

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA**



**DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO E
INSTRUMENTACIÓN PARA LA PLANTA DE
ALMACENAMIENTO Y DESPACHO DE PETRÓLEO
DE LA EMPRESA OLYMPIC PERÚ-PIURA**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

AUTORES:

Br. Stalin Vladimir Olazábal Trejo
Br. Danny Alexander Tejada Neira

ASESOR:

Ing. Luis Alberto Vargas Díaz

Trujillo, Octubre del 2014

PRESENTACIÓN

Señores miembros del jurado:

De conformidad y en cumplimiento a los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el reglamento interno de la escuela profesional de Ingeniería Electrónica para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, ponemos a vuestra disposición el presente trabajo de investigación titulado: “Diseño de un Sistema Automático e Instrumentación para la Planta de Almacenamiento y Despacho de Petróleo de la Empresa Olympic Peru-Piura”, para ser sometido a evaluación.

El presente trabajo es el resultado de la aplicación de conocimientos adquiridos durante nuestra formación profesional en la universidad; nuestro reconocimiento a todos los profesores que han contribuido con sus conocimientos y experiencias durante esta etapa.

Trujillo, Octubre del 2014

Br. Stalin Vladimir Olazábal Trejo

Br. Danny Alexander Tejada Neira

DEDICATORIA

*A mi madre Victoria, por el
constante apoyo durante cada
etapa de mi vida.*

Stalin Vladimir Olazábal Trejo

*A mi madre María Isabel, lo que
soy y puedo llegar a ser es
gracias a ti.*

Danny Alexander Tejada Neira

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo el diseño de un sistema automático para la planta de almacenamiento y despacho de petróleo de la empresa Olympic Perú-Piura ubicada en el lote XIII-A.

Actualmente la empresa realiza el despacho a través de barcazas desde orillas del mar hasta buques cisterna, en tal sentido la empresa planea construir una estación de almacenamiento y despacho de petróleo crudo, la cual necesita ser automatizada, lo que permitirá lograr un manejo eficiente en los procesos mencionados, además de disminuir costos, tiempos de despacho y riesgos potenciales.

El presente trabajo de investigación fue desarrollado teniendo en cuenta el problema planteado por la empresa Olympic Perú, para lo cual fue necesario utilizar los conocimientos adquiridos en control y automatización, además de estándares para manejo de hidrocarburos.

En el capítulo I se hace una descripción del entorno actual y de la forma de trabajo para las etapas de almacenamiento y despacho, además se plantean la hipótesis, objetivos y limitaciones.

En el capítulo II se muestra el marco teórico de los conceptos de automatización e instrumentación utilizados en el desarrollo del trabajo de investigación.

El capítulo III se desarrolla en dos partes (almacenamiento y despacho), en las cuales se utiliza la misma metodología para resolver el problema; este capítulo consta del análisis matemático, obtención de la función de transferencia, se propone el plano de instrumentación y también se propone modelo y marca para cada instrumento detallado en el plano de instrumentación.

En el capítulo IV se determinan los costos del proyecto y los indicadores VAN y TIR.

Finalmente en el capítulo V se enumeran las conclusiones que se obtuvieron al realizar el presente trabajo de investigación, las cuales nos indican que el proyecto es técnica y económicamente viable.

ABSTRACT

The present research work aims to design an automatic system for the storage and dispatch petroleum plant of Olympic Peru-Piura Company located on lot XIII-A.

Nowadays the company is doing dispatch using barges from shore to tankers, in this sense, the company plans to build a storage and dispatch station for crude, which needs to be automated, allowing efficient management in mentioned processes, in addition to reducing costs, delivery times and potential risks.

The present research work was developed considering the problem proposed for the company Olympic Peru, for which it was necessary to use the knowledge acquired in control and automation, besides of standards for handling hydrocarbons.

In the chapter I is described the current environment and the way of working for the stages of storage and dispatch, it is also proposed the hypothesis, objectives and limitations.

In the chapter II is shown the theoretical framework of the concepts of automation and instrumentation used in the development of research work.

The chapter III is developed in two parts (storage and dispatch), in which the same methodology is used to solve the problem; this chapter consists of mathematical analysis, obtaining the transfer function, it is proposed the piping and instrumentation diagram and it is also proposed the model and brand for each instrument that is detailed in the piping and instrumentation diagram.

In the chapter IV are determined the costs of the project and, NPV and IRR indicators.

Finally in the chapter V the conclusions that were obtained in the present research work are listed, which indicate that the project is technically and economically viable.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	2
INTRODUCCIÓN.....	3
I. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1. Realidad Problemática	4
1.2. Enunciado del problema	5
1.3. Hipótesis.....	5
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivo específicos	5
1.5. Delimitación del problema	5
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
2.1. Hidrocarburos	6
2.1.1. Origen del petróleo.....	6
2.1.2. Tipos de petróleo.....	7
2.1.3. Etapas de producción del petróleo.....	11
2.1.4. Importancia del petróleo.....	13
2.2. Sistema de control	13
2.3. Tipos de control.....	13
2.3.1. Control a lazo abierto.....	13
2.3.2. Control a lazo cerrado.....	14
2.4. Técnicas de control.....	14
2.4.1. Control On/Off.....	14
2.4.2. Control proporcional.....	15
2.4.3. Control PID.....	15
1. Acción proporcional	15
2. Acción integral.....	16
3. Acción derivativa	16
2.5. Elementos de un sistema de control realimentado.....	17
2.5.1. Elemento primario de medición.....	17

1.	Sensor de presión:.....	18
2.	Sensor de caudal	18
3.	Sensor de nivel	19
4.	Sensor de temperatura	20
2.5.2.	Transmisor	20
2.5.3.	Elemento Final de Control	21
1.	Válvulas de control	21
2.	Bombas	22
2.5.4.	Controlador	22
1.	Controlador lógico programable.....	22
2.	Variador de frecuencia.....	23
2.6.	Buses de Campo.....	23
2.6.1.	HART.....	24
2.6.2.	Profibus.....	25
2.6.3.	Foundation Fieldbus	25
III.	DESARROLLO DE TESIS	26
3.1.	Etapa de Almacenamiento	29
3.1.1.	Filosofía de operación y control	30
3.1.2.	Diagrama de flujo de la secuencia de control	31
3.1.3.	Modelo matemático del lazo de control	32
3.1.4.	Función de Transferencia	36
3.1.5.	Diseño del sistema de control.....	36
3.1.6.	Selección de instrumentación	38
1.	Medición continua de nivel.....	38
2.	Medición de nivel máximos y mínimos.....	40
3.	Control de nivel	42
3.2.	Etapa de despacho	45
3.2.1.	Filosofía de operación y control	46
3.2.2.	Diagrama de flujo de la secuencia de control	47
3.2.3.	Modelo matemático del lazo de control	48
3.2.4.	Función de Transferencia	54
3.2.5.	Diseño del sistema de control.....	60
3.2.6.	Selección de instrumentación	62

1. Medición de presión	62
2. Medición de temperatura	64
3. Medición y control de flujo.....	65
IV. COSTOS DEL PROYECTO	71
4.1. Inversión	71
4.2. Ingresos	73
4.3. Egresos	74
4.4. Flujo de caja y evaluación financiera.....	74
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
5.1. Conclusiones.....	75
5.2. Recomendaciones	75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: Diagrama de torre de craqueo de petróleo.....	12
FIGURA 2.2: Diagrama de control de lazo abierto.....	13
FIGURA 2.3: Diagrama de control de lazo cerrado	14
FIGURA 2.4: Señal de transmisión con protocolo HART.....	24
FIGURA 3.1: Esquema de distribución de la planta de almacenamiento y despacho Olympic Perú	27
FIGURA 3.2: Diagrama de Proceso Olympic Perú en Lote XIII A.....	28
FIGURA 3.3: Esquema de etapa de almacenamiento	29
FIGURA 3.4: Diagrama de flujo para etapa de almacenamiento.....	31
FIGURA 3.5: Diagrama de bloques del sistema de control para la etapa de almacenamiento	32
FIGURA 3.6: Sistema de Nivel de líquidos	34
FIGURA 3.7: Diagrama de instrumentación para la etapa de almacenamiento	37
FIGURA 3.8: Transmisor de nivel tipo radar Rosemount 5400	40
FIGURA 3.9: Interruptor de nivel tipo horquilla vibratoria Rosemount 2120.....	41
FIGURA 3.10: Válvula de control Fisher A81 tipo mariposa	43
FIGURA 3.11: Actuador eléctrico EIM HQ	44
FIGURA 3.12: Esquema de etapa de despacho	45
FIGURA 3.13: Diagrama de flujo para etapa de despacho.....	47
FIGURA 3.14: Diagrama de bloques del sistema de control para la etapa de despacho	48
FIGURA 3.15: Lugar geométrico de raíces – Parámetro P.....	56
FIGURA 3.16: Lugar geométrico de raíces – Parámetro I.....	59
FIGURA 3.17: Gráfica de la señal de entrada y respuesta a la salida del sistema de control para la etapa de despacho.....	60
FIGURA 3.18: Diagrama de instrumentación para la etapa de despacho.....	61
FIGURA 3.19: Transmisor de presión Rosemount 2051	63
FIGURA 3.20: Transmisor de temperatura Rosemount 644	65
FIGURA 3.21: Transmisor de flujo tipo ultrasónico Proline Prosonic Flow 93P ...	66
FIGURA 3.22: Variador de velocidad PowerFlex 400.....	67
FIGURA 3.23: Controlador Lógico Programable MicroLogix 1500	69
FIGURA 3.24: Interface Hombre Máquina PanelView Plus 6	70

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: Clasificación de Crudo según Gravedad API	9
TABLA 2.2: Guía de selección de un sistema de control	17
TABLA 3.1: Coordenadas de ubicación de la planta de almacenamiento y despacho Olympic Peru	26
TABLA 3.2: Variables de la etapa de almacenamiento	29
TABLA 3.3: Listado de instrumentos de etapa de almacenamiento	38
TABLA 3.4: Variables de la etapa de despacho	45
TABLA 3.5: Listado de instrumentos de etapa de despacho.....	62
TABLA 4.1: Listado de precios de instrumentos para etapa de almacenamiento ..	71
TABLA 4.2: Listado de precios de instrumentos para etapa de despacho	72
TABLA 4.3: Listado de precios para equipamiento e instalación del proyecto	72
TABLA 4.4: Listado de precios para obras civiles y sistemas de seguridad.....	73
TABLA 4.5: Costo total del proyecto	73
TABLA 4.6: Flujo de caja proyectado para los tres primeros años de Olympic Perú.....	74
TABLA 4.7: Indicadores de Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno.....	74

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de hidrocarburos está muy diversificado de manera directa e indirecta en un gran número de industrias; por este motivo es importante un adecuado manejo en las diferentes etapas desde explotación hasta el consumidor final.

La empresa OLYMPIC Perú, explota el lote XIII-A, el cual está ubicado en el distrito de pueblo nuevo de colán en la región Piura; del cual obtiene petróleo crudo, que luego es transferido a buques cisterna y trasladado a refinerías. Actualmente el manejo del petróleo no es el adecuado debido a que no posee una correcta infraestructura, depende mucho de la habilidad de sus trabajadores y estos son propensos a errores, lo que genera ineficiencia en el proceso.

En tal sentido la empresa OLYMPIC Perú se encuentra implementando la infraestructura necesaria para el almacenamiento y el despacho de combustible, para lo cual se requerirá un sistema que automatice el proceso estas etapas del proceso. Con lo cual la empresa espera conseguir la reducción de costos de operación, disminución de tiempos de despacho y mayor volumen de despacho.

El presente trabajo es una propuesta para automatizar las etapas de almacenamiento y despacho de la producción del lote XIII-A de la empresa Olympic Perú.

I. DESCRIPCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Realidad Problemática

El 30 de mayo del 1996 la empresa Olympic Perú Inc. sucursal Perú, suscribió un contrato de licencia con el estado peruano para la exploración y explotación de hidrocarburos en el lote XIII A y B. La compañía concentra su inversión en la zona norte de la provincia de Paita, en el denominado Lote XIII-A, donde explora principalmente petróleo y gas. (minem, 2010a)

Actualmente el petróleo obtenido de los pozos de extracción se almacena en baterías de almacenamiento para luego ser embarcado en camiones cisternas hacia el puerto, donde nuevamente son transferidos a barcasas que a su vez será transferida a buques cisterna en altamar.

La forma actual de manipulación del petróleo depende de muchos factores como son disponibilidad de transporte (camiones cisterna y barcasas), horas-hombre, riesgos de derrame y logística relacionada; además si tenemos en cuenta los proyectos existentes de la empresa para incrementar la producción, los factores antes mencionados aumentarían su costo de manera proporcional al aumento del volumen de producción.

En este sentido la empresa tiene planeado implementar una estación de almacenamiento y despacho de petróleo crudo, en un terreno que tiene forma rectangular de 4350 m², el cual está ubicado en Paita a cuatro 4 km. al sudoeste de la desembocadura del río Chira, frente al distrito de Pueblo Nuevo de Colán, en la provincia de Paita, a 200 metros de la orilla del mar y 300 metros al sureste de instalaciones actuales de la empresa. (minem, 2010b)

En estas instalaciones se contará con 3 tanque se de almacenamiento para recepcionar el crudo proveniente de la etapa de extracción, además se instalará un sistema de bombeo para el despacho de petróleo hacia los buques cisterna en altamar. Con esto se pretende mejorar la actual forma en la que se viene manipulando el petróleo por parte de la empresa.

1.2. Enunciado del problema

¿Mejoraría el sistema de almacenamiento y control de despacho de la producción de hidrocarburos de la empresa Olympic Perú en el lote XIII-A, si se implementa un sistema automático de control e instrumentación adecuada en ambas etapas?

1.3. Hipótesis

"El sistema de control automático e instrumentación mejorará la operación del sistema de almacenamiento y despacho de la producción de hidrocarburos en la empresa Olympic Perú en el lote XIII-A"

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de control automático e instrumentación adecuado para el sistema de almacenamiento y despacho de hidrocarburos de la empresa Olympic Perú en el lote XIII-A"

1.4.2. Objetivo específicos

- Diseño y dimensionamiento de un sistema de control e instrumentación para llenado y vaciado de tanques de petróleo.
- Diseño de un sistema de control de caudal e instrumentación para la línea de despacho.
- Realizar el análisis económico de esta propuesta.

1.5. Delimitación del problema

La empresa Olympic Perú Inc. sucursal Perú se encuentra en proceso de buscar alternativas a su actual forma de despacho de combustibles, la cual se realiza mediante el transporte de crudo hasta el puerto de despacho utilizando camiones cisterna; en ese proceso tiene planeado construir un terminal marítimo y amarradero multiboyas para transporte de hidrocarburos del lote XIII-A, en este sentido planea construir una estación de almacenamiento.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Hidrocarburos

Los hidrocarburos están integrados por átomos de carbono e hidrógeno, los primeros disponen un armazón estructural al que se unen los átomos de hidrógeno. Forman el esqueleto básico de las moléculas de la materia orgánica, por lo que también son conocidos como compuestos orgánicos.

Asimismo los podemos encontrar en formaciones geológicas, tanto en estado líquido (denominado comúnmente con el nombre de petróleo) como en estado gaseoso (gas natural). (Olmedo, 2008)

2.1.1. Origen del petróleo

Factores para su formación:

- Ausencia de aire
- Restos de plantas y animales (sobre todo, plancton marino)
- Gran presión de las capas de tierra
- Altas temperaturas
- Acción de bacterias

Los restos de animales y plantas, cubiertos por arcilla y tierra durante muchos millones de años, sometidos por tanto a grandes presiones y altas temperaturas, junto con la acción de bacterias anaerobias (es decir, que viven en ausencia de aire) provocan la formación del petróleo.

El hecho de que su origen sea muy diverso, dependiendo de la combinación de los factores anteriormente citados, provoca que su presencia sea también muy variada: líquido, dentro de rocas porosas y entre los huecos de las piedras; volátil, es decir, un líquido que se vuelve gas al contacto con el aire; semisólido, con textura de ceras. En cualquier caso, el petróleo, de por sí, es un líquido y se encuentra mezclado con gases y con agua.

Al ser un compuesto líquido, su presencia no se localiza habitualmente en el lugar en el que se generó, sino que ha sufrido previamente un movimiento vertical o lateral, filtrándose a través de rocas porosas, a veces una distancia considerable, hasta encontrar una salida al exterior, en cuyo caso parte se evapora y parte se oxida al contactar con el aire, con lo cual el petróleo en sí desaparece, o hasta encontrar una roca no porosa que le impide la salida; entonces se habla de un yacimiento. (Olmedo, 2008)

2.1.2. Tipos de petróleo

La presencia en diversas cantidades de cada uno de los elementos químicos (orgánicos e inorgánicos) que componen el petróleo, determinan sus características particulares como el color, densidad, viscosidad, entre otras, las que nos permiten clasificarlo de diferentes maneras.

Los tipos de petróleo pueden ser determinados de distintos modos en función al criterio que se desee considerar como predominante, siendo los más comunes:

- **Por su composición química:**

Este tipo de clasificación depende estrictamente de la presencia de ciertos componentes químicos en el petróleo, así como de la unión de éstos en elementos más complejos. Su importancia radica en las características particulares que cada uno de estos elementos le añade al petróleo. Así tenemos que se puede clasificar en:

Parafínico: cuyo componente principal es el compuesto químico llamado parafina. Son muy fluidos y de color claro. Proporcionan una mayor cantidad de nafta (usada para obtener solventes de pintura, productos de lavado al seco o gasolinas) y lubricantes que los otros tipos de petróleo en el proceso de refinación.

