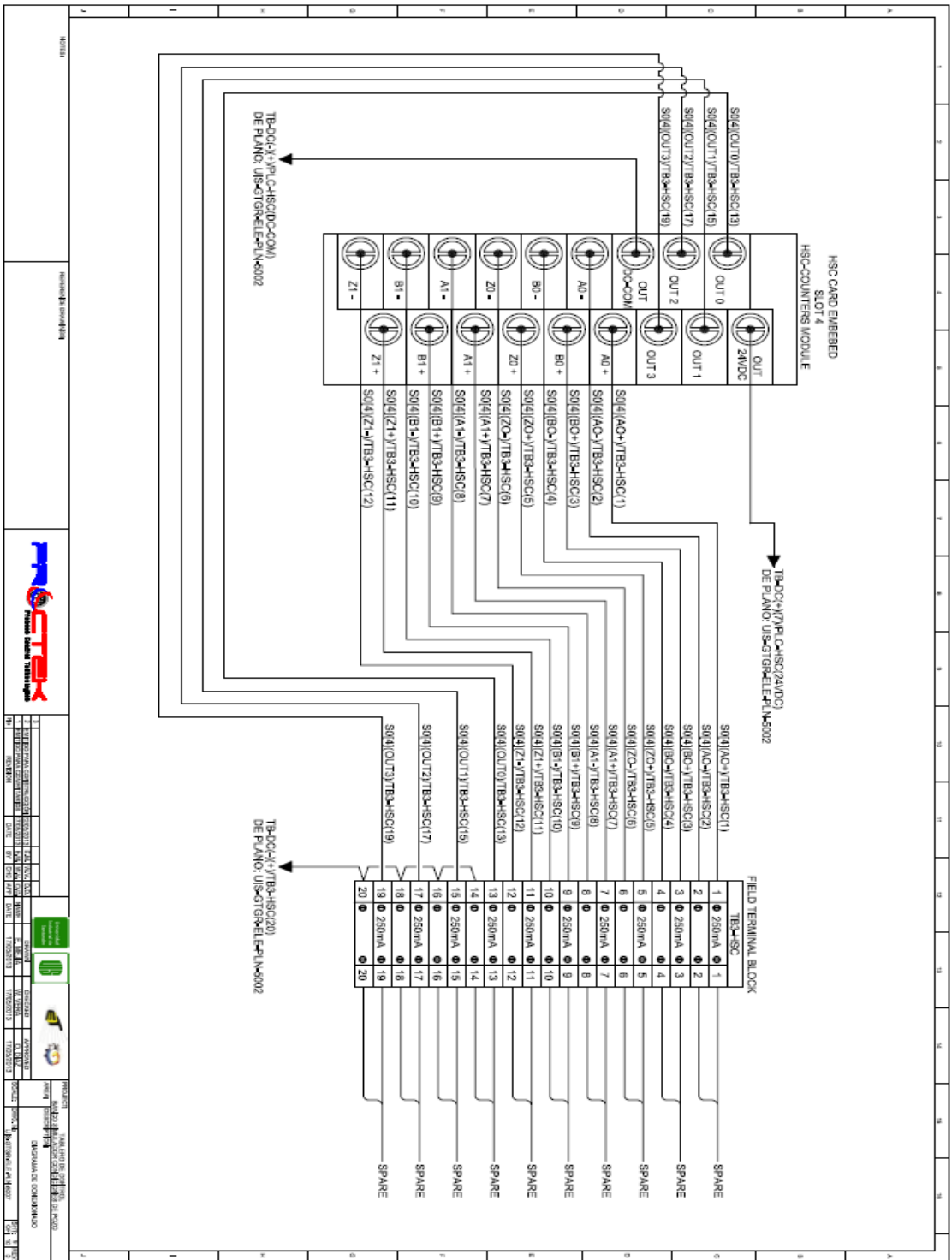
REVISOR: J. GARCIA

APROBADO: J. GARCIA

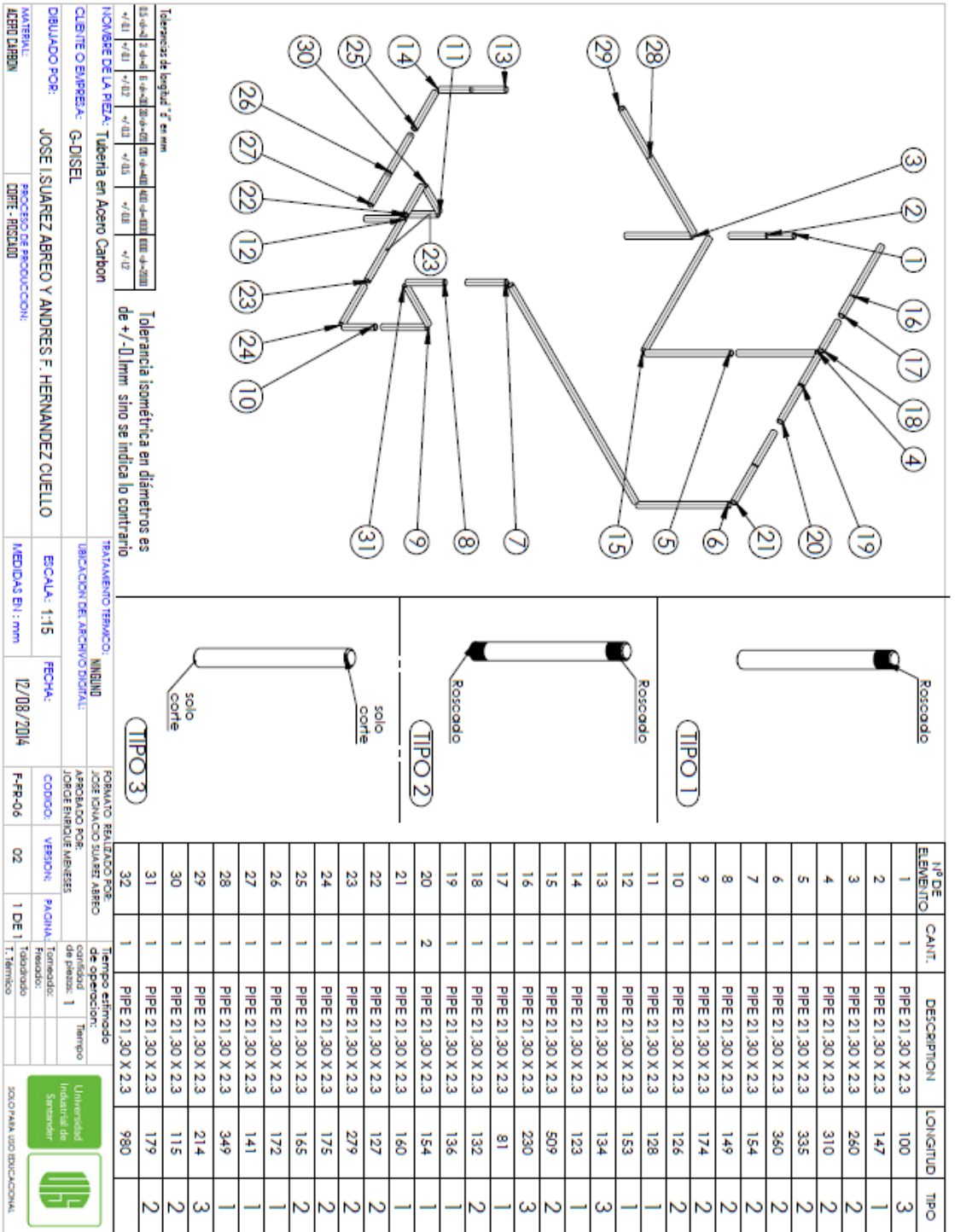








ANEXO E: PLANOS TUBERIAS



Tolerancia de longitud: 2' en mm

Tolerancia isométrica en diámetros es de +/- 0,1mm sino se indica lo contrario

Nombre de la pieza: Tuberia en Acero Carbon

CLIENTE O EMPRESA: G-DISEL

DIBUJADO POR: JOSE L SUAREZ ABRERO Y ANDRES F. HERNANDEZ CUELLO

MATERIAL: ACERO CARBON

PROCESO DE PRODUCCION: CUPRE - ROSCADO

TRATAMIENTO TERMICO: NINGUNO

UBICACION DEL ARCHIVO DIGITAL:

ESCALA: 1:15

FECHA: 12/08/2014

MEIDAS EN: mm

ROSCADO: ROSCADO

APROBADO POR: JOSE L SUAREZ ABRERO

FECHA: 12/08/2014

VERSION: 02

PAJINA: 1 DE 1

TIPO DE OPERACION: 1

TIEMPO ESTIMADO: 1

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTIAGO

SECCION PARA USO EDUCACIONAL

ANEXO D: PLANOS TANQUES

SECCIÓN A-A

