

**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE  
SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA**

**VICERRECTORADO  
CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**



**REDISEÑO DEL DUCTO DE INYECCIÓN DE SALMUERA AL  
POZO BERMEJO X-2 PARA SU MEJORA OPERATIVA**

**TRABAJO EN OPCIÓN A DIPLOMADO EN TRANSPORTE,  
ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS  
VERSIÓN III**

**ROLMAN BLACUTT PANDAL  
Sucre - Bolivia  
2024**

## **CESIÓN DE DERECHOS**

Al presentar este trabajo como requisito previo a la obtención del Diplomado en Transporte, Almacenamiento y Distribución de Hidrocarburos de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Rolman Blacutt Pandal', with a date 'Mayo 2017' written below it.

---

ROLMAN BLACUTT PANDAL

Sucre, mayo de 2024

## **DEDICATORIA**

Con Emoción del deber cumplido, dedico el presente trabajo a mis padres, quienes han sido, y seguirán siendo los gestores del progreso en mi vida, a través de su apoyo y abnegación para alcanzar la culminación de las metas trazadas

## **AGRADECIMIENTOS**

En este momento de culminación académica, quiero dedicar unas palabras llenas de agradecimiento y reconocimiento. Aunque mi padre CORCINO BLACUTT ya no está físicamente presente, su espíritu y legado siguen vivos en cada logro que alcanzo. A ti, papá, quiero expresarte mi gratitud eterna por tu amor incondicional, tu apoyo constante y tu confianza en mi capacidad para alcanzar mis metas. A pesar de tu partida, siempre has sido mi mayor inspiración y motivación. Tu ausencia física ha dejado un vacío en mi corazón, pero tu recuerdo y sabiduría siguen guiando mis pasos. Gracias, papá, por creer en mí y por ser mi guía. Este logro es en honor a ti y a todo lo que representas.

## **RESUMEN**

El presente trabajo busca el proponer el REDISEÑO DEL DUCTO DE INYECCIÓN DE SALMUERA AL POZO BERMEJO X-2 PARA SU MEJORA OPERATIVA en el departamento de Tarija, de esta manera evitar la manipulación peligrosa con la que actualmente realizan el trasvase de petróleo crudo y garantizar operaciones seguras y amigables con el medio ambiente. La metodología de investigación aplicada en este estudio, fue de tipo mixta cualitativa y cuantitativa mediante el uso de instrumentos como entrevistas realizadas a ingenieros que actualmente son operadores de la planta Bermejo-Toro y profesionales que realizan servicios de ingeniería a dicha planta obteniendo como resultado un diagnóstico de los problemas que se tienen actualmente con el transporte de salmuera desde la bomba reciprocante hasta el pozo inyector. De acuerdo a los resultados obtenidos, se propuso realizar el recambio de la cañería de transporte de salmuera (acero negro) por una tubería multicapa plástica, de esta manera se garantizará que no habrá problemas debido a la corrosión. Por otro lado, haciendo un análisis a la calidad del agua y de acuerdo a los componentes corrosivos con los que cuenta (hierro y cloruros) se determinó mediante el método PRENT que el tipo de acero que puede manejar dicho fluido es el acero Inoxidable Dúplex, por ende, se seleccionó una nueva bomba en eje libre el cual será acoplado al motor actual con el que cuentan, también se propuso fabricar una base estructural donde se armará el equipo completo. Con el estudio propuesto descrito líneas arriba, se pretende garantizar las operaciones diarias en lo que respecta a la inyección de salmuera reduciendo al mínimo la inversión, la cual ascendería aproximadamente de 203.000,00 USD, monto de dinero que puede ser accesible y puede ser inscrito fácilmente en su programa operativo anual.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....                                      | 1  |
| 1.1. ANTECEDENTES .....                                             | 1  |
| 1.1.1. Planteamiento del problema .....                             | 1  |
| 1.1.2. Formulación del Problema .....                               | 2  |
| 1.2. OBJETIVOS .....                                                | 2  |
| 1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....                                       | 2  |
| 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                   | 2  |
| 1.3. JUSTIFICACIÓN .....                                            | 3  |
| 1.3.1. Justificación técnica .....                                  | 3  |
| 1.3.2. Justificación Económica.....                                 | 3  |
| 1.4. METODOLOGÍA.....                                               | 3  |
| 1.4.1. Paradigma de la investigación .....                          | 3  |
| 1.4.2. Enfoque de la investigación .....                            | 3  |
| 1.4.3. Tipo de investigación.....                                   | 3  |
| 1.4.4. Diseño de investigación .....                                | 4  |
| 1.4.5. Método de investigación .....                                | 4  |
| 1.4.6. Técnicas – instrumentos .....                                | 4  |
| CAPITULO II: DESARROLLO.....                                        | 5  |
| 2.1. MARCO TEÓRICO (CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL). ....                  | 5  |
| 2.1.1. MARCO CONCEPTUAL .....                                       | 5  |
| 2.1.2. MARCO CONTEXTUAL.....                                        | 27 |
| 2.2. INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDO.....                              | 44 |
| 2.2.1. Descripción de los parámetros operativos.....                | 44 |
| 2.2.2. Selección de la Tubería para la conducción de Salmuera ..... | 46 |
| 2.2.3. Recambio de la bomba Reciprocante.....                       | 51 |
| 2.2.4. Estimación de costos del proyecto .....                      | 57 |

|                                  |                              |    |
|----------------------------------|------------------------------|----|
| 2.3.                             | ANÁLISIS Y CONCLUSIÓN.....   | 59 |
| 2.3.1.                           | Análisis de resultados ..... | 59 |
| CAPITULO III: CONCLUSIONES ..... |                              | 61 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 Esquema de una batería de producción.....                              | 5  |
| Figura 2 Múltiple de recolección .....                                          | 8  |
| Figura 3 Líneas de flujo de campos petroleros.....                              | 8  |
| Figura 4 Tanque de lavado de petróleo .....                                     | 9  |
| Figura 5 Depurador de Gas.....                                                  | 10 |
| Figura 6 Bombas para petróleo crudo .....                                       | 11 |
| Figura 7 Rango utilizable real vs. Rango utilizable percibido .....             | 15 |
| Figura 8 Corrosión en tuberías .....                                            | 15 |
| Figura 9 Costo de instalación - Sistema complejo .....                          | 17 |
| Figura 10 Esquema del conjunto Biela – Manivela de una bomba de pistón .....    | 17 |
| Figura 11 Bomba de émbolo de doble efecto .....                                 | 19 |
| Figura 12 Curva característica bomba ZM 44-MAXXI .....                          | 26 |
| Figura 13 Campo de explotación BERMEJO - TORO.....                              | 28 |
| Figura 14 Ingreso a la batería Bermejo .....                                    | 29 |
| Figura 15 Vista satelital de la batería Bermejo .....                           | 30 |
| Figura 16 Bomba de cargado de crudo a cisternas.....                            | 31 |
| Figura 17 Vista de la bomba Bipartida de la RCI.....                            | 32 |
| Figura 18 Bomba de cavidades progresivas del pozo BERMEJO X2 .....              | 33 |
| Figura 19 Planta de Tratamiento de Agua para la Inyección de Salmuera .....     | 34 |
| Figura 20 Tanque vertical atmosférico que recolecta la producción de agua ..... | 35 |
| Figura 21 Bomba Booster para la el Trasvase de Salmuera .....                   | 35 |
| Figura 22 Bomba Reciprocante en operación .....                                 | 36 |
| Figura 23 Motor de combustión interna de la bomba .....                         | 37 |
| Figura 24 Línea de transporte de salmuera para inyección .....                  | 38 |
| Figura 25 Punto de medición de caudal de la línea de salmuera .....             | 38 |