Nafténicos: siendo sus componentes principales los naftenos y los hidrocarburos aromáticos. Son petróleos muy viscosos y de coloración oscura. Generan una gran cantidad de residuos tras el proceso de refinación.

Mixtos: es decir, con presencia de ambos tipos de compuestos. (Olmedo, 2008)

- **Por su densidad:**

La referencia que sustenta esta clasificación es la gravedad API (del Instituto de Petróleo Americano), que es una “medida de densidad”.

La densidad es una propiedad física que mide la cantidad de masa contenida en un determinado volumen. Por ejemplo, si comparamos 1 kg de ladrillos con 1 kg de plumas tendremos que los ladrillos ocuparán un espacio menor que las plumas, y esto se debe a que los ladrillos tienen una mayor densidad, en otras palabras, ocupan una mayor cantidad de masa en un espacio menor.

La Gravedad API se basa en la comparación de la densidad del petróleo con la densidad del agua, es decir, se busca determinar si el petróleo es más liviano o pesado que ésta última. La clasificación propuesta por el Instituto de Petróleo Americano indica que a una mayor gravedad API el petróleo será más liviano, como se puede ver en el siguiente cuadro.

TABLA 2.1: Clasificación de Crudo según Gravedad API

FUENTE: American Petroleum Institute - 2014

PETROLEO CRUDO	DENSIDAD (g/cm³)	GRAVEDAD API
Extrapesado	> 1.0	10
Pesado	1.1 - 0.92	10.1 - 22.3
Mediano	0.93 - 0.87	22.4 - 31.1
Ligero	0.88 - 0.83	31.2 – 39
Superligero	< 0.83	> 39

Cabe indicar que los petróleos ligeros son también los más requeridos en el mercado, y al mismo tiempo los de mayor precio, ya que los costos tanto de extracción como de refinación son menores en comparación con petróleos pesados. Así, se da una relación directa entre la gravedad API y la calidad del petróleo, petróleos más ligeros tienen una mayor calidad, y requieren de menores costos para ser aprovechados que aquellos más pesados. (Olmedo, 2008)

- **Por la presencia de azufre:**

Como mencionamos en un inicio, el azufre es uno de los componentes que están presentes en los hidrocarburos. Pero su presencia en los hidrocarburos implica la necesidad de mayores procesos de refinamiento, y por ende un mayor costo final, razón por la cual la presencia de azufre es también un determinante del valor comercial del petróleo.

Así, tenemos que el petróleo puede clasificarse de 2 formas:

Petróleo Dulce (Sweet Crude Oil): es aquel que contiene menos de 0.5% de contenido sulfurado, es decir, con presencia de azufre. Es un petróleo de alta calidad y es ampliamente usado para ser procesado como gasolina.

Petróleo Agrio (Sour Crude Oil): es aquel que contiene al menos 1% de contenido sulfuroso en su composición. Debido a la mayor presencia de azufre su costo de refinamiento es mayor, razón por la cual es usado mayormente en productos destilados como el diesel, dado su menor costo de tratamiento.

Las tres formas generales de categorización antes mencionadas nos permiten establecer criterios básicos para determinar la calidad del petróleo, las cuales influirán finalmente en la determinación de los precios de cada uno de ellos.

En el mundo existen alrededor de 161 zonas petroleras, cada una de ellas produciendo petróleo de diferentes características. No obstante, es común determinar el precio de mercado de la producción de una zona en comparación con aquel petróleo referencial que se encuentra próximo geográficamente.

Así, por ejemplo, el petróleo de Dubai es usado como referencia en el Oriente Medio, el Minas y el Tapis (de Malasia e Indonesia respectivamente) son usados como referencia en el Lejano Oriente, y así sucesivamente.

Pero sin duda los dos petróleos referenciales más conocidos y de uso difundido en el mundo son el West Texas Intermediate (o mayormente conocido como WTI) y el Brent Blend (o Brent), el primero de ellos producido en Norteamérica y el otro en el Mar del Norte. (Olmedo, 2008)

Cuáles son sus características:

El **West Texas Intermediate (WTI)**, es un promedio en cuanto a calidad se refiere del petróleo producido en los campos occidentales de Texas (EE.UU.). Es un petróleo ligero (39.6° de gravedad API) y dulce (0.24% de contenido sulfuroso). Su alta calidad lo hace ideal para la producción de gasolinas y es usado como valor de referencia sobre todo en el mercado norteamericano (por ejemplo en los mercados de New York).

El **Brent Blend (o Brent)**, es una combinación de crudos de 19 diferentes campos de explotación petrolera localizados en el Mar del Norte, cuyas producciones se envían hacia la terminal de Sullom Voe (Escocia) para su posterior comercialización. Su gravedad API es de 38.3° y contiene alrededor de 0.37% de contenido sulfuroso, lo cual hace de él un petróleo ligero y dulce, pero en menor escala que el WTI, siendo ideal para la producción de gasolinas y destilados intermedios. Es usado como precio de referencia en los mercados de Europa (por ejemplo, en el Internacional Petroleum Exchange – IPE – de Londres), en África y Oriente Medio.

No obstante, podríamos considerar también la Bolsa de Crudos de la OPEP, cuya bolsa de 11 crudos producidos por sus países miembros es un valor referencial para el precio en el Oriente Medio, así como para los mercados internacionales.

Finalmente es importante recalcar que no todos los petróleos tienen el mismo precio en el mercado mundial, como hemos visto, las características propias del producto determinan su calidad y de allí su precio (Olmedo, 2008).

2.1.3. Etapas de producción del petróleo

La necesidad de producción de hidrocarburos es tan grande que el hombre se ve en la necesidad de ir desarrollando nuevas tecnologías que le permitan extraer hidrocarburos de sitios muy particulares, especialmente en fuera de la costa donde la profundidad del agua puede ser mayor a los 10.000 pies (3048 metros).

Exploración:

Implica la búsqueda de yacimientos petrolíferos, así como el uso de técnicas geológicas de campo y de laboratorio con el fin de probar y calcular las posibles reservas que contienen.

Explotación o producción del crudo:

Es la fase que permite obtener el petróleo crudo, es decir, sin procesar. Abarca la operación de los campos localizados, la perforación de los pozos, la preparación de tuberías y centros de acopio y el manejo de oleoductos, transporte marítimo, entre otros procesos.

Refinación:

Comprende los procesos físico-químicos que permiten obtener los productos derivados del petróleo, como el GLP, gasolinas, el Kerosene, aceite ligero, asfalto, etc.

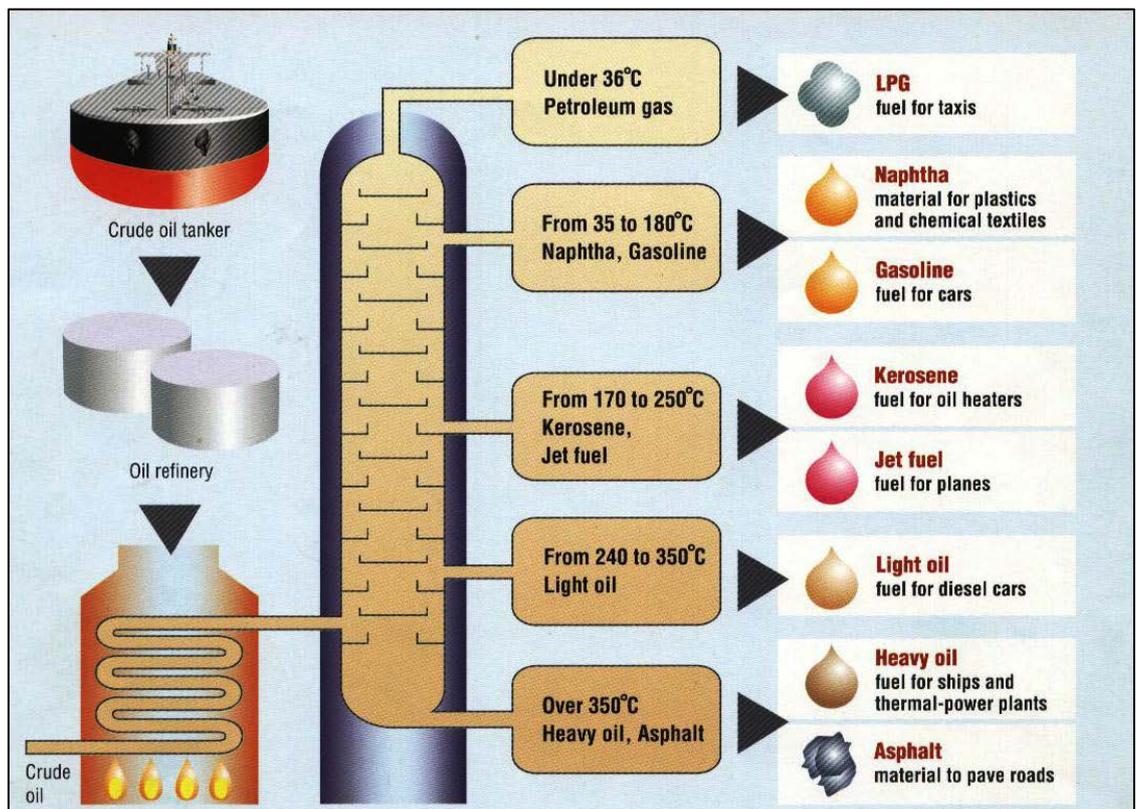


FIGURA 2.1: Diagrama de torre de craqueo de petróleo

FUENTE: Bardahl - 2014

Mercadeo:

Es la colocación del petróleo en el mercado consumidor, tanto a nivel del mercado interno, para satisfacer la demanda del país en materia petrolera, como en los mercados internacionales (Santaella, 2010).

2.1.4. Importancia del petróleo

El petróleo constituye una significativa fuente de energía, de uso industrial y doméstico que genera grandes ingresos económicos.

Debido a la importancia fundamental para la industria manufacturera y el transporte, el incremento del precio del petróleo puede ser responsable de grandes variaciones en las economías locales y provoca un fuerte impacto en la economía global.

2.2. Sistema de control

Se puede definir control como la manipulación indirecta de las magnitudes de un sistema llamado planta a través de otro sistema llamado “sistema de control”, para que su comportamiento sea el deseado.

2.3. Tipos de control

El conjunto de elementos que permiten llevar y mantener una variable en un valor deseado se denomina lazo o bucle de control; para el cual existen dos formas de efectuar el control de un proceso: a lazo abierto o a lazo cerrado, del cual la forma más simple de controlar un proceso es a lazo abierto.

2.3.1. Control a lazo abierto

En este sistema de control, a lazo abierto, no se realizan acciones de control de manera automática. La salida del elemento final de control es manipulada por el operador para aplicar al proceso la cantidad de energía requerida para lograr una determinada salida bajo ciertas condiciones.

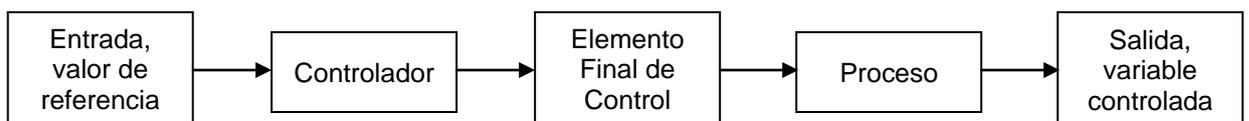


FIGURA 2.2: Diagrama de control de lazo abierto

FUENTE: Elaboración propia

2.3.2. Control a lazo cerrado

En este tipo de control, se compara el valor de la variable o condición con un valor deseado y de forma automática, sin intervención de un operador, toma una acción correctiva de acuerdo a la desviación existente. Lo que se hace a través del lazo es mantener la variable controlada en el valor deseado, midiendo y evaluando las variables de interés durante el transcurso del proceso.

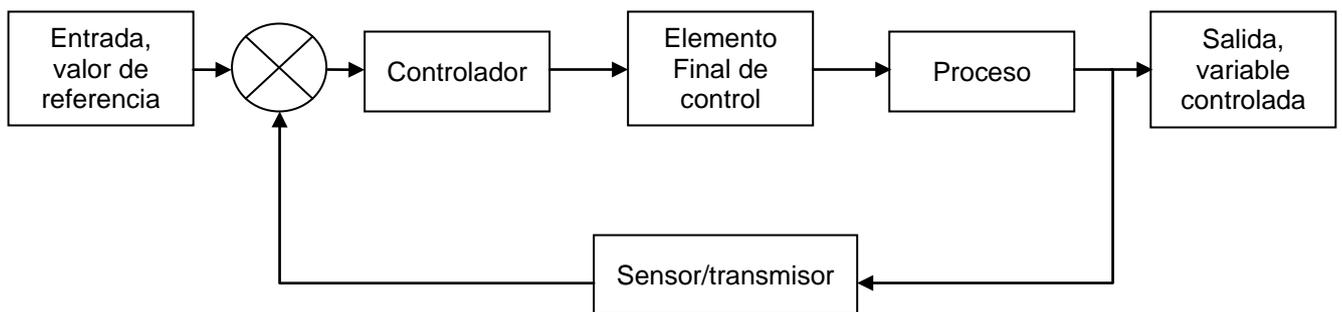


FIGURA 2.3: Diagrama de control de lazo cerrado

FUENTE: Elaboración propia

2.4. Técnicas de control

Son todos aquellos procedimientos aplicados en la programación de un controlador industrial, para que a partir de una señal de error generada en la variable de control sea procesada a través de un algoritmo de control con la finalidad de determinar una señal de control el cual sea capaz de eliminar o de reducir notablemente el valor de la señal de error y poder lograr la máxima precisión posible.

2.4.1. Control On/Off

Conocido también como Control TODO-NADA o control de dos posiciones, es en donde el elemento final de control (actuador) tiene únicamente dos posiciones fijas las cuales se mueve de manera rápida de acuerdo con el valor de la variable controlada. Es un esquema de control muy utilizado por su simplicidad y bajo costo de implementación.

2.4.2. Control proporcional

En un esquema de control proporcional, existe una relación lineal continua entre la salida del controlador y la variable controlada. Básicamente, si la diferencia que existe entre la variable del proceso y el punto de ajuste es muy grande, se debe generar una acción de control mayor; y si es pequeña, sólo se deberá corregir muy poco, por lo que la salida del controlador es proporcional a la magnitud de error.

2.4.3. Control PID

El control proporcional tiene la desventaja de que, en la mayoría de casos, resulta en un error estático o de estado estacionario diferente de cero. Los algoritmos de control usados en la práctica son, por tanto, normalmente más complejos que el del controlador proporcional. Se puede mostrar de manera empírica que el llamado controlador PID es una estructura útil. Dentro de la banda proporcional el comportamiento del algoritmo PID puede describirse como:

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Donde “u” es la variable de control y “e” es el error de control. De esta manera, la variable de control es una suma de tres términos: el término P, que es proporcional al error; el término I, que es proporcional a la integral del error; y el término D, que es proporcional a la derivada del error. Los parámetros del controlador son: la ganancia proporcional K_p , el tiempo integral T_i , y el tiempo derivativo T_d .

1. Acción proporcional

Genera una señal de control que es proporcional a la señal de error producida.

En un control proporcional existe una relación lineal continua dentro de una denominada banda proporcional, entre el valor de la variable controlada y la condición en que deberá encontrarse el actuador.

La banda proporcional viene a ser la inversa de la ganancia proporcional, y se define como el porcentaje de variación de la variable controlada necesaria para completar una carrera completa en el actuador.

En el control proporcional a mayor valor de la ganancia proporcional mayor será la señal de control generada, permitiendo el aumento de la ganancia proporcional, disminuirá el error en estado estacionario.

2. Acción integral

El control integral genera una señal de control que es proporcional a la integral de la señal de error.

La finalidad principal de la acción integral es hacer que la variable controlada en estado estacionario sea igual al valor de referencia es decir obtener un error estacionario nulo, permitiendo además mantener constante la señal de control cuando la señal de control llegue a ser cero.

3. Acción derivativa

La acción derivativa genera una señal de control que es proporcional a la derivada de la señal de error producida, en esta acción existe una relación lineal continua entre la velocidad de variación de la variable y la condición en que deberá encontrarse el elemento final de control. El control derivativo determina las características dinámicas de la señal de error (crecimiento o decrecimiento) produciendo una corrección antes de que la señal de error se haga excesiva, a este efecto se le denomina acción anticipativa.

TABLA 2.2: Guía de selección de un sistema de control

FUENTE: Instrumentación industria, A. Creus - 1997

Control	Aplicaciones
Todo-Nada	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad.
Proporcional	Presión, temperatura y nivel donde el offset no es inconveniente.
Proporcional + Integral	La mayor parte de aplicaciones, incluyendo el caudal.
Proporcional + Derivada	Cuando es necesaria una gran estabilidad con un offser mínimo y sin necesidad de acción integral.
Proporcional + Integral + Derivada	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperaturas en intercambiador de calor).

2.5. Elementos de un sistema de control realimentado

2.5.1. Elemento primario de medición

Es un elemento que utiliza o transforma energía del medio controlado para producir una respuesta a un cambio en el valor de la variable controlada. Esta respuesta producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, potencial, eléctrico, resistencia, etc.