Tolerancias de longitud: ± 0.5 en mm

±0.01	±0.02	±0.03	±0.04	±0.05	±0.06	±0.07	±0.08	±0.09	±0.10
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tolerancia isométrica en diámetros es de ± 0.1 mm, sino se indica lo contrario

Nombre de la pieza: Tanque de Agitación

Dibujado por: CAMPO ESCUELA COLORADO

CLIENTE O EMPRESA: JOSE I. SUAREZ ABREO Y ANDRES F. HERNANDEZ CUELLO

MATERIAL: ASTM Acero Estructural

PROCESO DE PRODUCCION:

TRATAMIENTO TERMICO:

UBICACION DEL ARCHIVO DIGITAL:

ESCALA: 1:10

FECHA: 12/08/2014

MEIDIAS EN : mm

FORMATO REALIZADO POR: JOSE I. SUAREZ ABREO

APROBADO POR: JORGE ENRIQUE MENESES

CODIGO: 02

VERSION: 02

PAGINA: 1 DE 1

F-PR-06

1 DE 1

T: Terminado

Tempo estimado de operacion: 1

Tempo de preparar: 1

Tempo de Trazado: 1

Tempo de Trazado: 1

Universidad Industrial de Santander

ZOO PLAN 100 EDUCACIONAL