|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 26 Daños por corrosión en la línea de transporte de salmuera .....                                            | 39 |
| Figura 27 Efectos de la temperatura en la velocidad de corrosión para el acero en ambientes de CO <sub>2</sub> ..... | 41 |
| Figura 28 La morfología SEM de las capas de productos de corrosión .....                                             | 41 |
| Figura 29 La morfología SEM y el análisis EDS.....                                                                   | 42 |
| Figura 30 La morfología SEM y el análisis EDS.....                                                                   | 43 |
| Figura 31 La morfología SEM y el análisis EDS.....                                                                   | 44 |
| Figura 32 Esquema final propuesto para la bomba de inyección de salmuera .....                                       | 56 |
| Figura 33 Esquema final propuesto para la instalación de la base estructural .....                                   | 57 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1 Categorías de ASTM D2837 .....                                                | 13 |
| Tabla 2 Factores de reducción de Temperatura.....                                     | 14 |
| Tabla 3 Propiedades de agua .....                                                     | 22 |
| Tabla 4 Pérdida de altura por fricción en la tubería.....                             | 24 |
| Tabla 5 Tipo de levantamiento artificial por pozo .....                               | 28 |
| Tabla 6 Datos operativos de los tanques de almacenamiento.....                        | 30 |
| Tabla 7 Especificaciones Técnicas de la bomba para cargado de petróleo crudo.....     | 31 |
| Tabla 8 Especificaciones técnicas de la bomba Electro Sumergible .....                | 31 |
| Tabla 9 Especificaciones técnicas de la bomba contra incendios .....                  | 32 |
| Tabla 10 Especificaciones técnicas de la bomba de Tornillo del pozo BJO-X2 .....      | 33 |
| Tabla 11 Especificaciones técnicas de la bomba Reciprocante .....                     | 36 |
| Tabla 12 Longitud de las cañerías del sistema de Inyección de Agua .....              | 37 |
| Tabla 13 Composición química de la muestra ensayada (% en peso) .....                 | 39 |
| Tabla 14 Componentes y la concentración correspondiente de los medios simulados ..... | 40 |
| Tabla 15 Condiciones experimentales de corrosión dinámica de cupones. ....            | 40 |
| Tabla 16 Especificaciones de la salmuera de producción .....                          | 45 |
| Tabla 17 Análisis Fisicoquímico del agua de formación.....                            | 46 |
| Tabla 18 Características técnicas de materiales termoplásticos .....                  | 47 |
| Tabla 19 Diseño Hidrostático Básico .....                                             | 49 |
| Tabla 20 Características técnicas de materia.....                                     | 51 |
| Tabla 21 Tolerancias por corrosión en aceros .....                                    | 52 |
| Tabla 22 Valores PREN para diferentes tipos de acero.....                             | 53 |
| Tabla 23 Modelos de Bombas Reciprocantes de la marca BAOJI .....                      | 54 |
| Tabla 24 Especificaciones del motor a gas de la bomba reciprocante .....              | 56 |
| Tabla 25 Costos por la provisión de los equipos .....                                 | 58 |

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Tabla 26 Costos por la provisión de los equipos .....     | 58 |
| Tabla 27 Costos por la instalacion de Tuberia PVC-U ..... | 59 |

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

En lo que respecta a investigaciones locales encontradas en la actualidad, se cuenta con el trabajo realizado por el estudiante **JHASMANI CEREZO NAVARRO** publicado por la **UNIVERSIDAD PRIVADA DOMINGO SAVIO** (Sede Sucre) titulado “**REDISEÑO DEL SISTEMA DE BOMBEO PARA LA INYECCIÓN DE SALMUERA AL POZO BERMEJO X-2**”, en este proyecto como objetivo principal se realizó el cambio total de la bomba tríplex de inyección por una bomba con motor eléctrico; adicionalmente se propuso la instalación de un grupo electrógeno que alimente de electricidad a la bomba, de esta manera se buscaba eliminar la dependencia del gas natural asociado saliente del pozo.

En la **UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES**, el estudiante **EDWIN LAIME VITO** (2019), realizó un estudio sobre el “**COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN DE LA TUBERÍA DE REVESTIMIENTO DE ACERO DEL 3% DE CROMO POR EL CONTENIDO DE IMPUREZAS EN EL CAMPO BERMEJO**” cuya finalidad fue el realizar cambios en la tubería de producción debido a los daños ocasionados por el alto contenido de impurezas que se empezaron a producir en años anteriores, por ende, desde esas fechas ya se tenía un registro de los componentes corrosivos que se producían y afectaban a los equipos superficiales.

#### 1.1.1. Planteamiento del problema

El ducto (bomba y tuberías) que transporta y permite la inyección de salmuera al pozo Bermejo X-2 actualmente presenta daños irreversibles ocasionados por la corrosión, estos daños ponen en riesgo el normal funcionamiento del sistema de inyección de agua y, por ende, pone en riesgo la producción de petróleo del campo Bermejo.

El daño por corrosión que se experimenta en la actualidad se debe a que la composición química en el agua de formación cambio bastante, de modo que ahora se tienen altos contenidos de hierro y cloruros, estos componentes se han convertido en un verdadero problema por los daños ocasionados al acero negro y hierro en fundición en gris.

Entre los principales efectos que ocasiona el exceso de impurezas en el acero se tiene:

- El Incremento en el contenido de Hierro de la salmuera, ocasionó daños en los revestimientos del acero, tanto en la bomba y como en las cañerías.

- El aumento en el contenido de cloruros, incrementó el potencial corrosivo del agua y atentó principalmente la resistencia del acero, estos daños afectaron principalmente los componentes internos de la bomba.

Las causas descritas anteriormente ocasionaron daños por corrosión en la bomba, lo cual provocó que en la actualidad esta tenga vibraciones excesivas y ruidos anormales producto de la cavitación del equipo. Por lo mencionado anteriormente, es que se pone en riesgo la operación de la bomba, sumado al hecho de que la misma no cuenta con un equipo de respaldo, originaria que la producción del campo Bermejo se vea afectada ocasionando severos daños tanto técnicos como económicos a la empresa.

En lo que concierne a las cañerías para la conducción de salmuera, estas después de realizar un análisis de integridad, arrojaron valores negativos dando como resultado defectos producidos por corrosión (pitting) los cuales son críticos en puntos localizados a lo largo de todo el tramo de transporte.

#### **1.1.2. Formulación del Problema**

¿De qué manera se podrá garantizar el transporte de salmuera a través del ducto de inyección hacia el pozo Bermejo considerando el fluido corrosivo con el que se cuenta en la actualidad?

### **1.2. OBJETIVOS**

#### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Rediseñar del ducto de inyección de salmuera al pozo Bermejo X-2 para su mejora operativa.

#### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

-  Realizar una descripción de batería Bermejo, donde se haga un énfasis en el estado actual del sistema de inyección de salmuera.
-  Seleccionar una tubería adecuada para el transporte de salmuera en reemplazo de las cañerías de acero al carbono con la que cuentan en la actualidad.
-  Proponer modificaciones al sistema de bombeo actual, de manera que se haga un recambio de la unidad de bombeo minimizando costos de inversión.
-  Estimar los costos de inversión para el desarrollo del presente trabajo.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

#### **1.3.1. Justificación técnica**

Se propone el reemplazo de las cañerías de acero al carbono por tuberías de PVC en la red de transporte de salmuera del campo Bermejo, basado en la necesidad de manejar fluidos corrosivos de manera más efectiva. Las tuberías de PVC, seleccionadas según estándares reconocidos en la industria petrolera, garantizan una mayor resistencia a la corrosión y una vida útil prolongada, reduciendo así los costos de mantenimiento y ofreciendo una instalación más rápida y económica. Además, se sugiere el recambio de la bomba de inyección por una unidad resistente y adecuada para manejar los componentes corrosivos presentes en la salmuera, asegurando un funcionamiento eficiente y confiable del sistema.

#### **1.3.2. Justificación Económica**

Asegurando que el ducto de transporte de salmuera garantice el manejo de fluidos corrosivos se tendrá una producción constante de petróleo, por ende, los ingresos mensuales de la empresa operadora del campo garantizará sus ingresos mensuales; por otro lado, se evitarán costos producto de interrupciones y/o reparaciones que se vienen desarrollando en la actualidad debido a los mantenimientos correctivos que se realizan.

### **1.4. METODOLOGÍA**

La metodología desempeña un papel fundamental en una investigación al proporcionarnos una hoja de ruta que nos orienta sobre las acciones a seguir y la manera de proceder.

#### **1.4.1. Paradigma de la investigación**

Sera un Paradigma Positivista, ya que implicara la recopilación de datos objetivos y medibles, como la distancia del ducto que transporta la salmuera hacia el pozo Bermejo y los parámetros operativos de la bomba de inyección.

#### **1.4.2. Enfoque de la investigación**

Tendrá un enfoque cuantitativo, ya que el estudio se centra en aspectos técnicos que ameritan el cálculo de pérdidas de cargas por medio de datos de campo. Además, este enfoque podría permitir la utilización de herramientas cuantitativas para tomar decisiones informadas y realizar análisis de costos y beneficios.

#### **1.4.3. Tipo de investigación**

Sera del tipo explicativo, ya que se centrará en proporcionar una comprensión más profunda sobre la selección de tubulares de material plástico para el transporte de salmuera.

#### **1.4.4. Diseño de investigación**

La investigación tendrá su enfoque principal en la recopilación de datos proporcionados por personal operador de la planta, cabe resaltar que, en el presente trabajo, no se realizaran pruebas del tipo experimental.

#### **1.4.5. Método de investigación**

##### **a) Método teórico**

 **Método bibliográfico:** Este enfoque se basa en la búsqueda y revisión exhaustiva de fuentes bibliográficas pertinentes, tales como catálogos de fabricantes de bombas, tuberías, informes técnicos, etc.

 **Método descriptivo:** Este método se centra en la recopilación sistemática y la presentación de datos y hechos relevantes relacionados con la planta de tratamiento de petróleo crudo y su disposición de aguas residuales.

 **El método sintético:** Este método nos permitirá integrar información y datos procedentes de diversas fuentes, tales como estudios técnicos previos, regulaciones, resultados de inspecciones, y datos operativos.

#### **1.4.6. Técnicas – instrumentos**

Se realizará entrevistas a personal estratégico que opera la batería Bermejo. De la misma manera proporcionaran una variedad de perspectivas y datos para abordar los objetivos de investigación. Y como instrumento se utilizará fichas técnicas, Excel, planillas, etc

## CAPITULO II: DESARROLLO

### 2.1. MARCO TEÓRICO (CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL).

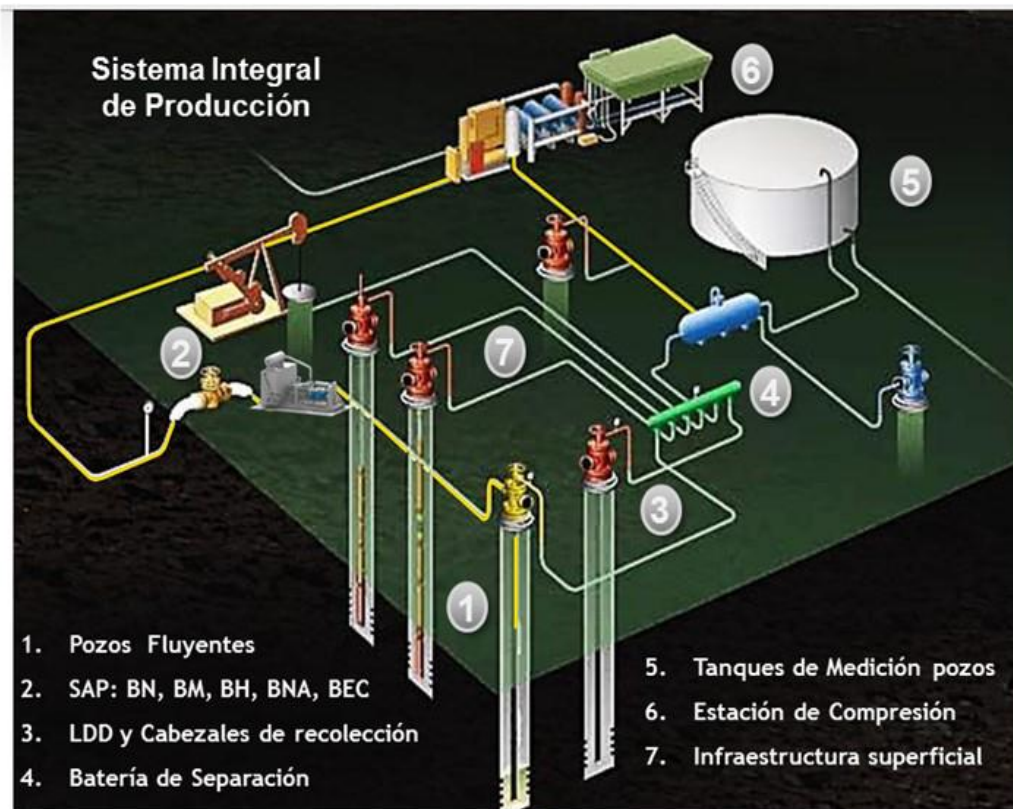
#### 2.1.1. MARCO CONCEPTUAL

##### 2.1.1.1. Batería de producción

Es el Conjunto de Líneas, válvulas, vasijas, equipos y accesorios mediante los cuales se realiza el manejo de los fluidos provenientes de los pozos, efectuando la recolección, separación de las dos o tres fases, encausarlos al sitio de almacenamiento, medirlos y entregarlos al comprador, todo lo anterior debe realizarse con seguridad, sin alterar el equilibrio del medio ambiente y operacionalmente eficiente. Las baterías de producción son llamadas también facilidades de producción y/o estaciones de producción.