Los sensores pueden clasificarse de diferentes maneras por sus características o funcionamiento, a continuación se enumeran algunas tipos de clasificación:

- La primera clasificación se basa en si son capaces de dar una salida continua en función de la magnitud que miden o únicamente distinguen entre dos estados del sistema medido. Según esto los sensores pueden ser binarios (detectores) o continuos (transductores).
- En segundo lugar se pueden clasificar en función de la forma de

alimentación, conexionado y salida. Según esto pueden ser a 3 hilos, a 2 hilos, de corriente alterna, de corriente continua, de salida a transistor, de salida a relé, etc.

- En tercer lugar se pueden clasificar en función de la seguridad. Según esto los sensores pueden ser estándar o cumplir diversos grados de seguridad ante ambientes explosivos, o ante situaciones de riesgo para las personas.
- Otra forma de clasificar los sensores es en base a la variable que va a ser controlada, así se tienen por ejemplo:

1. Sensor de presión:

Los sensores de presión suelen estar basados en la deformación de un elemento elástico (membrana, tubo de Bourdon, etc), cuyo movimiento bajo la acción del fluido es detectado por un transductor de pequeños desplazamientos (galgas, transformador diferencial, piezoeléctrico, etc) del que se obtiene la señal eléctrica proporcional a la presión.

Los transductores más frecuentes son los de diafragma o membrana. El diafragma es una pared delgada que se deforma bajo el efecto de la presión, el fluido de proceso al ejercer presión sobre el diafragma del equipo esta se transfiere mediante el fluido de relleno hacia un elemento piezoresistivo, generando una variación a la resistencia la cual permite un cambio en el valor medido. Algunas unidades de medición de presión son el psi, bar, pascal, atmosfera, etc.

2. Sensor de caudal

Los sensores de caudal se basan en distintos principios según se trate de fluidos compresibles o incompresibles. El caudal puede definirse como masa por unidad de tiempo (caudal másico) o como volumen por unidad de tiempo (caudal volumétrico). El caudal volumétrico depende sólo de la sección considerada y de la velocidad del fluido, pero el caudal másico depende además de la densidad del fluido y esta a su vez de la presión y temperatura del

mismo. Algunos métodos de medición de caudal másico utilizan el principio de coriolis y térmico, mientras que los de caudal volumétrico son de tipo magnético, vortex, turbina y ultrasónico.

El sensor ultrasónico opera bajo el principio de diferencia de tiempo de transito. En este método de medición son transmitidas señales acústicas (ultrasónicas) a través de dos sensores. Las señales son enviadas en ambas direcciones (el mismo sensor trabaja como transmisor y receptor de sonido).

Debido a que la velocidad de propagación de las ondas es menor cuando viajan contra la dirección del flujo que en la dirección del flujo, ocurre una diferencia en el tiempo de transito, la cual es directamente proporcional a la velocidad del fluido.

El sistema de medición utiliza esta diferencia en la velocidad del fluido y el valor del área transversal de la tubería para calcular el flujo del fluido de proceso.

3. Sensor de nivel

Los sensores de nivel trabajan midiendo, bien directamente la altura del líquido sobre una línea de referencia, bien la presión hidrostática, bien el desplazamiento producido en un flotador por el propio líquido contenido en el tanque de proceso, o bien aprovechando características eléctricas del líquido.

Los sensores de nivel más comúnmente utilizados en la industria son los de presión hidrostática, ultrasónicos, radiación, desplazadores, conductivos, capacitivos, horquilla vibratoria y radares.

El sensor tipo radar funciona midiendo la distancia a la superficie por medio de pulsos cortos de radar, se transmiten desde la antena (parte superior del tanque). Cuando un pulso de radar alcanza un medio con una constante dieléctrica diferente, parte de la energía se refleja y vuelve al transmisor. La diferencia de tiempo entre el pulso transmitido y el reflejado es proporcional a la distancia de la superficie del producto, a partir de la cual se calculan el nivel, el volumen y la velocidad de variación del nivel.

El sensor de tipo horquilla vibratoria utiliza un cristal piezoeléctrico que oscila en sus horquillas a una frecuencia natural, esta frecuencia se monitorea continuamente. La frecuencia de la horquilla cambia dependiendo del medio en el que está inmerso. Cuanto más denso es el líquido, menor será la frecuencia.

4. Sensor de temperatura

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes e importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, la velocidad de captación, la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor, etc.

Los instrumentos de temperatura utilizan diversos fenómenos que son influidos por la temperatura, entre los cuales figuran variaciones en volumen, variación de resistencia de un conductor o semiconductor, f.e.m. creada en la unión de dos metales distintos, intensidad de radiación total emitida por el cuerpo, etc.

De este modo se utilizan para la medición los termómetros de vidrio, termómetros bimetalicos, pirómetros de radiación, las termocuplas y los termómetros de resistencia (RTD) entre otros.

Un RTD (del inglés: resistance temperature detector) es un detector de temperatura resistivo, es decir, un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Al calentarse un metal habrá una mayor agitación térmica, dispersándose más los electrones y reduciéndose su velocidad media, aumentando la resistencia. A mayor temperatura, mayor agitación, y mayor resistencia.

2.5.2. Transmisor

Es aquel elemento que capta la variable de proceso a través del elemento primario y la transmite a distancia en forma de señal normalizada como por ejemplo:

- Señal neumática de 3 a 15 psi
- Señal electrónica de 4-20 mA
- Señal electrónica wireless HART
- Señal electrónica de 0-10 Vdc

En algunos casos el elemento primario puede formar parte integral del transmisor.

2.5.3. Elemento Final de Control

Un elemento final de control es un mecanismo que altera el valor de la variable manipulada en respuesta a una señal de salida desde el dispositivo de control automático; típicamente recibe una señal del controlador y manipula un flujo de material o energía para el proceso.

El elemento final de control consta generalmente de dos partes:

- Un actuador que convierte la señal del controlador en un comando para el dispositivo manipulador.
- Un mecanismo para ajustar la variable manipulada.

El elemento final de control puede ser una válvula de control, variadores de frecuencia y motores eléctricos, una servoválvula, un relé, elementos calefactores de carácter eléctrico o un amortiguador.

1. Válvulas de control

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área variable.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a

la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

Algunas de las válvulas más utilizadas en la industria son las de tipo globo, bola, mariposa, tres vías, de ángulo, compuerta, cuchilla, etc.

2. Bombas

La bomba es una máquina que absorbe energía mecánica que puede provenir de un motor eléctrico, térmico, etc., y la transforma en energía que la transfiere a un fluido como energía hidráulica la cual permite que el fluido pueda ser transportado de un lugar a otro, a un mismo nivel y/o a diferentes niveles y/o a diferentes velocidades. Las bombas se clasifican en tres grandes grupos; centrífugas, rotatorias y reciprocantes.

2.5.4. Controlador

Es el elemento más importante dentro de un sistema de control realimentado y tiene por finalidad, en base a las señales de error obtenidas, generar señales de control producidas a través de la aplicación de técnicas de control en el modelado de sistemas. Estas señales de control deben permitir reducir o eliminar el error producido.

1. Controlador lógico programable

Es un dispositivo digital electrónico con una memoria programable para el almacenamiento de instrucciones, permitiendo la implementación de funciones específicas como ser: lógicas, secuenciales, temporizadas, de conteo y aritméticas; con el objeto de controlar máquinas y procesos.

También se puede definir como un equipo electrónico, el cual realiza la ejecución de un programa de forma cíclica. La ejecución del programa puede ser interrumpida momentáneamente para realizar otras tareas consideradas más prioritarias, pero el aspecto más importante es la

garantía de ejecución completa del programa principal. Estos controladores son utilizados en ambientes industriales donde la decisión y la acción deben ser tomadas en forma muy rápida, para responder en tiempo real.

Los PLC son utilizados donde se requieran tanto controles lógicos como secuenciales o ambos a la vez.

2. Variador de frecuencia

Es un dispositivo utilizado para controlar la velocidad de rotación de un motor de c.a. o de inducción. Este tipo de motores también se conocen como motores asíncronos o en jaula de ardilla.

El variador de velocidad se coloca entre la red y el motor. El variador recibe la tensión de red a la frecuencia de red y tras convertirla y después ondularla produce una tensión con frecuencia variable. La velocidad de un motor va prácticamente proporcional a la frecuencia. Además de cambiar la frecuencia, el variador también varía el voltaje aplicado al motor para asegurar que existe el par necesario en el eje del motor sin que surjan problemas de sobrecalentamiento.

2.6. Buses de Campo

Los buses de campo son tecnologías y protocolos de comunicación utilizados en automatización y control de procesos en industrias, existen dos tipos: propietarios y abiertos. Los propietarios son propiedad intelectual de una compañía en particular y restringe su uso a una sola marca de equipos. En cambio los buses abiertos son:

- Interconectables, porque dispositivos de diferentes fabricantes pueden ser conectados con seguridad al mismo bus.
- Interoperables, porque pueden conectarse exitosamente entre dispositivos de diferentes proveedores.
- Intercambiables, porque los dispositivos provenientes de una firma pueden ser reemplazados con dispositivos funcionalmente equivalentes de otras firmas.

Los buses de campo con mayor presencia en el área de control y automatización de procesos son:

- HART
- Profibus
- Foundation Fieldbus

2.6.1. HART

El protocolo HART (Highway Addressable Remote Transducer) agrupa la información digital sobre la señal analógica típica de 4 a 20 mA DC. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz, que representan los dígitos 1 y 0 respectivamente y que en conjunto forman una onda sinusoidal que se superpone al lazo de corriente de 4-20 mA.

Como la señal promedio de una onda sinusoidal es cero, no se añade ninguna componente DC a la señal analógica de 4-20 mA, lo que permite continuar utilizando la variación analógica para el control del proceso.

Este protocolo aún no siendo un bus de campo en sí, pues los instrumentos se cablean a los módulos de entrada/salida de un sistema de control, tiene una funcionalidad asimilable, en cuanto a la gestión y configuración que permite sobre los equipos. (HARTcomm, 2014)

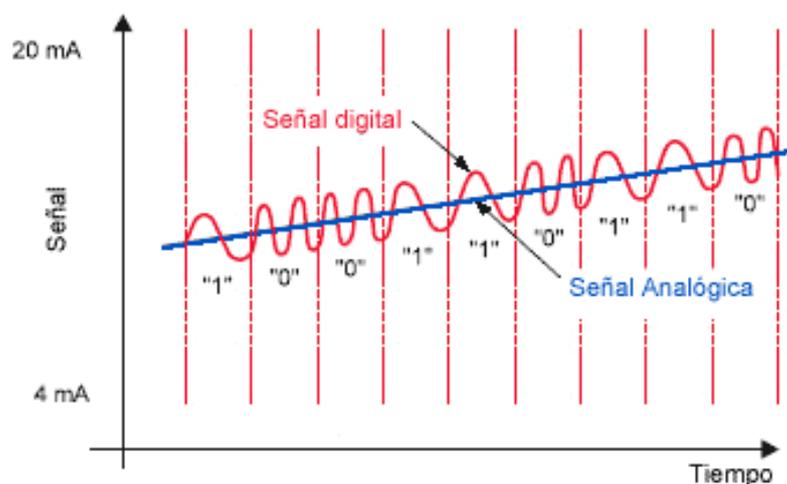


FIGURA 2.4: Señal de transmisión con protocolo HART

FUENTE: hartcomm - 2014

2.6.2. Profibus

(Process Field Bus) Norma internacional de bus de campo de alta velocidad para control de procesos normalizada en Europa por EN 50170.

Existen tres perfiles:

- Profibus DP (Decentralized Periphery). Orientado a sensores/actuadores enlazados a procesadores (PLCs) o terminales.
- Profibus PA (Process Automation). Para control de proceso, cumple normas especiales de seguridad para la industria química (IEC 11158-2, seguridad intrínseca).
- Profibus FMS (Fieldbus Message Specification). Para comunicación entre células de proceso o equipos de automatización.

2.6.3. Foundation Fieldbus

Foundation Fieldbus (FF) es un protocolo de comunicación digital para redes industriales, específicamente utilizado en aplicaciones de control distribuido. Puede comunicar grandes volúmenes de información, ideal para aplicaciones con varios lazos complejos de control de procesos y automatización. Está orientado principalmente a la interconexión de dispositivos en industrias de proceso continuo. Los dispositivos de campo son alimentados a través del bus Fieldbus cuando la potencia requerida para el funcionamiento lo permite.

III. DESARROLLO DE TESIS

El proyecto se ubica al norte de la Bahía de Paita a cuatro 4 Km. al sudoeste de la desembocadura del río Chira. Está ubicado frente al distrito de Pueblo Nuevo de Colán, en la provincia de Paita, Departamento de Piura.

El área de la estación de almacenamiento y despacho se detalla con las coordenadas en coordenadas UTM que se presente en el cuadro a continuación:

TABLA 3.1: Coordenadas de ubicación de la planta de almacenamiento y despacho
Olympic Peru

FUENTE: Olympic Perú - 2013

VÉRTICE	UMT	
	NORTE	ESTE
A	9'456,325.26	485,775.86
B	9'456,301.02	485,819.59
C	9'456,224.93	485,777.41
D	9'456,249.17	485,733.68
Área= 4,350 m ²		
Perímetro= 274 m		

La estación contará con 3 tanques de almacenamiento de petróleo crudo de 45 pies de diámetro y 40 pies de altura, cada uno con capacidad útil de 10,000 bbl y estarán confinados en un área estanca impermeabilizada con geomembrana, rodeada de un muro de contención de concreto armado de 15 cm, con capacidad de almacenamiento no menor al 110% del volumen del tanque, además la estación contará con un sistema de canaletas para encausar los drenajes pluviales.

Los tanques serán del tipo vertical fabricados según el estándar API 650 10^a Edición, de fondo y techo cónico fijo soportado por estructura interna de perfiles y tubería, con arreglos mecánicos para escalera en espiral, pasarela en techo con baranda, drenaje de fondos, bloqueador de vorticidad, boquillas para instrumentos de nivel y sistema contra incendio.

La línea de alimentación ó llenado de los Tanques será de 8" diámetro. Los tanques irán montados sobre una base del tipo anillo, el área interna del anillo será rellena con arena y geomembrana que impide la filtración hacia el suelo inferior, además contarán con control de fugas en el fondo.

Cada tanque descargará hacia un colector común de 8" que se conectará a la succión de las bombas de transferencia.



FIGURA 3.1: Esquema de distribución de la planta de almacenamiento y despacho
Olympic Perú

FUENTE: Olympic Perú - 2013

La estación de bombeo se encontrará ubicada a un lado del puente de medición. Los tableros de control serán instalados al lado de las bombas de transferencia y los cables serán tendidos por canaletas de concreto cubiertas con rejillas de plancha estriada; toda la estación será cubierta por un techado, iluminado con lámpara explosion Proof.

Las Bombas de Transferencia serán 2; una operativa y otra de reserva, serán del tipo centrífugo horizontal monoetapa, diseñadas para poder transportar 900 gpm @ 150 psi arrastradas por un motor de 50 Hp, 3F, 400 V C.A. 60 Hz.

El proceso que planea implementar la empresa se puede apreciar en el siguiente esquema:

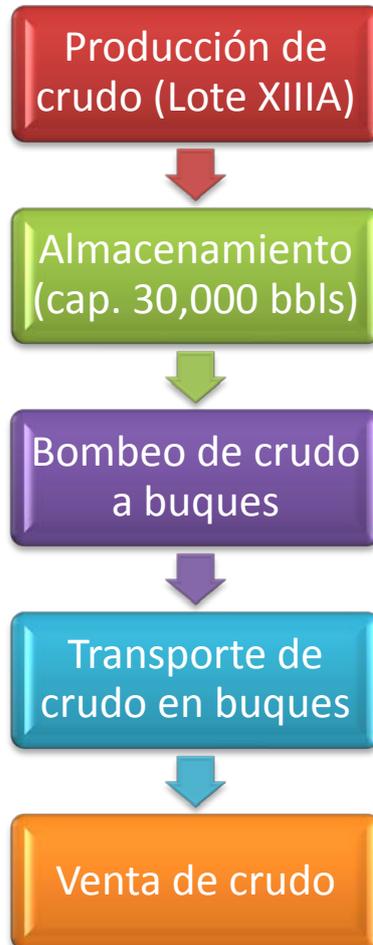


FIGURA 3.2: Diagrama de Proceso Olympic Perú en Lote XIII A

FUENTE: Olympic Perú - 2013

La empresa tiene planeado despachar los 30 000 barriles a un caudal de 900 gpm, con lo cual el despacho del lote se haría en aproximadamente 24 horas.

En base a lo descrito anteriormente y unido a los objetivos trazados en el presente trabajo, se observa claramente dos etapas del proceso, por lo cual se diseñarán dos subsistemas de control que permitan una mejor comprensión, análisis y solución del problema. El sistema se divide en dos etapas almacenamiento y despacho.

3.1. Etapa de Almacenamiento

Consta de la recepción de crudo de petróleo, los tanques de almacenamiento, el medidor de nivel, los interruptores de nivel y válvulas de entrada y salida de los tanques, la variable controlada para esta etapa será el nivel de crudo de petróleo en los tanques de almacenamiento. En esta etapa se utilizará el protocolo de comunicación HART, por las siguientes razones: es un protocolo abierto, fácil de implementar debido a que se presenta mayor conocimiento y manejo, y permite el diagnóstico de fallas en el instrumento.