**Figura 1**

*Esquema de una batería de producción*



Fuente: Recopilado de (ENERGY & COMMERCE, 2023)



Las funciones de Batería de Producción son las siguientes:

- Recolectar la producción de los diferentes pozos de una determinada área.
- Separar la fase líquida y gaseosa del líquido multifase (Emulsión) proveniente de los pozos productores.
- Medir la producción de petróleo, agua y gas de cada pozo productor.
- Proporcionar un sitio para el almacenamiento temporal de petróleo. Bombear el petróleo al patio de tanques.
- Manejo de la Producción desde el cabezal de cada pozo arranca la tubería de flujo que, tendida sobre el suelo, llega a una determinada estación de recolección, diseñada para recibir la producción de cierto número de pozos.

**a) Etapas del manejo del petróleo en superficie**

Las etapas por las cuales el petróleo crudo es sometido en superficie son las siguientes:

 **Etapas de Recolección**

Consiste en recolectar la producción de los diferentes pozos de una determinada área a través de tuberías tendidas desde el pozo hasta la Estación de Flujo respectiva, o a través de tuberías o líneas provenientes de los múltiples de petróleo.

 **Etapas de Separación**

Una vez recolectado, el petróleo crudo o mezcla de fases (líquida y gas) se somete a una separación líquido–gas dentro del separador. La separación ocurre a distintos niveles de presión y temperatura establecidas por las condiciones del pozo.

 **Etapas de depuración**

Por esta etapa pasa únicamente el gas que viene de la etapa de separación, y lo que se busca es recolectar los restos de petróleo en suspensión que no se lograron atrapar en el separador, además de eliminar las impurezas que pueda haber en el gas, como lo son  $H_2S$  y  $CO_2$ .

 **Etapas de Medición del Petróleo y gas**

El proceso de medición de fluidos y posterior procesamiento de datos, se hace con la finalidad de conocer la producción general de la estación y/o producción individual de cada pozo.



### **Etapas de Calentamiento**

Después de pasar el crudo por el separador, la emulsión agua-petróleo va al calentador u horno, este proceso de calentamiento de la emulsión tiene como finalidad ocasionar un choque de moléculas acelerando la separación de la emulsión.



### **Etapas de Deshidratación**

Después de pasar por la etapa de calentamiento, la emulsión de petróleo y agua es pasada por la etapa de deshidratación con la finalidad de separar la emulsión y extraer las arenas que vienen desde los pozos.



### **Etapas de Almacenamiento del Petróleo**

Diariamente en las Estaciones de Flujo es recibido el petróleo crudo producido por los pozos asociados a las estaciones, este es almacenado en los tanques de almacenamiento después de haber pasado por los procesos de separación y deshidratación.



### **Etapas de Bombeo**

Después de pasar por las distintas etapas o procesos llevados a cabo dentro de la Estación de Flujo, el petróleo ubicado en los tanques de almacenamiento es bombeado hacia los patios de tanques para su posterior envío a las refinerías o centros de despacho a través de bombas de transferencia.

## **b) Componentes Básicos de la Batería**

Los componentes de una batería de producción son los siguientes:



### **Múltiple de Recolección**

En la estación de flujo de recolección, el múltiple de producción representa un sistema de recibo de las líneas de flujo de cada uno de los pozos productores asignados a esta estación. Facilita el manejo de la producción total de los pozos que ha de pasar por los separadores como también el aislamiento de pozos para pruebas individuales de producción (cuantificar su producción diaria)

**Figura 2**

*Múltiple de recolección*



**Fuente:** Recopilado de (Bracho, 2021)



### **Líneas de Flujo**

Se denomina línea de flujo a la tubería que se conecta desde el cabezal de un pozo hasta el múltiple de producción de su correspondiente estación de flujo. Las líneas de flujo son aquellos sistemas de manejo que transportan el flujo en forma bifásica, desde los pozos hasta un punto de convergencia denominado múltiple.

**Figura 3**

*Líneas de flujo de campos petroleros*



**Fuente:** Recopilado de (Bracho, 2021)



### Tanque Lavador

Es un tanque tratador con flujo descendente central vertical que opera a presión atmosférica, tiene una cámara superior desgasificadora donde la emulsión a tratar desciende por el centro hasta un dispersor (spreader) por la cual ingresa al nivel de agua buscando su camino de ascenso por flotación (diferencia de densidad) hasta el nivel superior de petróleo.

**Figura 4**

*Tanque de lavado de petróleo*



**Fuente:** Recopilado de (Bracho, 2021)



### Separadores

Se refieren a un separador de petróleo y gas convencional. Estos recipientes de separación son normalmente utilizados en locaciones de producción o plataformas cerca del cabezal, tubo múltiple o unidad de tanques para separar los fluidos producidos del pozo, en líquido y gas.



### Depurador de Gas

Por esta etapa pasa únicamente el gas que viene de la etapa de separación, y lo que se busca es recolectar los restos de petróleo en suspensión que no se lograron atrapar en el separador, además de eliminar las impurezas que pueda haber en el gas, como lo son  $H_2S$  y  $CO_2$ . El líquido recuperado en esta etapa es reinsertado a la línea de líquido que va hacia el tanque de lavado o de almacenamiento según sea el caso, el gas limpio es enviado por las tuberías de recolección a las plantas de compresión o miniplantas, y otra cantidad va para el consumo interno del campo cuando se trabaja con motores a gas.

**Figura 5**

*Depurador de Gas*



**Fuente:** Recopilado de (Bracho, 2021)



### **Calentadores o Calderas**

Después de pasar el crudo por el separador, la emulsión agua-petróleo va al calentador u horno, este proceso de calentamiento de la emulsión tiene como finalidad ocasionar un choque de moléculas acelerando la separación de la emulsión.



### **Bombas de Crudo**

Las bombas son dispositivos que se encargan de transferir energía a la corriente del fluido impulsándolo, desde un estado de baja presión estática a otro de mayor presión. Están compuestas por un elemento rotatorio denominado impulsor, el cual se encuentra dentro de una carcasa llamada voluta. Inicialmente la energía es transmitida como energía mecánica a través de un eje, para posteriormente convertirse en energía hidráulica.

## **Figura 6**

*Bombas para petróleo crudo*



**Fuente:** Recopilado de (Bracho, 2021)

### **2.1.1.2. Tuberías resistentes a la Corrosión**

Durante décadas, los sistemas de tuberías de metal han sido el status quo para muchas aplicaciones industriales. El acero al carbono, el acero inoxidable y otras aleaciones son fuertes, duraderas y capaces de soportar las demandas de altas temperaturas y presiones elevadas de estos entornos.

#### **a) El costo de oportunidad del metal**

El costo de oportunidad de apegarse a lo probado y verdadero puede ser igualmente perjudicial. Muchas aplicaciones industriales (incluyendo el proceso químico, el cloro-alcalino, el de minerales y la generación de energía) están obteniendo un enorme valor de los sistemas de tuberías construidos con policloruro de vinilo clorado (CPVC). Más específicamente, las plantas industriales están reduciendo los costos de instalación, experimentando menos tiempo de inactividad y mejorando la eficiencia del proceso gracias a la transición a tuberías, accesorios y válvulas de CPVC.

#### **b) Ventajas de la Tubería plástica sobre el metal**

La tecnología de CPVC se diseñó específicamente para satisfacer las demandas de entornos de procesos industriales rigurosos. En 1958, Lubrizol fue el primero en formular el CPVC en un material útil para tuberías y conexiones. El CPVC, es un termoplástico capaz de resistir la

exposición prolongada a altas temperaturas y presiones elevadas al mismo tiempo que ofrece una resistencia superior a la corrosión.

**c) Tuberías de Policloruro de vinilo clorado**

El policloruro de vinilo clorado (CPVC) es un importante termoplástico de ingeniería debido a su costo relativamente bajo, alta temperatura de transición vítrea, alta temperatura de distorsión térmica, inercia química y excelentes propiedades mecánicas, dieléctricas, para el fuego.

**d) Resistencia a la temperatura y la presión**

La capacidad de un material para soportar altas temperaturas y presiones durante periodos prolongados de tiempo es esencial para el rendimiento de un sistema industrial. Con cualquier debilidad en ella, los gerentes de operaciones de la planta realizarán reparaciones regularmente, apagarán el sistema para mantenimiento no programado y potencialmente reemplazarán el sistema de tuberías de manera prematura.

**e) Estableciendo el estándar del material**

Cada material de tubería debe validar empíricamente qué nivel de presión interna puede soportar. Para los termoplásticos, tanto la norma ASTM como la ISO publican métodos para clasificar la presión de los materiales de tubería termoplástica, pero la norma ASTM D2837, "Método de Prueba Estándar para Obtener la Base de Diseño Hidrostático para Materiales de Tubería Termoplástica o la Base de Diseño de Presión para Productos de Tubería Termoplástica".

**Tabla 1***Categorías de ASTM D2837*

| RANGO DE VALORES DE LTHS<br>CALCULADOS |                  | BASES DE DISEÑO<br>HISDROSTÁTICO |       |
|----------------------------------------|------------------|----------------------------------|-------|
| psiM                                   | Pa               | psiM                             | Pa    |
| <b>190 to &lt; 240</b>                 | 1.31 to < 1.65   | 200                              | 1.38  |
| <b>240 to &lt; 300</b>                 | 1.65 to < 2.07   | 250                              | 1.72  |
| <b>300 to &lt; 380</b>                 | 2.07 to < 2.62   | 315                              | 2.17  |
| <b>380 to &lt; 480</b>                 | 2.62 to < 3.31   | 400                              | 2.76  |
| <b>480 to &lt; 600</b>                 | 3.31 to < 4.14   | 500                              | 3.45  |
| <b>600 to &lt; 760</b>                 | 4.14 to < 5.24   | 630                              | 4.34  |
| <b>760 to &lt; 960</b>                 | 5.24 to < 6.62   | 800                              | 5.52  |
| <b>960 to &lt; 1200</b>                | 6.62 to < 8.274  | 1000                             | 6.89  |
| <b>1200 to &lt; 1530</b>               | 8.27 to < 10.55  | 1250                             | 8.62  |
| <b>1530 to &lt; 1920</b>               | 10.55 to < 13.24 | 1600                             | 11.03 |
| <b>1920 to &lt; 2400</b>               | 13.24 to < 16.55 | 2000                             | 13.79 |
| <b>2400 to &lt; 3020</b>               | 16.55 to < 20.82 | 2500                             | 17.24 |

**Fuente:** Recopilado de (CORZAN, 2023)

Después, se multiplica un factor de diseño (a menudo denominado como "factor de seguridad") de 0.5 por el HDB psi del material para determinar el estrés máximo permitido en un material, o el estrés de diseño hidrostático (HDS) para aplicaciones de agua.

Este factor de diseño se basa en dos grupos de condiciones:

- Variables de fabricación y prueba, específicamente: variaciones normales en material, fabricación, dimensiones, buenas técnicas de manejo y procesos de evaluación.



- Variables de aplicación y uso, específicamente: instalación, ambiente, temperatura, riesgo involucrado, expectativa de vida deseada y grado de fiabilidad seleccionado.

Según la ASTM, este factor de diseño define que el material es “capaz de soportar continuamente con un alto grado de certeza de que no se producirá una falla en la tubería”. De esta forma, el CPVC tiene una clasificación de presión con agua tanto a temperatura ambiente (73 °F o 22.7 °C) como a 180 °F (82.2 °C). Te mostramos una tabla de reducción de potencia para otras temperaturas dentro del rango operativo del material.

**Tabla 2**

*Factores de reducción de Temperatura*

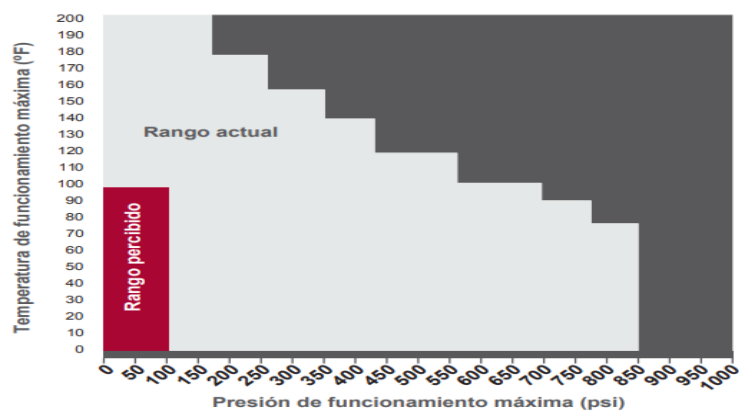
| TEMPERATURA DE TRABAJO |           | FACTOR DE REDUCCIÓN DE TUBERÍAS |              |
|------------------------|-----------|---------------------------------|--------------|
| °F                     | °C        | CPVC 4120-0                     | CPVC 4120-06 |
| 73-80                  | 23.0-26.7 | 1.00                            | 1.00         |
| 90                     | 32.2      | 0.91                            | 0.91         |
| 100                    | 37.8      | 0.82                            | 0.83         |
| 120                    | 48.9      | 0.65                            | 0.70         |
| 140                    | 60.0      | 0.50                            | 0.57         |
| 160                    | 71.1      | 0.40                            | 0.44         |
| 180                    | 82.2      | 0.25                            | 0.41         |
| 200                    | 93.3      | 0.20                            | *            |

**Fuente:** Recopilado de (CORZAN, 2023)

A continuación, te mostramos el rango máximo de temperatura y presión de funcionamiento del CPVC según lo determinado por la norma ASTM D2837. El área roja es lo que la mayoría de los ingenieros perciben como capacidades del CPVC. El gris claro es el rango operativo completo del CPVC.

**Figura 7**

*Rango utilizable real vs. Rango utilizable percibido*



Fuente: Recopilado de (CORZAN, 2023)

#### f) Ventajas del CPVC sobre el metal

##### Corrosión

La ventaja más importante que tiene un sistema de tuberías de CPVC sobre las alternativas de metal es su resistencia a la corrosión. Los sistemas de tuberías de metal resisten aplicaciones de procesamiento de agua fina a limpia con un pH neutro. Sin embargo, tan pronto como el pH de un fluido se extiende mucho más allá de la neutralidad (~7) o se introduce sal (p.ej., agua salobre), los metales comienzan a corroerse y pueden degradarse relativamente rápido.

**Figura 8**

*Corrosión en tuberías*



Fuente: Recopilado de (CORZAN, 2023)

En cambio, las tuberías y los accesorios fabricados con material de CPVC son intrínsecamente inertes a la mayoría de los ácidos, bases y sales, lo que significa que los iones agresivos que atacan a los metales fluyen más allá del CPVC, dejando la tubería ilesa.