TABLA 3.2: Variables de la etapa de almacenamiento

FUENTE: Elaboración propia

Variable Manipulada	Flujo de entrada al tanque de almacenamiento.
Variable Controlada	Nivel de fluido en tanque de almacenamiento.

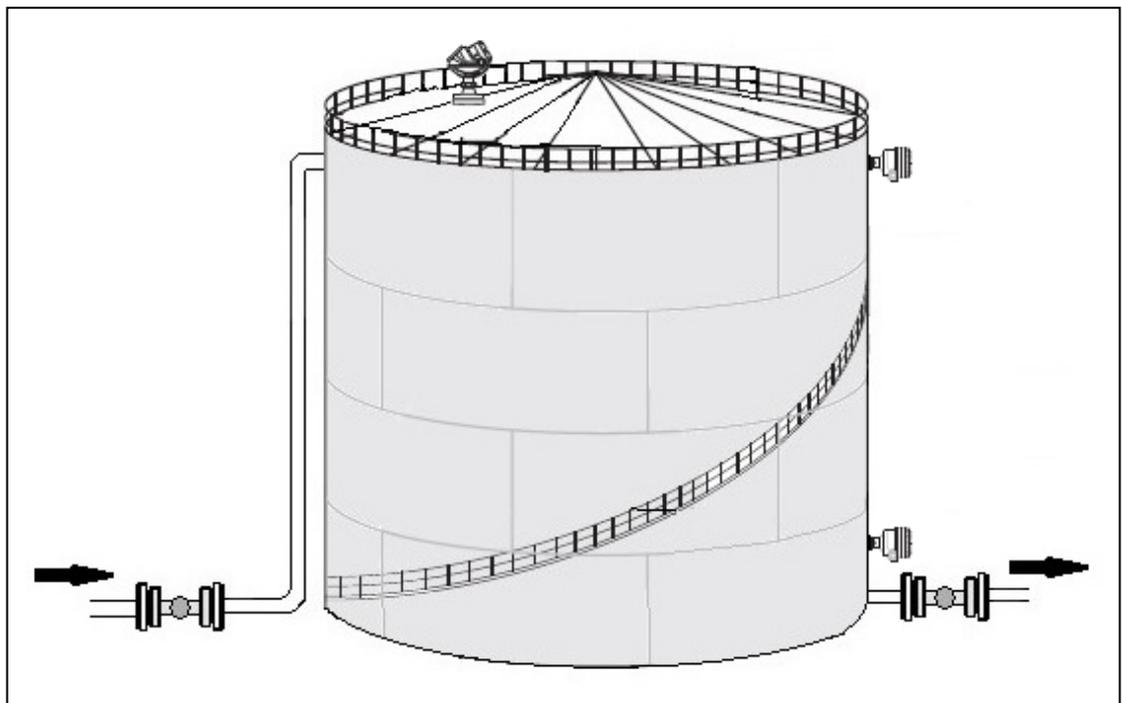


FIGURA 3.3: Esquema de etapa de almacenamiento

FUENTE: Elaboración propia

3.1.1. Filosofía de operación y control

La línea de ingreso para el llenado de los tres tanques será controlada por una lógica secuencial y un lazo de control de nivel, programado en un PLC, para lo cual cada tanque contará con un transmisor de nivel y una válvula de control.

La señal de cada transmisor de nivel será enviada al PLC, este tendrá una lógica de control que hará actuar a las válvulas para direccionar la producción a sus respectivos tanques.

En caso que los tres tanques se encuentren vacíos, la válvula de llenado del primer tanque se encontrará abierta, una vez lleno el tanque, la válvula será cerrada y en su momento se abrirá la válvula del segundo tanque; en caso continúe ingresando la producción, esta misma secuencia de llenado será para el tercer tanque.

El PLC comandará la apertura de la válvula de cada tanque que se encuentre vacío o en etapa de llenado, acondicionando el programa para respetar el orden de secuencia y que solamente este activada una válvula.

3.1.2. Diagrama de flujo de la secuencia de control

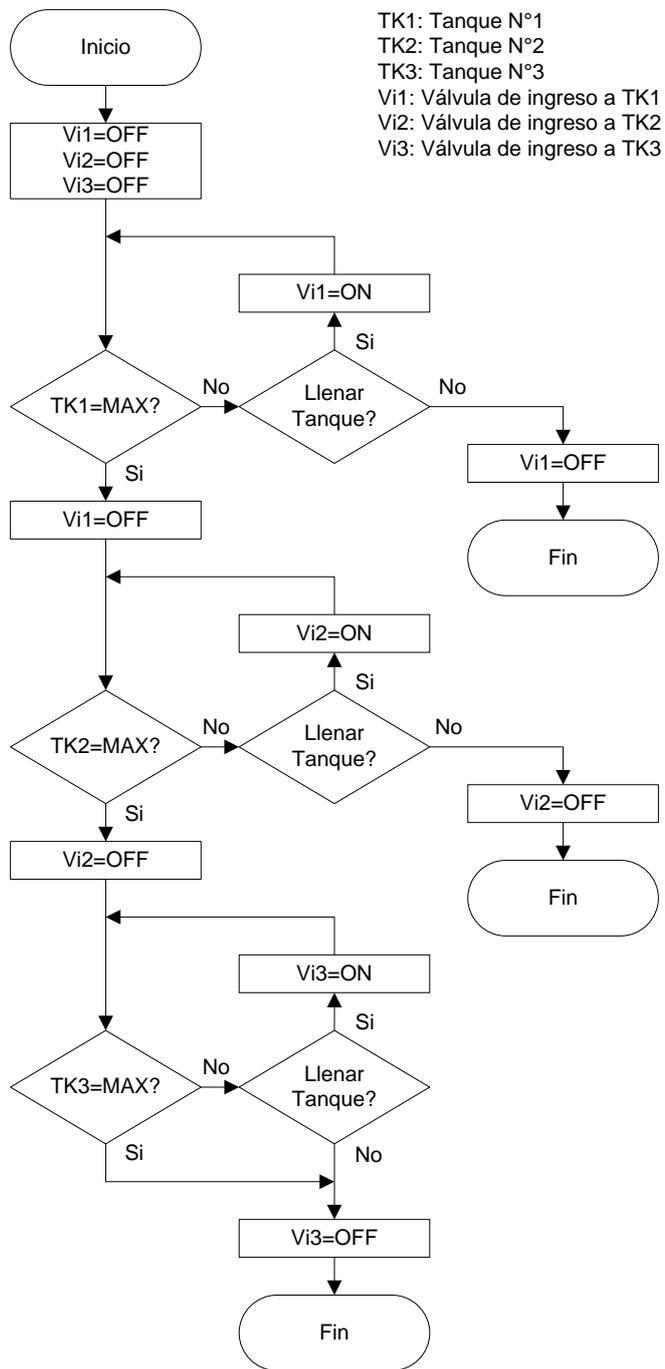


FIGURA 3.4: Diagrama de flujo para etapa de almacenamiento

FUENTE: Elaboración propia

3.1.3. Modelo matemático del lazo de control

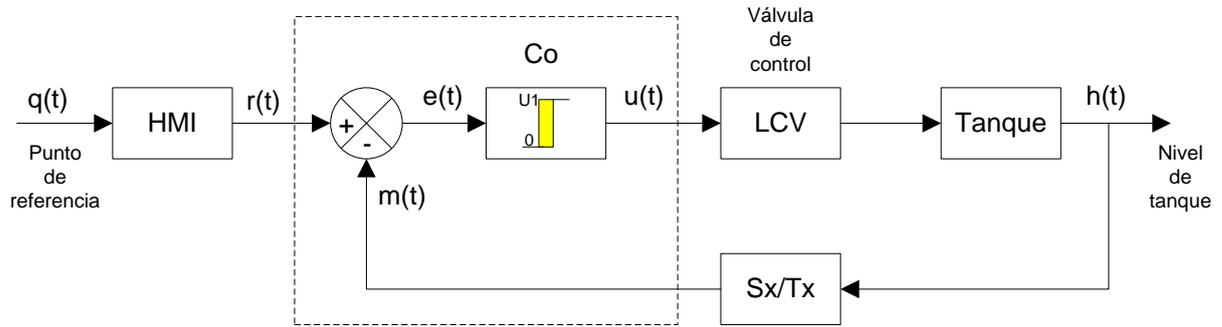


FIGURA 3.5: Diagrama de bloques del sistema de control para la etapa de almacenamiento

FUENTE: Elaboración propia

- a) Señal de error: El nivel se compara con el nivel programado (set).

$$e(t) = r(t) - m(t) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 1)}$$

r(t): Punto de referencia.

m(t): Señal del Transmisor.

- b) Acción de encendido y apagado

$$u(t) = \begin{matrix} \mathbf{U1}; & e(t) > \mathbf{0} \\ \mathbf{0}; & e(t) < \mathbf{0} \end{matrix} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 2)}$$

- c) La señal u(t) viene a ser la tensión de alimentación que se da al actuador eléctrico de la válvula.

$$u(t) = v \dots\dots\dots \text{(Ecuación 3)}$$

- d) La tensión aplicada enciende el motor eléctrico del actuador, el cual genera el torque necesario para girar el vástago de la válvula ON/OFF (Abierta o cerrada), produciendo Velocidad de flujo.

$$Qv = \begin{matrix} \mathbf{1}; & v > \mathbf{0} \\ \mathbf{0}; & v < \mathbf{0} \end{matrix} \dots\dots\dots \text{(Ecuación 4)}$$

- e) Para iniciar el estudio de nivel de líquidos es necesario definir los conceptos de resistencia al flujo y capacitancia en un tanque que almacena un fluido.

La resistencia al flujo debido a una restricción es lineal cuando el flujo es laminar y se comporta como un sistema no lineal cuando el flujo es turbulento. En ambos casos se define como el cociente de la diferencia de niveles en el recipiente entre el cambio en el gasto.

$$R = \frac{\text{Cambio en la diferencia de niveles [m]}}{\text{Cambio en el gasto [m}^3\text{/seg]}}$$

Si el flujo a través de esta restricción es laminar, la relación entre la velocidad del flujo en estado estable y la altura en estado estable en el nivel de restricción se obtiene.

$$Q = KH \dots \dots \dots \text{(Ecuación 5)}$$

Q: Velocidad de Flujo del liquido en estado estable, m³/seg.

K: Coeficiente en m²/seg.

H: Altura en estado estable m.

Para el flujo laminar, la resistencia R_t se obtiene como:

$$R_t = \frac{dH}{dQ} = \frac{H}{Q}$$

Para flujo turbulento es proporcional a la raíz cuadrada la altura en estado estable.

$$Q = K\sqrt{H} \dots \dots \dots \text{(Ecuación 6)}$$

Donde:

Q = gasto en [m³/seg].

K = coeficiente de proporcionalidad para flujo turbulento [m^{2.5}/seg].

H = Altura en estado estable m.

La resistencia R_t para el flujo turbulento se obtiene a partir de:

$$R_t = \frac{dH}{dQ}$$

De la ecuación 6 se obtiene:

$$dQ = \frac{K}{2\sqrt{H}} dH$$

$$\frac{dH}{dQ} = \frac{2\sqrt{H}}{K} = \frac{2\sqrt{H} \sqrt{H}}{Q} = \frac{2H}{Q}$$

Por lo tanto:

$$R_t = \frac{2H}{Q}$$

$$Q = \frac{2H}{R_t}$$

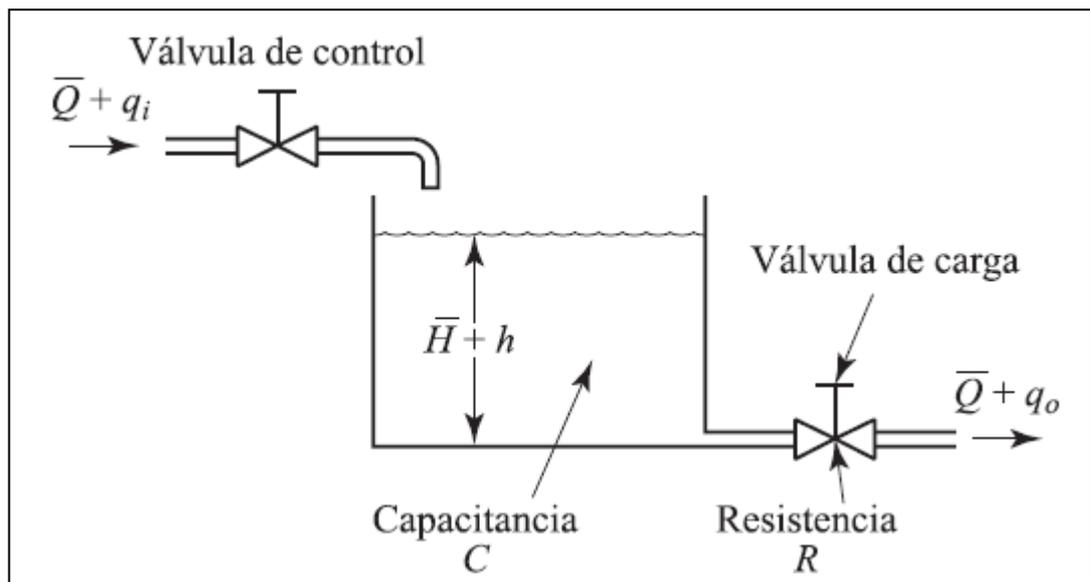


FIGURA 3.6: Sistema de Nivel de líquidos

FUENTE: Ingeniería de control moderna, K. Ogata - 2010

La capacitancia de un tanque se define como el cociente de la variación del líquido acumulado entre el cambio de la altura.

$$C = \frac{\text{Cambio en la cantidad de líquido acumulado [m}^3\text{]}}{\text{Cambio en la altura [m]}}$$

Lo cual resulta en unidades de área por lo que la capacitancia de un tanque se puede considerar como la sección transversal del tanque bajo estudio.

En los sistemas de nivel de líquido la condición de equilibrio viene declarada como:

"La diferencia del gasto de entrada y el gasto de salida en una unidad pequeña de tiempo es igual a la cantidad de líquido acumulado"; es decir:

$$Cdh(t) = [q_{i(t)} - q_{o(t)}]dt$$

En el término de la izquierda es la cantidad de líquido almacenado. La cantidad de gasto a la salida del tanque está definido en función de la resistencia al flujo de la restricción como:

$$q_{o(t)} = \frac{h(t)}{R}$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación anterior tenemos:

$$RC \frac{dh(t)}{dt} + h(t) = Rq_i(t)$$

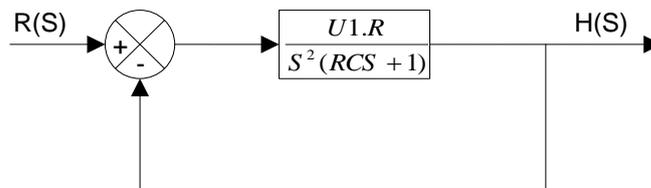
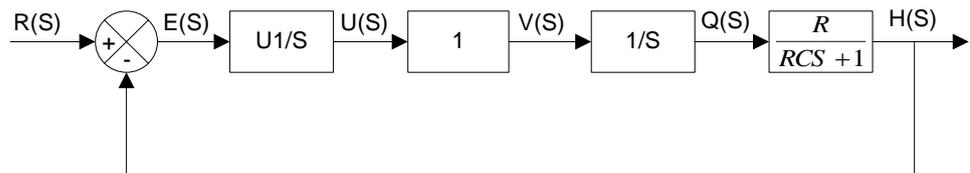
Transformando esta expresión considerando condiciones iniciales cero tenemos:

$$(SRC + 1)H(S) = RQ_i(S)$$

Relacionando la variable de salida (nivel) con la de entrada (flujo de entrada) llegamos a la función de transferencia: (Ogata, 2010)

$$\frac{H(S)}{Q_i(S)} = \frac{R}{RCS + 1}$$

3.1.4. Función de Transferencia



$$\frac{H(S)}{R(S)} = \frac{\frac{U1.R}{S^2(RCS + 1)}}{1 + \frac{U1.R}{S^2(RCS + 1)}}$$