Los efectos y la gravedad de la corrosión dentro de un sistema de tuberías variarán dependiendo de la aplicación, pero, en términos generales, la corrosión puede provocar los siguientes problemas:

- La tasa de flujo se puede reducir exigiendo más de las bombas.
- La clasificación de presión disminuye debido al adelgazamiento de las paredes de la tubería.
- La pureza del fluido puede contaminarse cuando las piezas corroídas flotan lejos.
- Los costos de instalación aumentarán, ya que se requieren trabajadores altamente calificados para soldar el sistema.



### **Formación de sarro**

La formación de sarro es otra amenaza importante para las tuberías industriales, ya que puede poner en peligro significativamente las tasas de flujo. A diferentes niveles de pH y rangos de temperatura, ciertos iones metálicos son solubles en agua, lo que les permite fluir a través de un sistema de tuberías de metal sin problemas. Sin embargo, si el fluido en el que se disuelve un metal cae fuera de su rango de solubilidad, los iones pueden salir de la solución y adherirse a las paredes de una tubería de metal.

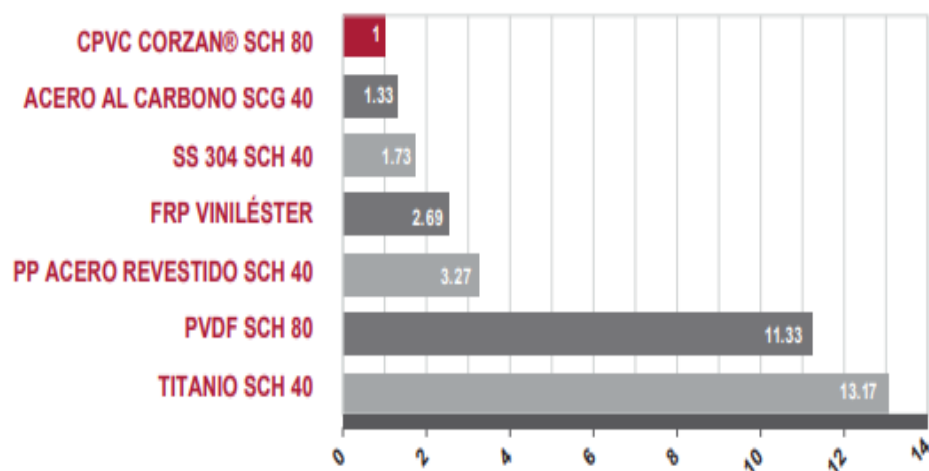


### **Costo de instalación**

La mano de obra, fabricación y otros gastos de instalación pueden combinarse para representar más de la mitad del costo total de instalación de un sistema de tuberías. La siguiente gráfica, producida por Chemical Engineering Magazine, muestra el índice de costo de instalar una tubería de 6 pulgadas. Se comparan los sistemas de tuberías de CPVC con alternativas de metal y termoplástico.

**Figura 9**

*Costo de instalación - Sistema complejo*



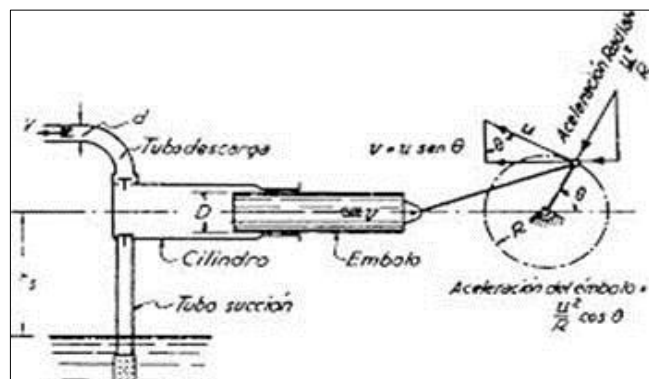
**Fuente:** Recopilado de (CORZAN, 2023)

### 2.1.1.3. Bombas Reciprocantes

Es un dispositivo mecánico de desplazamiento positivo, es decir, recibe un volumen fijo de líquido en condiciones casi de succión, lo comprime a la presión de descarga y lo expulsa por la boquilla de descarga. (PAZ, 1993)

**Figura 10**

*Esquema del conjunto Biela – Manivela de una bomba de pistón*



**Fuente:** Recopilado de Pluspetrol, 2016.

El funcionamiento de una Bomba Reciprocante depende del llenado y vaciado sucesivo de receptáculos de volumen fijo, para lo cual cierta cantidad de agua es obligada a entrar al cuerpo de la bomba en donde queda encerrada momentáneamente, para después ser forzada

a salir por la tubería de descarga. De lo anterior se deduce, en términos generales, que el gasto de una Bomba Reciprocante es directamente proporcional a su velocidad de rotación y casi independiente de la presión de bombeo. (PAZ, 1993)

#### **a) Aplicaciones y limitaciones de las Bombas Reciprocantes**

Las aplicaciones dentro de la industria Gas & Oíl son amplias y variadas, de las cuales se pueden destacar:

##### **Tratamiento del Gas Natural**

El etilenglicol o el trietilenglicol se bombea a un absorbedor a unas 1000 psi para eliminar la humedad del gas natural. El glicol absorbe el agua, se lo estrangula a presión atmosférica y se lo calienta para eliminar el agua. Después, se enfría y se devuelve con la bomba al absorbedor. Para este servicio se utilizan bombas de potencia con motor y reciprocantes de acción directa. (PAZ, 1993)

##### **Carga de aminas**

La mono etanolamina, otras aminas y los absorbentes patentados eliminan el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono del gas natural. Se bombea el absorbente hacia un absorbedor y produce una acción similar a la de los glicoles.

##### **Petróleo pobre**

El aceite para absorción se utiliza igual que los glicoles y a minas pero absorbe los hidrocarburos como butano, propano y etano del gas natural.

##### **Inyección de agua salada**

Un método que se utiliza mucho para la recuperación secundaria de petróleo y gas en los campos casi agotados, es inundar los yacimientos con agua, por lo general, agua salada en pozos periféricos para obligar a los hidrocarburos a moverse hacia el pozo central.

##### **Eliminación de agua salada**

Se suelen utilizar bombas de potencia para bombear el agua salada a un pozo para eliminarla.

**b) Diseño de Bombas reciprocantes**

**Caudal teórico de la bomba de émbolo**

$$Q_{tb} = \frac{A \cdot n \cdot s}{60} \quad \text{Ec. 1}$$

**Donde:**

$Q_{tb}$  = caudal teórico de la bomba, (m<sup>3</sup>/s)

$A_e$  = área transversal del embolo, (m<sup>2</sup>)

$s$  = carrera, (m)

$n$  = Velocidad del cigüeñal (rev/min)

**Caudal real de la bomba de émbolo**

Para el gasto real de la bomba se tiene:

$$Q_{real} = Q_{tb} \cdot H_v \quad \text{Ec. 2}$$

**Donde:**

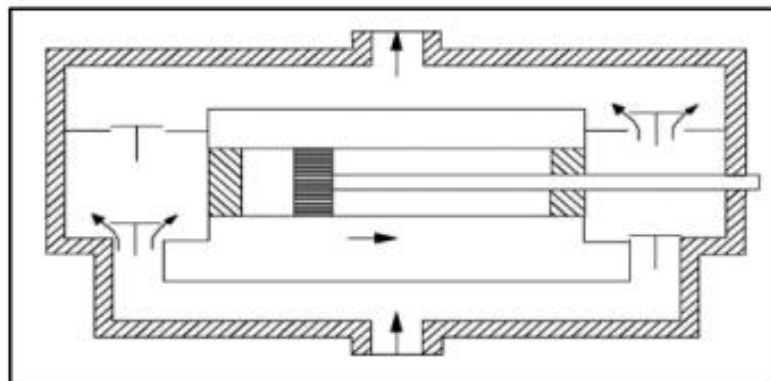
$H_v$  = Oscila entre 0.85 a 0.99, es mayor en las bombas cuyo émbolo es de mayor diámetro y es tanto menor cuanto menor es la viscosidad del fluido. (QUILUMBA, 2018)

**c) Bomba de émbolo de doble efecto**

Son bombas de dos cilindros, tienen la ventaja de aumentar el caudal total de la bomba.

**Figura 11**

*Bomba de émbolo de doble efecto*



**Fuente:** Recopilado de **Pluspetrol**, 2016.

**d) Potencia útil de la bomba de émbolo**

La potencia medida en (W), el rendimiento total ( $\eta_t$ ) en las bombas de émbolo oscila de 0.70 a 0.92 según el tamaño, tipo y calidad de construcción. (QUILUMBA, 2018)

**e) Caudal útil de bomba dúplex (1 cilindro doble efecto)**

$$Q_{ub} = n_t \frac{(2A-a)*s*n}{60} \quad \text{Ec. 3}$$

**Donde:**

A = área del émbolo, (m<sup>2</sup>)

a = área del vástago, (m<sup>2</sup>)

s = carrera, (m)

n = número de revolución de la rueda (RPM)

**f) Altura de bombeo**

Es la sumatoria total medida en metros: de la altura física geodésica, pérdidas por fricción en la tubería y las pérdidas menores y mayores en el sistema de bombeo.

$$H_{TOTAL} = H_{física} + H_{pérdidas} + H_{pérdidas\ menores} \quad \text{Ec. 4}$$

**g) Ecuación de la energía**

Esta es la extensión de la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{\gamma} + h_b = h_L + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{\gamma} \quad \text{Ec. 5}$$

**Donde:**

$h_b$  = Energía añadida (bomba) (W)

Z1; Z2 = alturas geodésicas (m)

$h_L$  = suma de todas las pérdidas

#### **h) Cálculo pérdidas menores**

Pérdida de energía por fricción en llaves y accesorios de instalación por lo general es pequeña en comparación con las pérdidas en las tuberías.

$$h_L = K \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad \text{Ec. 6}$$

**Donde:**

K = coeficiente de resistencia en tablas

v = velocidad promedio del flujo (m/s)

g = gravedad (m/s<sup>2</sup>)

#### **i) Numero de Reynolds**

Para el cálculo del número de Reynolds se utiliza la siguiente Ecuación:

$$N_R = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{v_{pt} \cdot D_i}{\gamma} \quad \text{Ec. 7}$$

**Donde:**

N<sub>R</sub> = número de Reynolds (adimensional)

v = velocidad promedio del flujo en (m/s)

D<sub>i</sub> = diámetro interno de la tubería medida en (m)

γ = viscosidad cinética en (m<sup>2</sup>/s)

μ = viscosidad dinámica en (N\*s/m<sup>2</sup>)

El número de Reynolds es el que determina si un flujo es laminar o turbulento en el interior de la tubería del fluido, para el cual debe considerar lo siguiente. (QUILUMBA, 2018)

**Donde:**

Si N<sub>R</sub> < 2000, el flujo es laminar.

Si N<sub>R</sub> > 4000, el flujo es turbulento.

Si 2000 < N<sub>R</sub> < 4000, el flujo está en región crítica



**Tabla 3***Propiedades de agua*

| Temperatura | Peso específico<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | Densidad<br>(Kg/ m <sup>3</sup> ) | Viscosidad<br>Dinámica<br>(Pa.s) | Viscosidad<br>cinemática<br>(m <sup>2</sup> /s) |
|-------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| 10          | 9.81                                    | 1000                              | 1.30x10 <sup>-3</sup>            | 1.30x10 <sup>-6</sup>                           |
| 15          | 9.81                                    | 1000                              | 1.15x10 <sup>-3</sup>            | 1.15x10 <sup>-6</sup>                           |
| 20          | 9.79                                    | 998                               | 1.02x10 <sup>-3</sup>            | 1.02x10 <sup>-6</sup>                           |
| 25          | 9.78                                    | 997                               | 8.91x10 <sup>-4</sup>            | 8.91x10 <sup>-7</sup>                           |
| 30          | 9.77                                    | 996                               | 8.00x10 <sup>-4</sup>            | 8.00x10 <sup>-7</sup>                           |

**Fuente:** Recopilado de **Pluspetrol**, 2016.**j) Cálculo pérdidas mayores**

Otro factor de pérdida de energía es la fricción del fluido que circula, para el caso del flujo es proporcional a la carga de velocidad, longitud y del diámetro de la tubería. Esto se expresa con la ecuación de Darcy.

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$
Ec. 8

**Donde:**

$f$  = Factor de fricción (adimensional)

$L$  = Longitud de la tubería (m)

$D$  = Diámetro de la tubería (m)

$v$  = velocidad promedio del flujo (m/s)

Esta ecuación se utiliza en secciones rectilíneas largas y con tubería redonda.

**k) Factor de fricción para flujo laminar**

Para el cálculo se utiliza. (Factor de fricción para flujo laminar)

$$f_t = \frac{64}{N_R} \quad \text{Ec. 9}$$

**l) Factor de fricción para flujo turbulento**

Para el cálculo del coeficiente de fricción se utiliza la siguiente Ecuación.

$$f_t = \frac{64}{\left[ \log_{10} \left( \frac{1}{3.7(D/E)} + \frac{5.74}{N_{RE}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ec. 10}$$

**m) Rugosidad relativa**

$$\frac{D}{E} \quad \text{Ec. 11}$$

**Donde:**

E = Rugosidad del material (m)

D = diámetro de la tubería (m)

**n) Presión en la bomba**

La bomba debe vencer la resistencia en la succión y descarga, se obtiene al utilizar.

$$P_{\text{bomba}} = \rho * g * (Z_1 - Z_2) \quad \text{Ec. 12}$$

**Donde:**

$P_{\text{bomba}}$  = presión de la bomba (psi) o (lb/pl2)

$\rho$  = densidad del agua (kg/m3)

$g$  = gravedad (m/s2)

$Z_1$  = punto referencia punto 1 (m)

$Z_2$  = punto referencia punto 2 (m)

## o) Selección de la bomba por medio de la curva característica

### Paso 1: Parámetros necesarios

Los parámetros que se necesitan son:

- Caudal
- Altura de bombeo (metro de columna de agua M.C.A)
- Longitud de tubería de descarga

### Paso 2: Diámetro tubería descarga

- Para el cálculo de diámetro se considera: caudal requerido, longitud de tubería en la descarga, porcentaje de pérdidas
- Para las pérdidas de cargas se tiene que realizar con el caudal mínimo y la tubería mínima de las bombas ZM según catálogos

### Paso 3: Pérdida de altura por fricción en las tuberías (*h<sub>ft</sub>*)

$$h_{ft} = \frac{L_t * x}{100} \quad \text{Ec. 13}$$

Donde:

$L_t$  = Longitud de la tubería en (m) [26].