$$\frac{H(S)}{R(S)} = \frac{U1.R}{S^2(RCS + 1) + U1.R}$$

3.1.5. Diseño del sistema de control

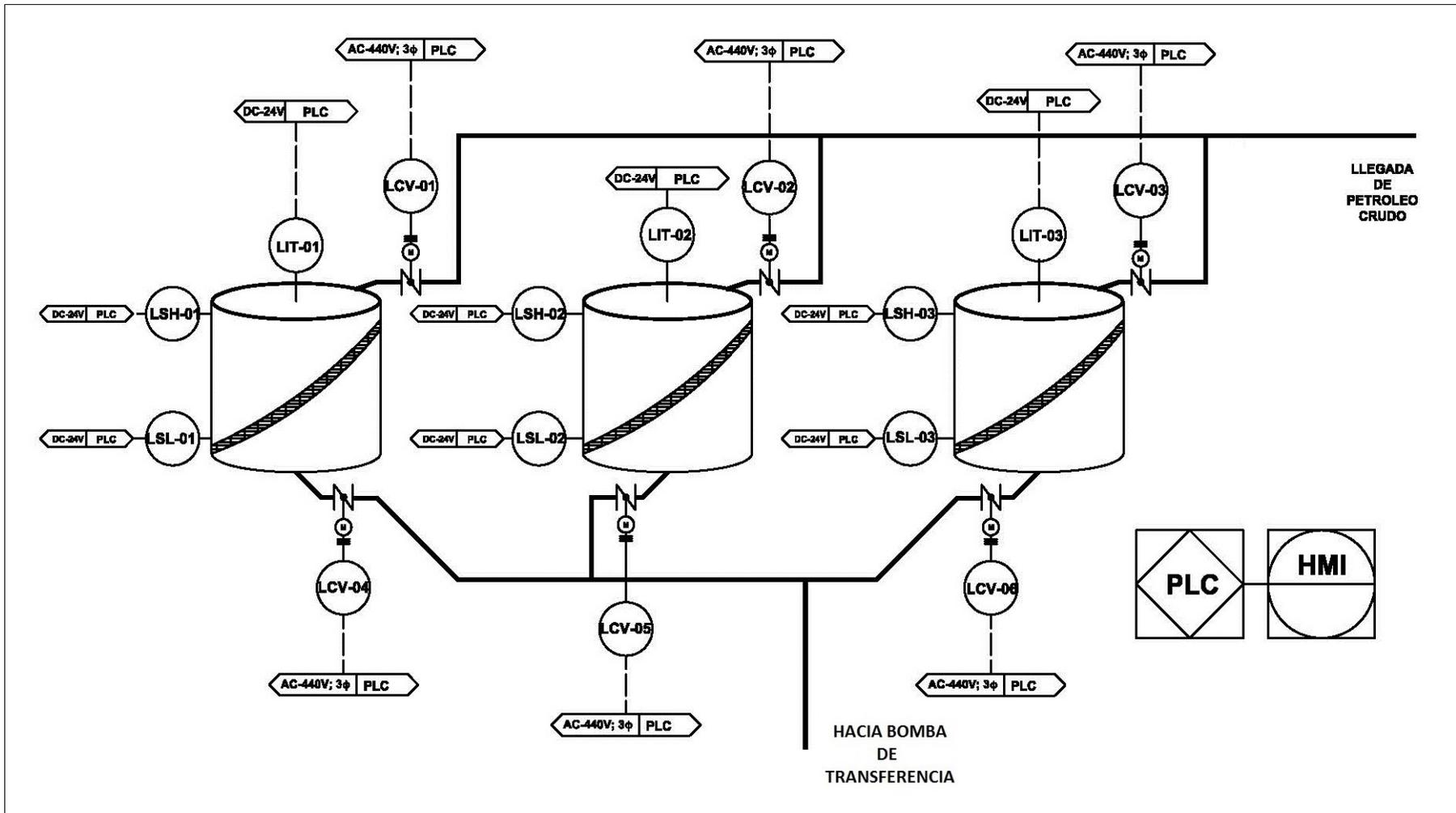


FIGURA 3.7: Diagrama de instrumentación para la etapa de almacenamiento

FUENTE: Elaboración propia

3.1.6. Selección de instrumentación

TABLA 3.3: Listado de instrumentos de etapa de almacenamiento

FUENTE: Elaboración propia

ITEM	TAG	TIPO DE INSTRUMENTO	MARCA Y MODELO	TIPO DE SEÑAL
01	LIT-01/LIT-03/LIT-03	Transmisor de Nivel, Radar	Rosemount 5401	Continua 4-20mA
02	LSH-01/ LSH-02/LSH-03	Switch de Nivel Alto, Tenedor	Rosemount 2120	Discreta ON/OFF
03	LSL-01/ LSL-02/ LSL-03	Switch de Nivel bajo, Tenedor	Rosemount 2120	Discreta ON/OFF
04	LCV-01B/LCV-02B/LCV-03B	Válvula de control NC	FISHER/EIM	Discreta ON/OFF
05	LCV-01A/ LCV-02A/LCV-03A	Válvula de control NC	FISHER/EIM	Discreta ON/OFF

1. Medición continua de nivel

Para monitorear el nivel de los tanques durante el proceso de almacenamiento y despacho, se necesita de un instrumento que tenga las siguientes características:

- Trabajar con petróleo crudo.
- Trabajar en un medio con emisión de gases.
- Trabajar en ambientes con vibraciones y ruido
- Trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Medir todo el rango de nivel del tanque (40 pies).
- Trabajar con tecnología HART.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Trabajar en ambientes con riesgo de explosión.

Teniendo en cuenta las características requeridas y revisando antecedentes y referencias, se ha seleccionado un transmisor tipo radar.

TRANSMISOR DE NIVEL TIPO RADAR ROSEMOUNT 5400:

Este transmisor presenta las siguientes características:

- Alta precisión cuando se manejan grandes volúmenes.
- Diseño robusto, resistente a impactos y a prueba de vibraciones.
- La señal de salida multivariable incluye la elección de nivel, distancia, volumen e intensidad de la señal.
- La señal de radar de baja frecuencia (6 GHz) permite la medición en medios con emisión de vapores.
- La tecnología de doble puerto garantiza la fiabilidad, incluso con factores perturbadores, intervalos de medición largos y constantes dieléctricas bajas
- El seguimiento avanzado de la superficie ofrece la capacidad de manejar ecos débiles de manera fiable, mediante la identificación el eco real y el registro de ecos falsos.
- Es robusto; resiste a impactos, es a prueba de vibraciones, el cabezal del transmisor desmontable permite que el depósito se mantenga sellado, y la carcasa de doble compartimento separa las conexiones de cables y el sistema electrónico para una manipulación más segura y una protección contra la humedad.
- Es aprueba de explosión con certificación FM para clase I división 1. (Emerson, 2014a)



FIGURA 3.8: Transmisor de nivel tipo radar Rosemount 5400

FUENTE: Emerson, Rosemount - 2014

2. Medición de nivel máximos y mínimos

Durante el proceso de almacenamiento y despacho de los tanques es necesario monitorear los niveles máximos y mínimos para evitar el sobrellenado y proteger la bomba de despacho, por lo cual se debe utilizar interruptores de nivel, estos dispositivos deben tener las siguientes características:

- Deben trabajar con petróleo crudo.
- Deben trabajar en ambientes con vibraciones y ruido
- Capaces de trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Trabajar en ambientes con riesgo de explosión.

INTERRUPTOR DE NIVEL TIPO HORQUILLA VIBRATORIA ROSEMOUNT 2120:

Este interruptor presenta las siguientes características:

- No se ve afectado por la turbulencia, espuma, vibración, contenido de sólidos, productos de revestimiento, o propiedades líquidas.
- Diseñado para funcionar a temperaturas de proceso entre los -40 a 150 °C.
- Posee retardo de conmutación ajustable evitando falsos cambios en la turbulenta o aplicaciones salpicaduras.
- Transición de húmedo a seco y seco a húmedo rápida para gran capacidad de respuesta conmutación.
- Fácil acceso a la terminal, insensible a la polaridad y protección de cortocircuito.
- Sin partes móviles prácticamente ningún mantenimiento.
- Es aprueba de explosión con certificación FM para clase I división 1. (Emerson, 2014b)



FIGURA 3.9: Interruptor de nivel tipo horquilla vibratoria
Rosemount 2120

FUENTE: Emerson, Rosemount - 2014

3. Control de nivel

El instrumento necesario para realizar el control de nivel es una válvula y su actuador.

VALVULA DE CONTROL

Durante el proceso de llenado o vaciado de los tanques se utilizan válvulas, las cuales hacen la función de controlar el ingreso y salida del petróleo, estas válvulas deben contar con las siguientes características:

- Deben trabajar con petróleo crudo.
- Deben poder instalarse en tuberías de 8 pulgadas.
- Deben poder soportar la presión y temperatura de proceso (40 PSI @ 60°C aprox.).
- Trabajar en ambientes con vibraciones y ruido.
- Trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.

VALVULA TIPO MARIPOSA FISHER A81:

Al tratarse de un proceso de control discreto se utilizara una válvula de tipo mariposa on/off, ya que estas presentan un tiempo breve para pasar de estado abierto a cerrado y viceversa.

El uso principal de las válvulas de mariposa es para servicio de corte y de estrangulación cuando se manejan grandes volúmenes de gases y líquidos a presiones relativamente bajas. El diseño abierto de flujo rectilíneo evita la acumulación de sólidos y produce baja caída de presión.

- Posee tipo de cierre hermético.
- Presentan pocas partes móviles, por lo que requiere mínimo mantenimiento, fácil instalación y agrega poco peso a la línea

tubería (el peso es menor en comparación a otro tipo de válvulas del mismo diámetro).

- El costo es menor en comparación con otro tipo de válvulas del mismo diámetro.
- Mejor fijación del eje al disco: el sistema de pasador de expansión mejorado garantiza una conexión positiva y duradera entre el disco y el eje. Eso reduce el movimiento no deseado y el desgaste del sistema de transmisión, optimizando el rendimiento a largo plazo. (Emerson, 2012)



FIGURA 3.10: Válvula de control Fisher A81 tipo mariposa

FUENTE: Emerson, Fisher - 2014

ACTUADOR

Para realizar el control automático de la válvula se necesita un equipo que genere un movimiento de apertura y cierre de la válvula, el cual será nuestro actuador y debe contar con las siguientes características:

- Debe generar el torque necesario para controlar la válvula.
- Trabajar en ambientes con vibraciones y ruido.
- Trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Trabajar en ambientes con riesgo de explosión.

ACTUADOR ELECTRICO EIM HQ:

Debido a las facilidades de instalación (cableado eléctrico) y el requerimiento de rápido accionamiento para el cambio de estado se ha decidido utilizar un actuador eléctrico.

El dimensionamiento del actuador se hizo con ayuda del software “Firstvue versión 1.0ab” perteneciente al fabricante Emerson.

Los datos obtenidos del manual del fabricante de la válvula son ingresados al software, el cual nos proporcionan el valor de torque necesario para el correcto funcionamiento de la válvula seleccionada.

- Presenta con un torque máximo de 2 580 in-lb.
- Trabaja con un voltaje de 440V y una corriente de 0.30 A.
- Montaje compatible con la válvula ya que ambos pertenecen al mismo fabricante.
- Diseño robusto, resistente a impactos y a prueba de vibraciones.
- Es aprueba de explosión con certificación ATEX. (Emerson, 2014c)



FIGURA 3.11: Actuador eléctrico EIM HQ

FUENTE: Emerson, EIM - 2014

3.2. Etapa de despacho

Consta de la bomba de transferencia, la válvula de tres vías y los medidores de flujo, presión y temperatura, la variable controlada para esta etapa será el flujo de crudo de petróleo enviado a través de la línea. En esta etapa se utilizará el protocolo de comunicación HART, por las siguientes razones: es un protocolo abierto, fácil de implementar debido a que se presenta mayor conocimiento y manejo, permite el diagnóstico de fallas en el instrumento y permite la compatibilidad con la etapa anterior.

TABLA 3.4: Variables de la etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

Variable Manipulada	Voltaje entregado por el variador al motor de bomba.
Variable Controlada	Flujo de salida en la línea de despacho.

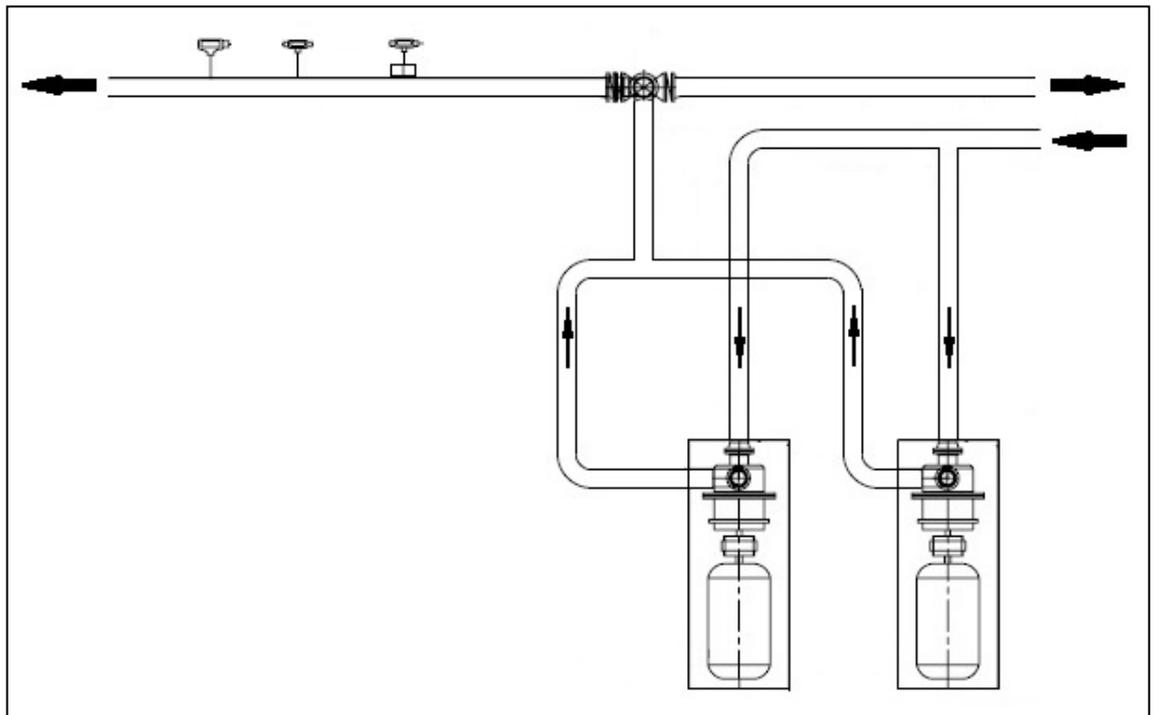


FIGURA 3.12: Esquema de etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

3.2.1. Filosofía de operación y control

Para iniciar el proceso de despacho se deberá ingresar mediante la interfaz hombre - máquina la secuencia de despacho de los tanques y la cantidad de petróleo a despachar, luego se iniciará la operación empezando por el primer tanque, el PLC enviará las señales correspondientes para la apertura de la válvula de salida y el arranque del motor de la bomba de desplazamiento.

El control de parada por bajo nivel será detectado por el transmisor de nivel y comandado por el PLC, una vez ingresada la señal de bajo nivel en el PLC, este apagará el motor de la bomba de desplazamiento. En el caso que se desee descargar la producción del segundo tanque, el PLC comandará el control de la misma manera, repitiéndose este modo de operación en el tercer tanque.

El control del motor de la bomba será realizado por un variador de frecuencia; el PLC enviará la señal de flujo recibida del puente de medición al variador de frecuencia, esta señal ajustará automáticamente la salida de las rpm del motor con la finalidad de mantener un caudal requerido por la operación.

3.2.2. Diagrama de flujo de la secuencia de control

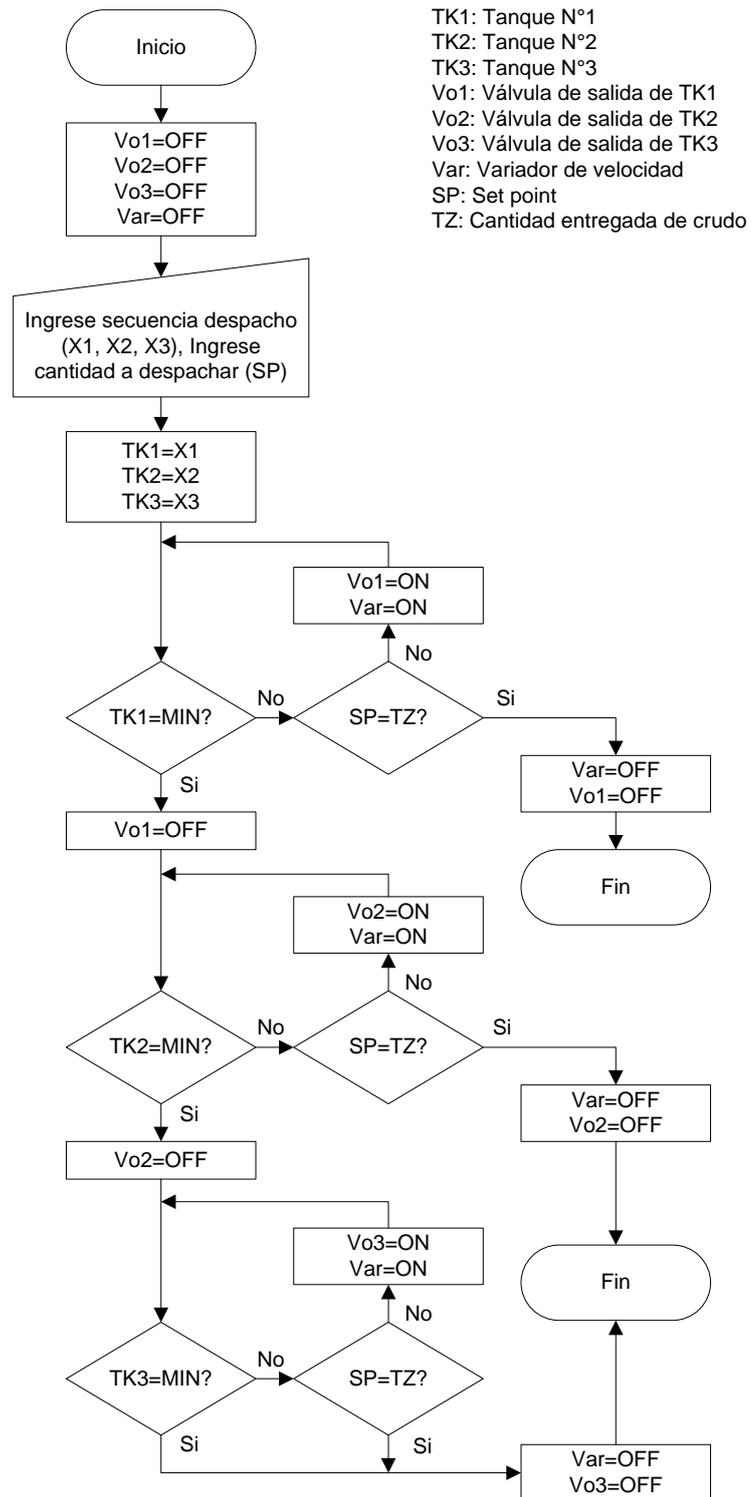


FIGURA 3.13: Diagrama de flujo para etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

3.2.3. Modelo matemático del lazo de control

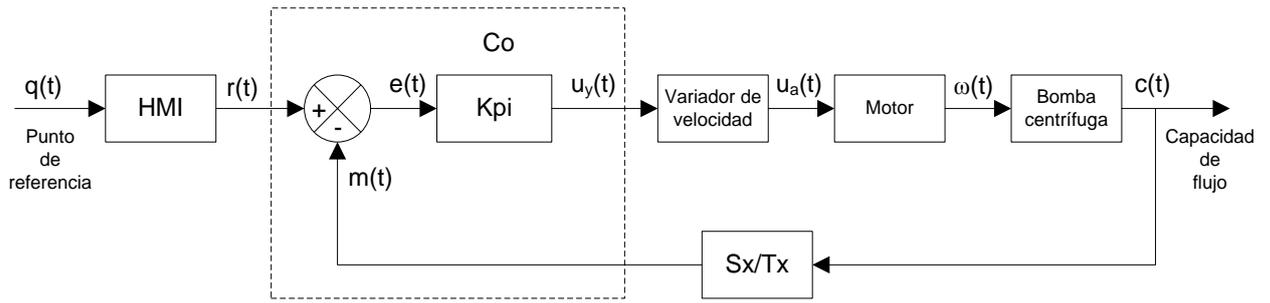


FIGURA 3.14: Diagrama de bloques del sistema de control para la etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

- a) Señal de error: El nivel se compara con el nivel programado (set).

$$e(t) = r(t) - m(t) \dots\dots\dots \text{(Ecuación1)}$$
 $r(t)$: Punto de referencia.
 $m(t)$: Señal del Transmisor.

- b) Acción de control proporcional – integrativa

$$Uy(t) = Kpi e(t) \dots\dots\dots \text{(Ecuación2)}$$

- c) Sistema convertidor – motor – carga

La ecuación que caracteriza al convertidor se puede expresar de la siguiente manera:

$$Ua(t) = KcUy(t - Tc)$$

Donde:

Kc : Ganancia del convertidor

Tc : Tiempo muerto del convertidor (1.32 msec para red trifásica de 60 Hz)

Aplicando Laplace:

$$Ua(S) = KcUy(S)e^{-STc}$$

Como $e^x = \sum_{i=0}^n \frac{x^i}{i!}$; Entonces haciendo $x = -STc$ se obtiene:

$$e^{-STc} = 1 - STc + \frac{(STc)^2}{2} - \frac{(STc)^3}{6} + \dots$$

Teniendo presente que Tc presenta un valor muy pequeño, puede plantearse qué:

$$e^{-STc} = 1 - STc = \frac{1}{1 + STc}$$

Con lo que se obtiene la función de transferencia del convertidor:

$$\frac{Ua(S)}{Uy(S)} = \frac{Kc}{TcS + 1}$$

Considerando ahora que la resistencia del estator del motor es cero (lo cual es práctico de considerar para máquinas con potencias superiores a 1Kw), la expresión del momento crítico del motor se puede plantear como:

$$M_{crit} = \frac{3U_{1f}^2 \cdot S_{crit}}{2\omega_s R2}$$

Donde:

M_{crit} : Momento crítico del motor

U_{1f} : Voltaje de fase del motor

S_{crit} : Deslizamiento crítico del motor

ω_s : Velocidad síncrona del motor

$R2$: Resistencia del rotor referida al estator

Además se tiene que:

$$Tmec = \frac{J\omega_s}{M_{crit}}$$

$$S_{crit} = \frac{R2}{\omega_s P(L1 + L2)}$$

$$T_e = \frac{L1 + L2}{R2} \rightarrow \frac{1}{\omega_s P \cdot S_{crit}}$$

Donde:

T_{mec} : Constante de tiempo mecánica del motor

T_e : Constante de tiempo eléctrica

$L1$: Inductancia de dispersión del estator

$L2$: Inductancia de dispersión del rotor

P : Numero de pares de polos del motor

Reemplazando S_{crit} y M_{crit} y despejando T_{mec} en la ecuación se obtiene:

$$T_{mec} = \frac{2J \cdot \omega_s^3 \cdot P \cdot R2}{3 \cdot U_{1f}^2} \cdot T_e$$

Esta ecuación conduce a plantear que la constante de tiempo mecánica, es por lo general de quince a veinte veces mayor que la constante de tiempo eléctrica, debido a las siguientes razones:

- Los motores que accionan bombas centrífugas son de alta velocidad, de manera que generalmente solo presentan dos o a lo sumo cuatro polos.
- En la medida que el voltaje nominal del motor es mayor, mayor será también su momento de inercia.

Debido a que el conjunto convertidor-motor-carga, representa un modelo de orden superior no es fácil determinar los parámetros que caracterizan su comportamiento. Sin embargo se demostró anteriormente que la constante de tiempo mecánica del sistema es mucho mayor que la constante de tiempo eléctrica del motor y la constante de tiempo del convertidor. Por tanto, es factible, al igual que se hace en la mayoría de los métodos de ajuste de reguladores, caracterizar al sistema por un simple modelo de primer orden con

tiempo muerto, y aplicar una regla practica como una primera aproximación, la cual plantea que si una de las constantes de tiempo del modelo de orden superior es mucho mayor que las restantes constantes de tiempo, la constante de tiempo efectiva del modelo de primer orden se puede estimar igual a la mayor constante de tiempo y el tiempo muerto efectivo, puede entonces ser aproximado a la suma de todas las pequeñas constantes de tiempo.

Para este caso en particular se cumple que la constante de tiempo de primer orden que se obtenga de la caracterización del sistema será igual a la constante de tiempo mecánica del motor y el tiempo muerto será igual a la suma de la constante de tiempo eléctrica del motor y la constante de tiempo del convertidor.

Considerando entonces un modelo de primer orden con tiempo muerto en la función transferencia del sistema controlado (conjunto convertidor – motor – carga), se tiene que:

$$G_1(S) = \frac{K e^{-t_0 S}}{TS + 1}$$

Donde:

t_0 : Tiempo muerto del sistema ($t_0 = T_e + T_c$)

T: Constante de tiempo del sistema ($T = T_{mec}$)

K: Ganancia del sistema

Desarrollando la expresión anterior se obtiene la función de transferencia del conjunto convertidor – motor – carga: (López Montegudo, Arias García, & Gonzáles Elías, 2005)

$$G_1(S) = \frac{K}{((T_c + T_e).S + 1). (T_{mec}.S + 1)}$$

Calculando T_{mec} , T_e y la ganancia K :

Datos placa bomba:

V: 400 V 3 ϕ

J; momento de inercia: 1.5 Kg/m²

I = 60 amp

Cos ϕ : 0.85

Fbase: 60 Hz

RPM: 1800 rpm

P: 50 HP / 37 Kw

$$P (Kw) = \frac{\tau (Nm) \cdot n (rpm)}{9550} \rightarrow \tau = \frac{37 \times 9550}{1800}$$

$$\tau = 196.31 \text{ N.m}$$

$$T_{mec} = \frac{J\omega_s}{M_{crit}}; M_{crit} = \tau$$

$$\omega_s = 1800 \text{ RPM} = 188.50 \text{ rad/seg}$$

$$T_{mec} = \frac{(1.5)(188.50)}{196.31} \cong 1 \text{ seg}$$

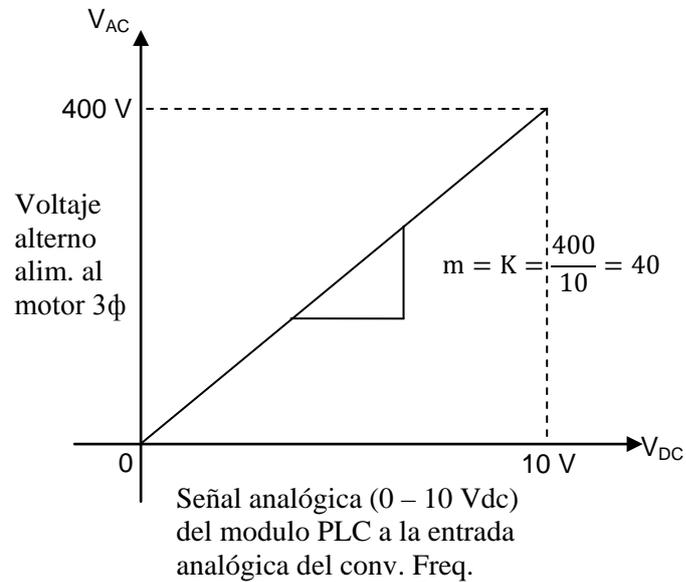
$$T_e = \frac{L1 + L2}{R2}; R2 \sim 0.25 \Omega$$

$$M_{crit} = \frac{3U_{1f}^2 S_{crit}}{2\omega_s R2} \text{ y } S_{crit} = \frac{R2}{\omega_s P(L1 + L2)}$$

$$M_{crit} = \frac{3U_{1f}^2}{2\omega_s^2 P(L1 + L2)} \rightarrow (L1 + L2) = \frac{3U_{1f}^2}{2\omega_s^2 P M_{crit}}$$

$$(L1 + L2) = \frac{3(400)^2}{2(188.50)^2(2)(196.31)} = 0.0172 \text{ H}$$

$$T_e = \frac{0.0172}{0.25} = 68.8 \text{ mseg}$$



Resumiendo:

$$T_{mec} = 1 \text{ seg}$$

$$T_c = 1.32 \text{ mseg}$$

$$T_e = 68.8 \text{ mseg}$$

$$K = 40$$

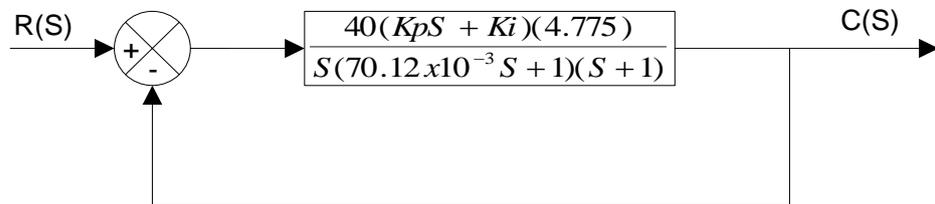
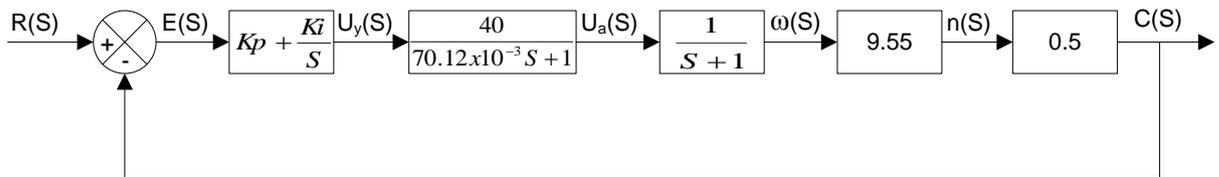
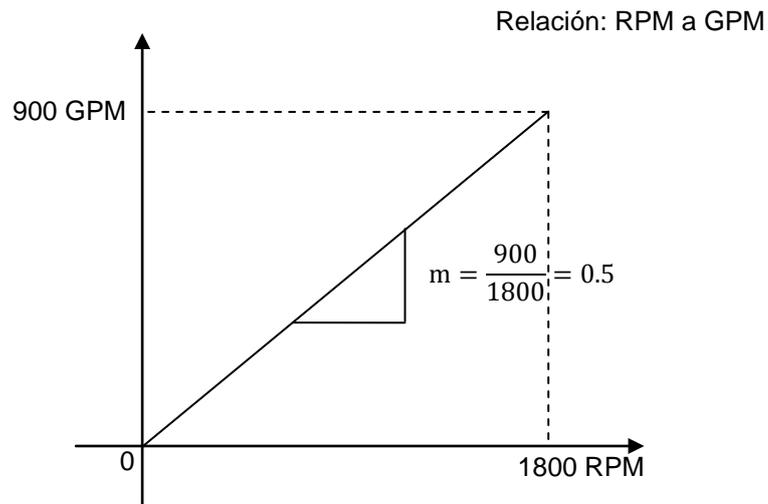
Reemplazando valores en la función de transferencia:

$$G_1(S) = \frac{K}{((T_c + T_e) \cdot S + 1) \cdot (T_{mec} \cdot S + 1)}$$

Se obtiene:

$$G_1(S) = \frac{40}{(70.12 \times 10^{-3} S + 1)(S + 1)}$$

3.2.4. Función de Transferencia



$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{\frac{191(KpS + Ki)}{S(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1)}}{1 + \frac{191(KpS + Ki)}{S(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1)}}$$

Ecuación característica:

$$S(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1) + 191KpS + 191Ki = 0$$

Resolviendo por método de contorno de raíces ($Ki = 0$):

$$S(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1) + 191KpS = 0$$

$$1 + \frac{191Kp}{(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1)} = 0$$

a) Número de polos y ceros:

$$\# \text{ Polos} = 2$$

$$S1 = -14.26$$

$$S2 = -1$$

$$\# \text{ Ceros} = 0$$

b) Número de asíntotas:

$$\# \text{Asintotas} = \# \text{Polos} - \# \text{Ceros}$$

$$\# \text{Asintotas} = 2 - 0 = 2$$

c) Intersección de las asíntotas:

$$\sigma = \frac{\sum \text{Polos} - \sum \text{Ceros}}{\# \text{Polos} - \# \text{Ceros}}$$

$$\sigma = \frac{(-1 - 14.26)}{2 - 0} = -7.63$$

d) Angulo de las asíntotas:

$$\theta = \frac{\pm(2n - 1)\pi}{(\# \text{Polos} - \# \text{Ceros})}$$

Para n=1

$$\theta = \pm \frac{\pi}{2} \rightarrow \theta_1 = -\frac{\pi}{2}; \theta_2 = \frac{\pi}{2}$$

e) Punto de ruptura:

$$\frac{dK}{dS} = 0$$

$$\frac{dK}{dS} = \left(\frac{191}{(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1)} \right)' = 0$$

$$S = -7.63$$

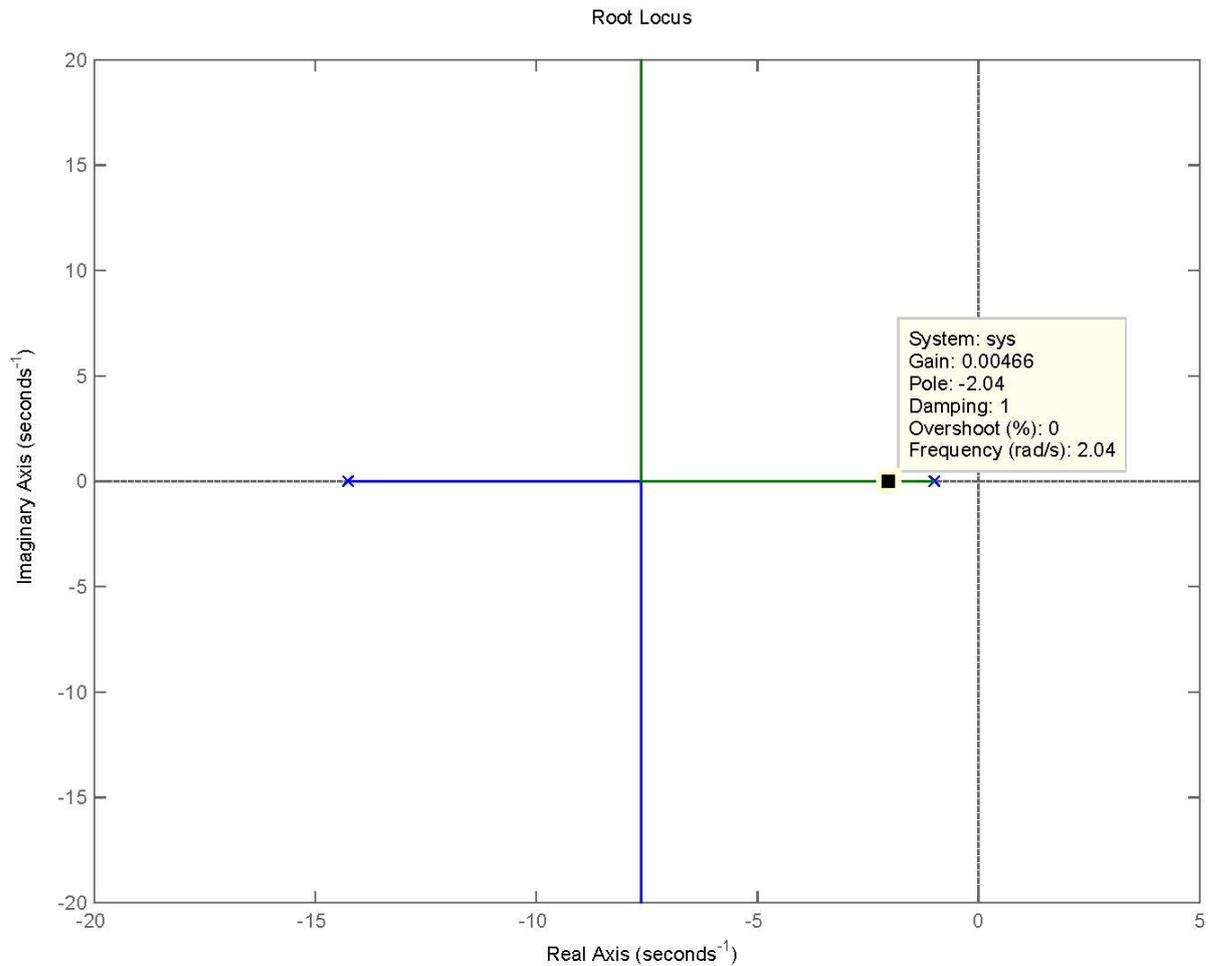


FIGURA 3.15: Lugar geométrico de raíces – Parámetro P
FUENTE: Elaboración propia

Restaurando Ki:

$$S(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1) + 191K_pS + 191K_i = 0$$

$$1 + \frac{191K_i}{S(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1) + 191K_pS} = 0; K_p = 0.0047$$

a) # Polos = 3

$$S_1 = 0$$

$$S_2 = -2.048$$

$$S_3 = -13.21$$

Ceros = 0

b) Número de asíntotas:

$$\#Asintotas = \#Polos - \#Ceros$$

$$\#Asintotas = 3 - 0 = 3$$

c) Intersección de las asíntotas:

$$\sigma = \frac{\sum Polos - \sum Ceros}{\#Polos - \#Ceros}$$

$$\sigma = \frac{(0 - 2.048 - 13.21)}{3 - 0} = -5.086$$

d) Angulo de las asíntotas:

$$\theta = \frac{\pm(2n - 1)\pi}{(\#Polos - \#Ceros)}$$

Para n=1

$$\theta = \pm \frac{\pi}{3} \rightarrow \theta_1 = -\frac{\pi}{3}; \theta_2 = \frac{\pi}{3}$$

Para n=2

$$\theta = \pm\pi \rightarrow \theta_3 = \pi$$

e) Punto de ruptura:

$$\frac{dK}{dS} = 0$$

$$\frac{dK}{dS} = \left(\frac{191}{S(70.12 \times 10^{-3}S + 1)(S + 1) + 0.8977S} \right)'_S = 0$$

$$S = -0.98$$

f) Intersección con el eje imaginario:

Criterio de estabilidad de Routh-Hurwitz:

$$70.12 \times 10^{-3}S^3 + 1070.12 \times 10^{-3}S^2 + 1.8977S + 191Ki = 0$$

$$\begin{array}{l|l} S^3 & 70.12 \times 10^{-3} & 1.8977 \\ S^2 & 1070.12 \times 10^{-3} & 191Ki \\ S^1 & A & \\ S^0 & 191Ki & \end{array}$$

Fila 3:

$$A = \frac{(1070.12 \times 10^{-3})(1.8977) - (70.12 \times 10^{-3})(191Ki)}{1070.12 \times 10^{-3}}$$

$$A > 0$$

$$(1070.12 \times 10^{-3})(1.8977) > (70.12 \times 10^{-3})(191Ki)$$

$$Ki < 0.1516$$

Fila 4:

$$191Ki > 0$$

$$Ki > 0$$

$$\therefore 0 < Ki < 0.1516$$

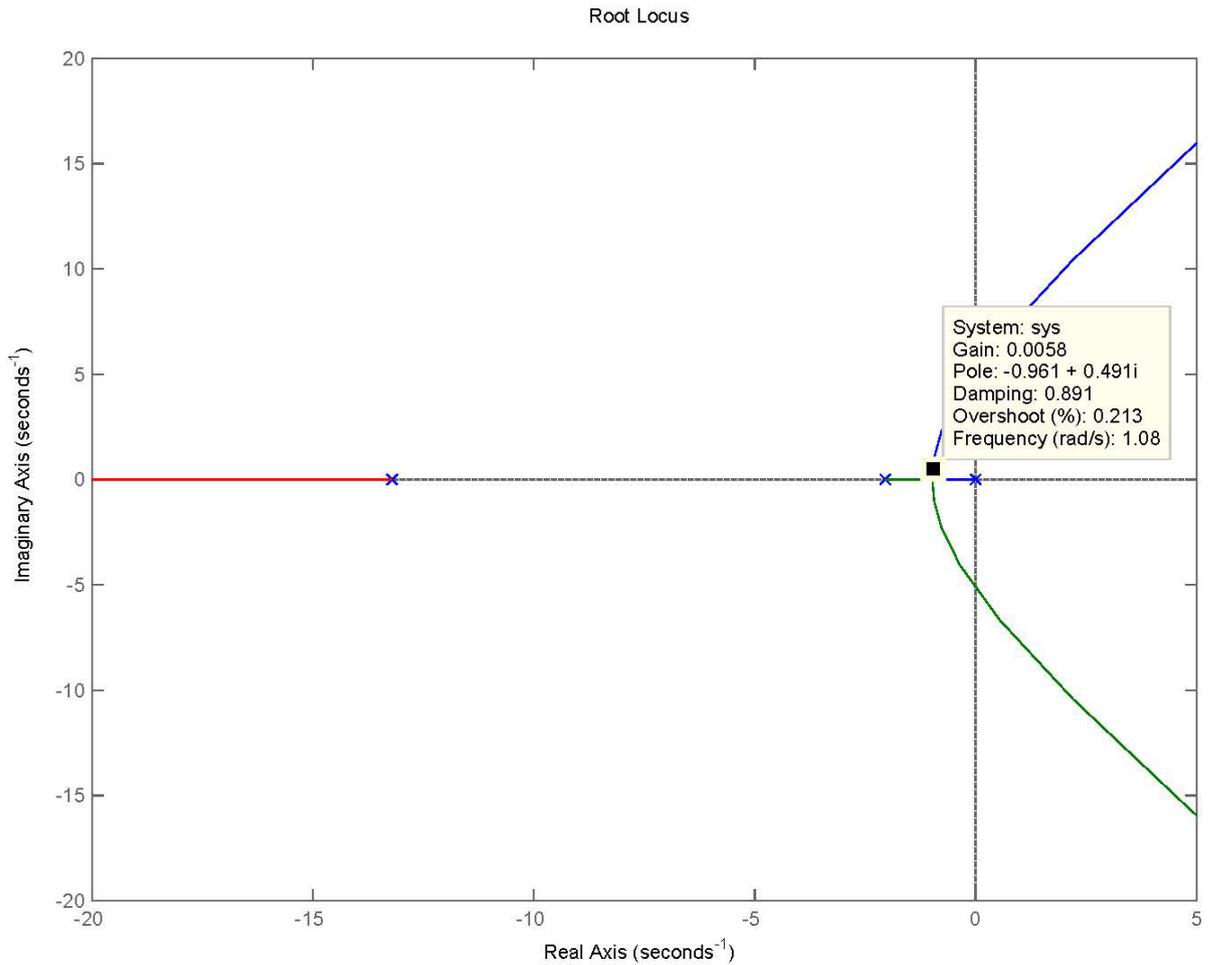


FIGURA 3.16: Lugar geométrico de raíces – Parámetro I

FUENTE: Elaboración propia

Asumiendo valores:

$$K_p = 0.0047$$

$$K_i = 0.0058$$

$$T_i = \frac{K_p}{K_i} = 810.34 \text{ msec}$$

El primer gráfico muestra la entrada al sistema, mientras que en el segundo gráfico se obtiene la respuesta.

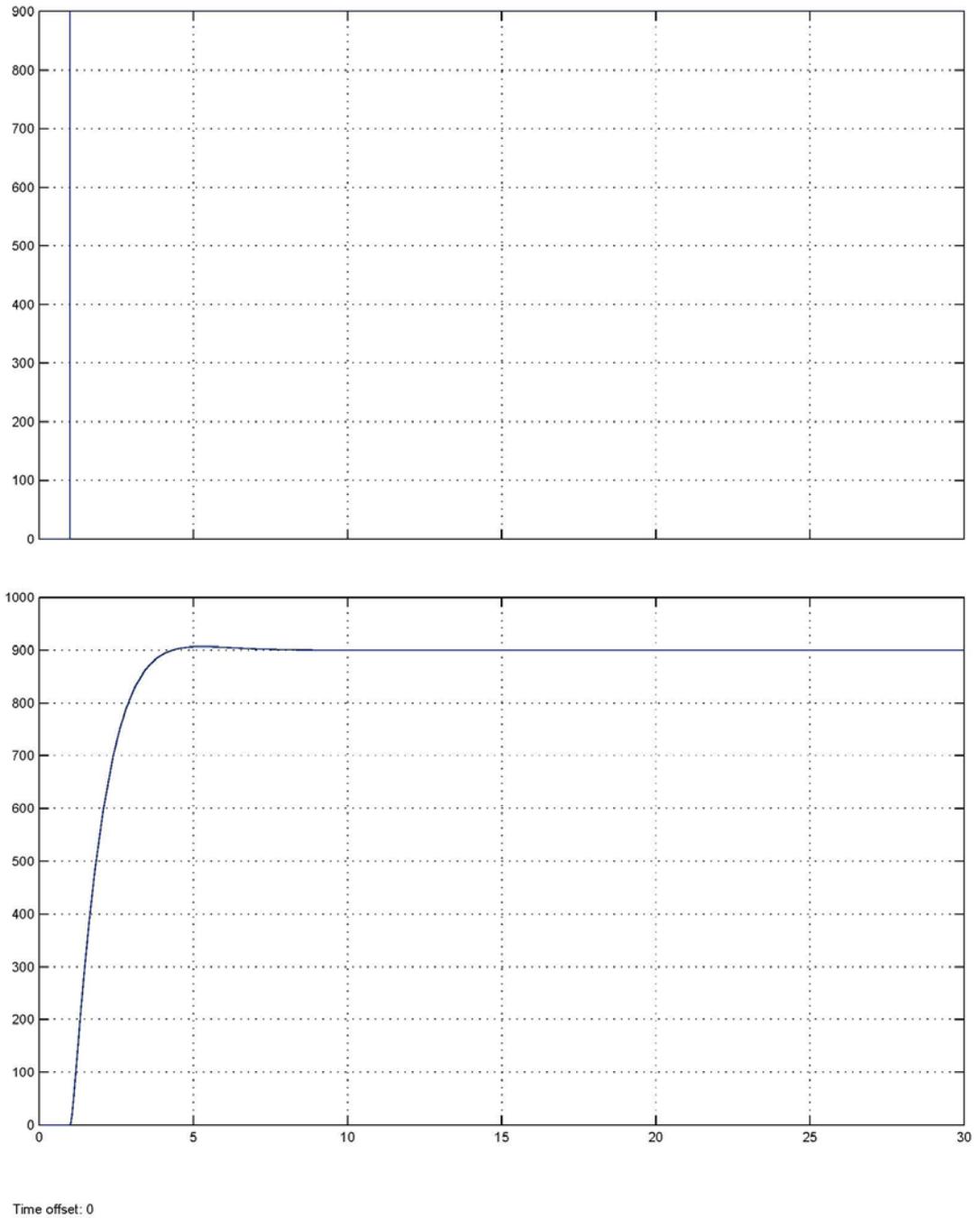


FIGURA 3.17: Gráfica de la señal de entrada y respuesta a la salida del sistema de control para la etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

3.2.5. Diseño del sistema de control

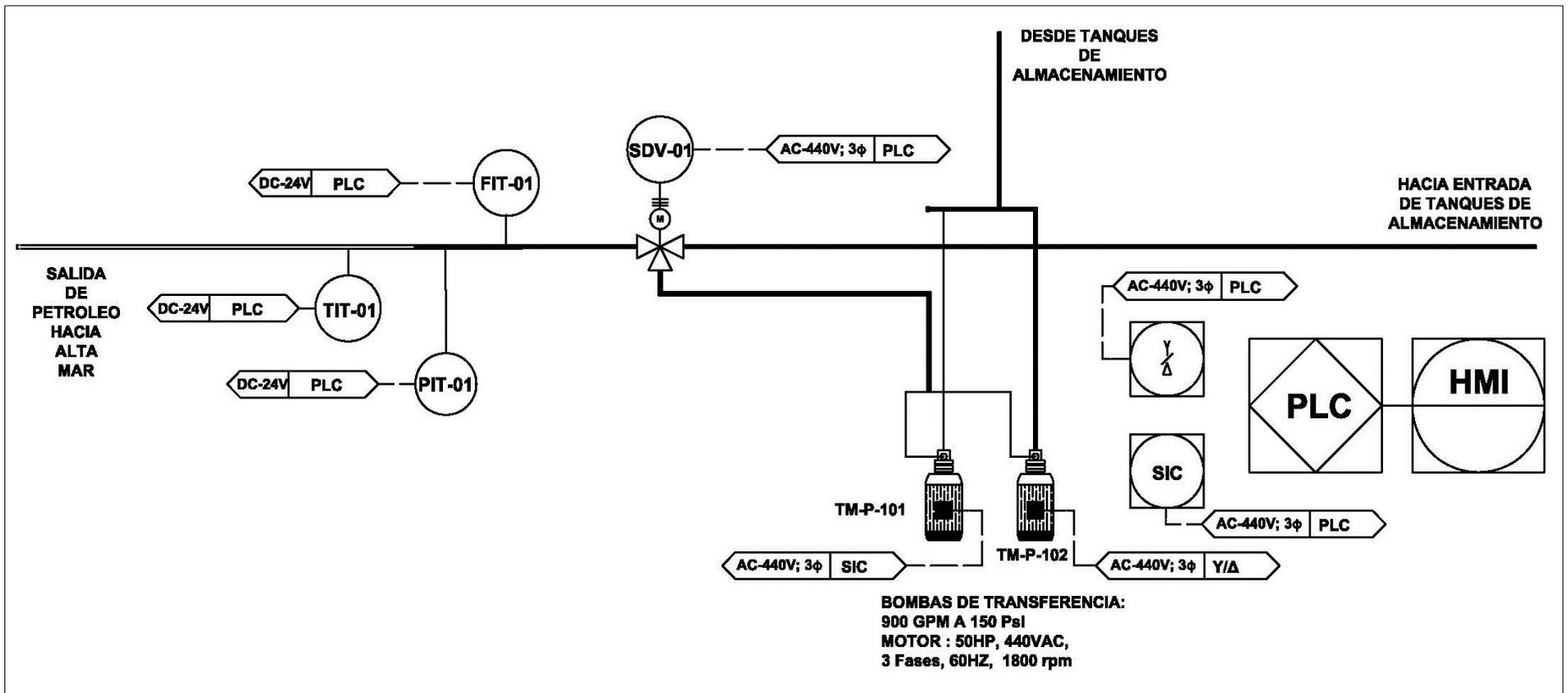


FIGURA 3.18: Diagrama de instrumentación para la etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

3.2.6. Selección de instrumentación

TABLA 3.5: Listado de instrumentos de etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

ITEM	TAG	TIPO DE INSTRUMENTO	MARCA Y MODELO	TIPO DE SEÑAL
01	PIT-01	Transmisor de Presión	Rosemount 2051	Continua 4-20mA
02	TIT-01/TE-01	Transmisor de Temperatura	Rosemount 644	Continua 4-20mA
03	FIT-01	Transmisor de Flujo	Endress + Hauser 93P	Continua 4-20mA
04	SIC-01	Variador de Velocidad	Allen Bradley	Continua 0-10V
05	PLC-01	Controlador Lógico Programable	Allen Bradley	
06	HMI-01	Interfaz Hombre - Máquina	Allen Bradley	

1. Medición de presión

A la salida de la línea de despacho después de la bomba de transferencia, se realizará la medición de presión para verificar que la presión en la línea sea la requerida (150 PSI), además este dato será utilizado para realizar la compensación en el cálculo del valor total del flujo despachado. Este equipo debe tener las siguientes características:

- Debe ser adecuado para trabajar con petróleo crudo.
- Debe tener un rango de medición que soporte la presión de proceso.

- Trabajar en ambientes con vibraciones y ruido.
- Trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Trabajar con tecnología HART.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Trabajar en ambientes con riesgo de explosión.

TRANSMISOR DE PRESIÓN MANOMÉTRICA ROSEMOUNT 2051:

Este transmisor presenta las siguientes características:

- Presenta una rangeabilidad de 100:1.
- Diseño robusto, resistente a impactos y a prueba de vibraciones.
- Amplitudes o rangos calibrados entre 10,3 mbar y 689 bar (0,2 a 10,000 psi).
- Diversidad de materiales en contacto con el proceso.
- Dispone de diversas conexiones de proceso.
- Es a prueba de explosión con certificación FM para clase I división 1. (Emerson, 2013)



FIGURA 3.19: Transmisor de presión Rosemount 2051

FUENTE: Emerson, Rosemount - 2014

2. Medición de temperatura

A la salida de la línea de despacho después de la bomba de transferencia, se realizará la medición de temperatura para verificar que sea la requerida para realizar la compensación en el cálculo del valor total del flujo despachado. Este equipo debe tener las siguientes características:

- Debe ser adecuado para trabajar con petróleo crudo.
- Debe tener un rango de medición que soporte la temperatura de trabajo (aprox. 70°C máx).
- Trabajar en ambientes con vibraciones y ruido.
- Trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Trabajar con tecnología HART.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Trabajar en ambientes con riesgo de explosión.

TRANSMISOR DE TEMPERATURA ROSEMOUNT 644:

Este transmisor presenta las siguientes características:

- Entrada de sensor simple o dual para RTD, termocupla, mV y Ohm.
- Diseño robusto, resistente a impactos y a prueba de vibraciones.
- Alta estabilidad y precisión en la medición.
- Diversidad de materiales en contacto con el proceso.
- Dispone de diversas conexiones de proceso.
- Es aprueba de explosión con certificación FM para clase I división 1. (Emerson, 2014d)



FIGURA 3.20: Transmisor de temperatura Rosemount 644

FUENTE: Emerson, Rosemount - 2014

3. Medición y control de flujo

Para la etapa de despacho se necesita monitorear el flujo de petróleo, por lo que se requiere un instrumento que cumpla con las siguientes características:

- Trabajar con petróleo crudo.
- Debe poder instalarse en tubería de 8 pulgadas.
- Que permita medir el flujo requerido de despacho (900 GPM).
- Trabajar en ambientes con vibraciones y ruido
- Trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Trabajar con tecnología HART.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Trabajar en ambientes con riesgo de explosión.

TRANSMISOR DE FLUJO TIPO ULTRASONICO NO INTRUSIVO ENDRESS + HAUSER PROLINE PROSONIC:

Este transmisor presenta las siguientes características:

- Adecuado para diámetros de tubería desde ½" a 160".
- Tiene un rango de medición de 0 a 7,700 GPM aprox.
- Adecuado para rangos de temperatura de fluido desde - 40 a 170°C.

- Puede ser usado con todas las tuberías de plástico y metal.
- Trabajar en ambientes con vibraciones y ruido
- Trabajar en un medio húmedo, salitroso e intemperie.
- Trabajar con tecnología HART.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Adecuado para aplicaciones con químicos, solventes, hidrocarburos, ácidos y álcalis.
- Es aprueba de explosión con certificación FM. (Endress + Hauser, 2011)



FIGURA 3.21: Transmisor de flujo tipo ultrasónico Proline
Prosonic Flow 93P

FUENTE: Endress + Hauser - 2014

Para realizar el control de flujo PI se necesita de un equipo que manipule la cantidad de flujo en la línea de transmisión de despacho, el cual debe cumplir con las siguientes características:

- Tener entrada de 0 a 10 Vdc.
- Trabajar con bomba de transferencia.
- Trabajar con un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla de 400Vac, 50 HP y 60Hz.
- Tener fácil acceso para la instalación y el mantenimiento.
- Debe ser fácil de programar.

VARIADOR DE FRECUENCIA ALLEN – BRADLEY POWERFLEX 400:

Este equipo presenta las siguientes características:

- Entrada analógica de 0 a 10 Vdc ó 4-20mA configurable.
- Aplicación para bombas y ventiladores.
- Alojamiento IP 30 (NEMA/UL tipo 1).
- Opciones de montaje en panel y brida.
- Configuración y programación mediante teclado integral.
- Fácil visualización de parámetros.
- Sencillo de programar.
- Es robusto. (Allen Bradley, 2014a)



FIGURA 3.22: Variador de velocidad PowerFlex 400

FUENTE: Allen – Bradley - 2014

Para la etapa de almacenamiento y despacho se necesita de un equipo que recepcione las señales provenientes de los elementos de medición que son parte del proceso, las cuales serán procesadas de acuerdo al diagrama de flujo de dicho proceso, para luego emitir las señales de control (a los actuadores) correspondientes. Se necesita de un equipo con las siguientes características:

- Debe contar con una adecuada capacidad de procesamiento de datos.
- Debe ser de programación sencilla.
- Debe contar con entradas analógicas de 4 a 20 mA + HART.
- Debe contar con salidas analógicas de 0 a 10 Vdc.
- Debe contar con entradas digitales de 24 Vdc.
- Debe contar con salidas digitales de 24 Vdc.
- Debe poder integrarse a sistemas de mayor arquitectura.
- Debe tener fácil instalación y mantenimiento.

CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE ALLEN – BRADLEY MICROLOGIX 1500:

Este equipo presenta las siguientes características:

- Memoria de 14 KB para programación y datos de usuario.
- Pueden ser agregados hasta 16 módulos utilizando un banco de expansión I/O y una expansión de fuente de alimentación.
- Presenta entradas analógicas de 4 a 20 mA + HART.
- Presenta salidas analógicas de 0 a 10 Vdc.
- Presenta entradas digitales de 24 Vdc.
- Presenta salidas digitales de 24 Vdc.
- Batería para datos y programa de usuario no volátil.
- Es de fácil programación. (Allen Bradley, 2002)



FIGURA 3.23: Controlador Lógico Programable MicroLogix 1500

FUENTE: Allen – Bradley - 2014

Para la etapa de almacenamiento y despacho se requiere de un equipo que permita visualizar y elegir los valores de control (set point) de las variables de proceso, por lo que se requiere un equipo con las siguientes características:

- Debe ser de programación sencilla.
- Debe ser fácil de manipular.
- Debe ser de fácil instalación y mantenimiento.
- Debe ser compatible con el PLC.
- Trabajar en ambientes con riesgo de explosión.

INTERFACE HOMBRE – MÁQUINA ALLEN – BRADLEY PANELVIEW PLUS 6:

Este equipo presenta las siguientes características:

- Pantalla gráfica de 10.4 pulgadas a color.
- Entrada mediante pantalla táctil
- Fácil de programar.
- Es compatible con el PLC Micrologix 1500.
- Certificación UL Class I, Div 2, Groups A, B, C, D. (Allen Bradley, 2014b)



FIGURA 3.24: Interface Hombre Máquina PanelView Plus 6

FUENTE: Allen – Bradley - 2014

IV. COSTOS DEL PROYECTO

Para ver la factibilidad del proyecto es necesario analizar tanto los gastos o inversiones de capital, así como los gastos de operación y mantenimiento.

Por lo que tanto para egresos como para ingresos, se detallarán los costos de los factores y variables antes mencionados. Para posteriormente, mediante el flujo de caja, comparar los ingresos con los egresos para ver la factibilidad del proyecto en base a criterios de inversión como el VAN (Valor Actual Neto) y el TIR (Tasa Interna de Rentabilidad).

4.1. Inversión

TABLA 4.1: Listado de precios de instrumentos para etapa de almacenamiento

FUENTE: Elaboración propia

ITEM	CANTIDAD	INSTRUMENTO	MARCA Y MODELO	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
01	3	Transmisor de Nivel, Radar	Rosemount 5401	4,094.00	12,282.00
02	6	Switch de Nivel, tipo Tenedor	Rosemount 2120	840.00	5,040.00
03	6	Válvula de control NC	FISHER/ EIM	4,882.00	29,292.00
				*TOTAL	46,614.00

TABLA 4.2: Listado de precios de instrumentos para etapa de despacho

FUENTE: Elaboración propia

ITEM	CANTIDAD	INSTRUMENTO	MARCA Y MODELO	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
01	1	Transmisor de Presión	Rosemount 2051	2,236.00	2,236.00
02	1	Transmisor de Temperatura	Rosemount 644	1,688.00	1,688.00
03	1	Transmisor de Flujo	Endress + Hauser	4,256.95	4,256.95
04	2	Variador de Velocidad	Allen Bradley	4,290.00	8,580.00
05	1	Controlador Lógico Programable	Allen Bradley	4,430.80	4,430.80
06	1	Interface Hombre Máquina	Allen Bradley	2,029.50	2,029.50
				*TOTAL	23,221.25

** El precio de los equipos incluye importación y puesta en obra.*

TABLA 4.3: Listado de precios para equipamiento e instalación del proyecto

FUENTE: Elaboración propia

ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO (USD)
01	Equipos de instrumentación – Etapa de almacenamiento	46,614.00
02	Equipos de instrumentación – Etapa de despacho	23,221.25
03	Instalación, comisionamiento y puesta en marcha	64,139.00
		TOTAL
		133,974.25

Para una evaluación completa de la rentabilidad del proyecto, se necesitan además de los precios de los equipos, datos adicionales que son proporcionados por la empresa.

TABLA 4.4: Listado de precios para obras civiles y sistemas de seguridad

FUENTE: Elaboración propia

ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO (USD)
01	Obras civiles	149,784.00
02	Instalación de tanques y tuberías	641,358.00
03	Sistemas de seguridad	118,500.00
TOTAL		909,642.00

TABLA 4.5: Costo total del proyecto

FUENTE: Elaboración propia

ITEM	DESCRIPCIÓN	PRECIO (USD)
01	Automatización e instrumentación del proyecto	133,974.25
02	Obras civiles, tanques y tuberías, sistemas de seguridad	909,642.00
03	Contingencias	52,180.81
TOTAL		1'095,797.06

4.2. Ingresos

La producción promedio del lote XIII A de la empresa Olympic Perú fue de 3500 bpd, para el periodo Enero 2012 – Julio 2013.

Se estima que son 1' 260 000 barriles al año los que se requieren despachar, por lo tanto se tendrá un mínimo de 42 despachos anuales (capacidad de planta 30 000 bbls). (Minem, 2012)

La empresa actualmente destina 1 USD por cada barril para la etapa de despacho y almacenamiento, la cual luego de implementar el nuevo sistema planea bajar a 0.7 USD.

4.3. Egresos

El presupuesto destinado por la empresa para la operación y mantenimiento de la nueva planta de almacenamiento y despacho, para el primer año es de 411,900.00 USD; con un incremento anual de 7% (inflación anual).

4.4. Flujo de caja y evaluación financiera

TABLA 4.6: Flujo de caja proyectado para los tres primeros años de Olympic Perú

FUENTE: Elaboración propia

Año	0	1	2	3
Inversión	-1'095,797.06			
Ingresos		882,000.00	1,008,000.00	991,200.00
Egresos		-411,900.00	-440,733.00	-471,584.31
Flujo de caja	-1'095,797.06	470,100.00	567,267.00	519,615.69

Con los datos de la tabla anterior se obtendrían los siguientes valores para el VAN y el TIR considerando una tasa de descuento de 10% (referencia Refinería Talara).

Los valores obtenidos del VAN y TIR se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 4.7: Indicadores de Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno

FUENTE: Elaboración propia

Indicador	Resultado
VAN (USD)	\$190,777.24
TIR	19.46%

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Luego del análisis realizado a los requerimientos de la empresa Olympic Peru, se determinó utilizar el método de control ON/OFF y en base a esto se diseñó el sistema de control y se eligieron los instrumentos para la etapa de llenado y vaciado de los tanques de petróleo.
- En base a los requerimientos de la empresa Olympic Peru se determinó utilizar el método de control Proporcional-Integral para diseñar el sistema de control de caudal en la línea de despacho y elegir los instrumentos de control.
- De acuerdo al análisis realizado en el capítulo de costos del proyecto se concluye que el proyecto sería rentable en base a los datos obtenidos de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR).
- La empresa tiene planeado invertir en ampliar su capacidad de producción, teniendo en cuenta que el actual método de almacenamiento y despacho presenta muchas demoras y problemas logísticos; con la implementación de este proyecto se lograría mejorar el tiempo de despacho de 30 000 barriles en 24 horas aproximadamente y se eliminarían los problemas de logística debido a que el proceso sería automático.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar las señales generadas por el sistema de medición de caudal, presión y temperatura al momento de implementar el sistema de seguridad de detección de fugas en la línea submarina.
- Se recomienda que la instalación de válvulas, sensores y demás equipos sea en lugares de fácil acceso, para facilitar de esta manera la labor de mantenimiento cuando esta sea necesaria.
- Para la instalación del sistema se recomienda utilizar herramientas y equipos que cumplan con los estándares de calidad y evitar así mal funcionamiento de los equipos que causen contratiempos en la implementación del proyecto.
- Se recomienda el uso de un sistema de respaldo de energía para los equipos e instrumentos que forman parte del proyecto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- minem. (2010a). *Evaluación del estudio de impacto ambiental*. Recuperado el 25 de Noviembre de 2013, de Ministerio de Energía y Minas:
<http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/estudios/AUTO%20DIRECTORALES/AUTO%20256-2010-MEM-AAE.pdf>
- minem. (2010b). *Capítulo III Descripción del proyecto*. Recuperado el 14 de Febrero de 2014, de Ministerio de Energía y Minas:
http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/ARCHIVOS/estudios/EIAS%20-%20hidrocarburos/EIA/EIA_OLYMPICI%20AMARRADERO%20MULTIBOYAS/CAPITULO%20III%20DESCRIPCION%20DEL%20PROYECTO.pdf
- Minem. (2012). *PRODUCCIÓN PROMEDIO DE HIDROCARBUROS LÍQUIDOS - PETRÓLEO LOTE XIII - OLYMPIC PERU INC*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2013, de Ministerio de Energía y Minas:
[http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Lote%20XIII\(6\).pdf](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/Lote%20XIII(6).pdf)
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ta ed.). Madrid: Pearson.
- López Monteagudo, F. E., Arias García, R., & Gonzáles Elías, M. E. (2005). *Accionamientos de Motores Trifásicos de Inducción*. Recuperado el 19 de Junio de 2014, de Universidad Autónoma de Zacatecas:
http://www.uaz.edu.mx/cippublicaciones/eninvie2K5/C_1%5CC_4Lopez.pdf
- HARTcomm. (2014). *Como funciona HART*. Recuperado el 10 de junio de 2014, de HART communication Foundation:
http://sp.hartcomm.org/hcp/tech/aboutprotocol/aboutprotocol_how.html
- Olmedo, F. (2008). *¿Qué es el Petróleo? Tipos de Petróleo*. Recuperado el 3 de Setiembre de 2014, de Biodisol:
<http://www.biodisol.com/cambio-climatico/que-es-el-petroleo-tipos-de-petroleo-hidrocarburos-west-texas-intermediate-petroleo-brent-blend-clasificacion-del-crudo/>
- Santaella, C. (2010). *La producción de hidrocarburos*. Recuperado el 3 de setiembre de 2014, de monografias:
<http://www.monografias.com/trabajos92/produccion-hidrocarburos/produccion-hidrocarburos.shtml>

- Allen Bradley. (2002). *MicroLogix™ 1500 Programmable Controllers*. Recuperado el 22 de Junio de 2014, de Allen Bradley:
http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/um/1764-um001_-en-p.pdf
- Allen Bradley. (2014a). *PowerFlex® 400 Adjustable Frequency AC Drives for Fan & Pump Applications*. Recuperado el 21 de Junio de 2014, de Allen Bradley:
http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/22c-td001_-en-p.pdf
- Allen Bradley. (2014b). *PanelView Plus 6 Specifications*. Recuperado el 22 de Junio de 2014, de Allen Bradley:
http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/2711p-td005_-en-p.pdf
- Emerson. (2012). *Fisherr POSI-SEAL™ A81 Rotary Valve*. Recuperado el 15 de Junio de 2014, de Emerson Process Management:
<http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/bulletins/d103301x012.pdf>
- Emerson. (2013). *Rosemount 2051 Pressure Transmitter*. Recuperado el 20 de Junio de 2014, de Emerson Process Management :
<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0100-4101.pdf>
- Emerson. (2014a). *Rosemount 5400 Series*. Recuperado el 10 de junio de 2014, de Emerson Process Management:
<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0100-4026.pdf>
- Emerson. (2014b). *Rosemount 2120*. Recuperado el 15 de junio de 2014, de Emerson Process Management:
<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Rosemount%20Documents/00813-0100-4030.pdf>
- Emerson. (2014c). *A Compact and Reliable Quarter-Turn Electric Actuator*. Recuperado el 18 de Junio de 2014, de Emerson Process Management:
http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Valve%20Automation%20Documents/EIM/EIM_HQ_6P_A4.pdf
- Emerson. (2014d). *Rosemount® 644 Temperature Transmitter*. Recuperado el 20 de Junio de 2014, de Emerson Process Management:

<http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/pm%20rosemount%20documents/00813-0100-4728.pdf>

Endress + Hauser. (2011). *Proline Prosonic Flow 93P*. Recuperado el 20 de Junio de 2014, de Endress + Hauser:

https://portal.endress.com/wa001/dla/5000254/2996/000/02/TI00083DEN_1311.pdf

BIBLIOGRAFÍA

- Creus, A. (1997). *Instrumentación Industrial* (6ta ed.). Barcelona: Alfaomega.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5ta ed.). Madrid: Pearson.
- Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automático* (7ma ed.). Edo. de México: Prentice Hall.
- Ross, S. A., Westerfield, R. W., & Jaffe, J. F. (2012). *Finanzas corporativas* (9na ed.). México: McGraw Hill.
- Peralta Torres, C. J., & Mogollón Borrero, E. A. (2008). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL DE NIVEL DE TANQUES DE GASOLINA PARA UNA REFINERÍA*. Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Privada Antenor Orrego, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, Trujillo.
- Rodríguez Padilla, J. W., & Li Cruzado, D. (2008). *Diseño de un Sistema de Control de Nivel en Tanques de Crudo en la Embarcación Sunrise Command de la Empresa IMI del Perú SAC*. Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Privada Antenor Orrego, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica, Trujillo.