$x$  = coeficiente por perdida de altura por fricción en la tubería ver Tabla 8.

**Tabla 4**

*Pérdida de altura por fricción en la tubería*

| Caudal m³/h      | 0,5    | 1   | 1,5  | 2    | 2,5  | 3    | 3,5  | 4    | 4,5  | 5    |      |
|------------------|--------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Diámetro tubería | 3/4"   | 2   | 7,5  | 16   | 27   | 35   | 58   | 80   | 100  | -    | -    |
|                  | 1"     | 0,7 | 2,7  | 6    | 10   | 16   | 21,5 | 26   | 37   | 45   | 55   |
|                  | 1 1/4" | 0,2 | 0,75 | 1,6  | 2,7  | 4,5  | 6    | 8    | 10   | 12   | 15,5 |
|                  | 1 1/2" | -   | 0,22 | 0,5  | 0,8  | 1,4  | 1,8  | 2,4  | 3    | 3,7  | 4,7  |
|                  | 2"     | -   | 0,08 | 0,17 | 0,28 | 0,4  | 0,6  | 0,8  | 1,05 | 1,3  | 1,6  |
|                  | 2 1/2" | -   | -    | -    | 0,07 | 0,12 | 0,16 | 0,22 | 0,27 | 0,32 | 0,42 |
|                  | 3"     | -   | -    | -    | -    | -    | 0,05 | 0,08 | 0,1  | 0,12 | 0,15 |

**Fuente:** Recopilado de Pluspetrol, 2016.



### Altura total por perdidas

$$H_{TP} = H_T + H_{ft} \quad \text{Ec. 14}$$

#### Donde:

$H_{TP}$  = Altura total por pérdidas (m)

$H_T$  = Pérdidas totales por fricción (m)

$h_{ft}$  = Pérdida de carga por fricción (m)

#### Paso 4: Selección modelo de bomba

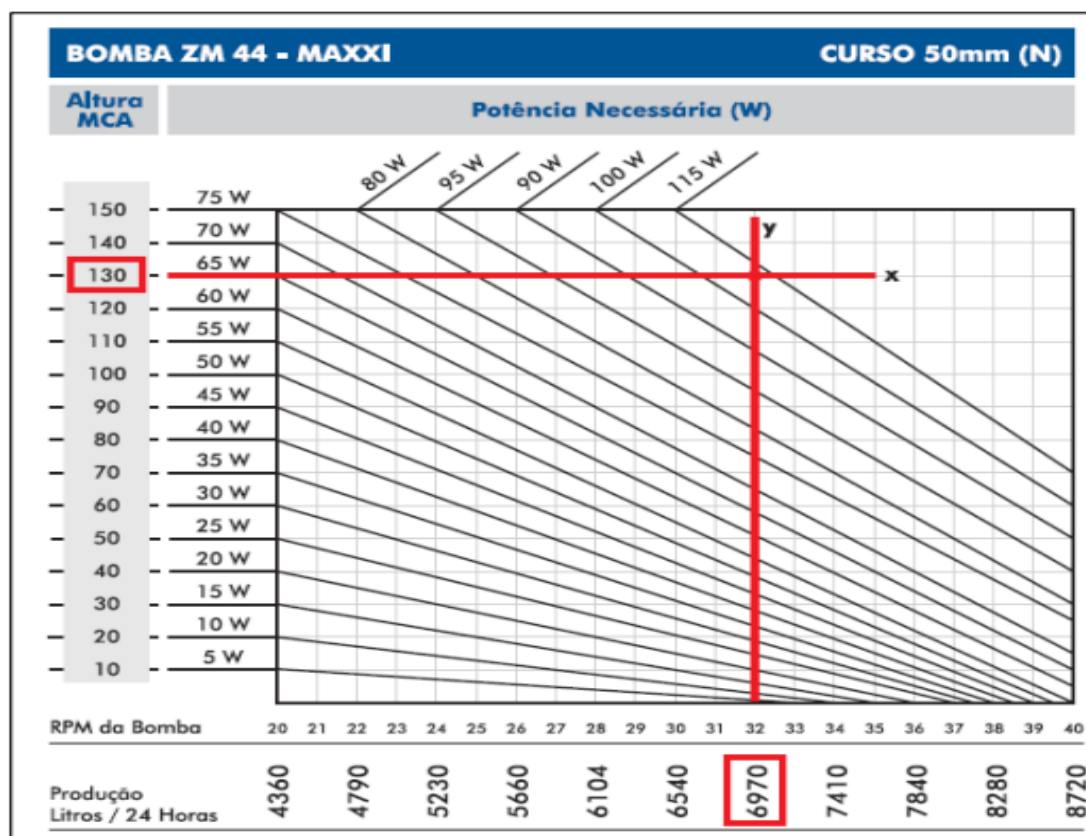
Para seleccionar el modelo de bomba, se lo realiza por medio de las curvas características, y se requiere los siguientes parámetros.

- Caudal requerido (lt/día)
- Altura de bombeo con caída de presión (MCA)

La velocidad y la potencia de la bomba se determinan por la intersección de dos líneas rectas (x, y), como se muestra en el Figura siguiente:

**Figura 12**

*Curva característica bomba ZM 44-MAXXI*



**Fuente:** Recopilado de Pluspetrol, 2016.

#### 2.1.1.4. Marco Normativo

El presente proyecto de grado estará fundamentado bajo las siguientes leyes y reglamentos:

- **DS. 28397 (Reglamento de normas técnicas y de seguridad para las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos).**

#### ARTICULO 152°

El Titular deberá cumplir las medidas de seguridad que deben adoptarse en instalaciones Hidrocarburíferas de Producción que se encuentran en las normas de seguridad API y/o NFPA, como mínimo.

## **ARTICULO 153°**

Se debe aplicar buenas prácticas técnicas de la industria que como mínimo podrán incluir las Prácticas Recomendadas por el API en las actividades que correspondan y las siguientes especificaciones que sean aplicables.

### **2.1.1.5. Marco Legal**

#### **Ley de hidrocarburos (Ley 3058)**

##### **Capítulo I: Política Nacional de Hidrocarburos y principios generales**

**Artículo 9°.** - (Política de Hidrocarburos, Desarrollo Nacional y Soberanía). El aprovechamiento de los hidrocarburos deberá promover el desarrollo integral, sustentable y equitativo del país, garantizando el abastecimiento de hidrocarburos al mercado interno, incentivando la expansión del consumo en todos los sectores de la sociedad, desarrollando su industrialización en el territorio nacional y promoviendo la exportación de excedentes en condiciones que favorezcan los intereses del Estado y el logro de sus objetivos de política interna y externa, de acuerdo a una Planificación de Política Hidrocarburífera.

**Artículo 10°.** - (Principios del Régimen de los Hidrocarburos) Las actividades petroleras se regirán por los siguientes principios:

- **Calidad:** que obliga a cumplir los requisitos técnicos y de seguridad establecidos;
- **Continuidad:** que obliga a que el abastecimiento de los hidrocarburos y los servicios de transporte y distribución, aseguren satisfacer la demanda del mercado interno de manera permanente e ininterrumpida, así como el cumplimiento de los contratos de exportación.

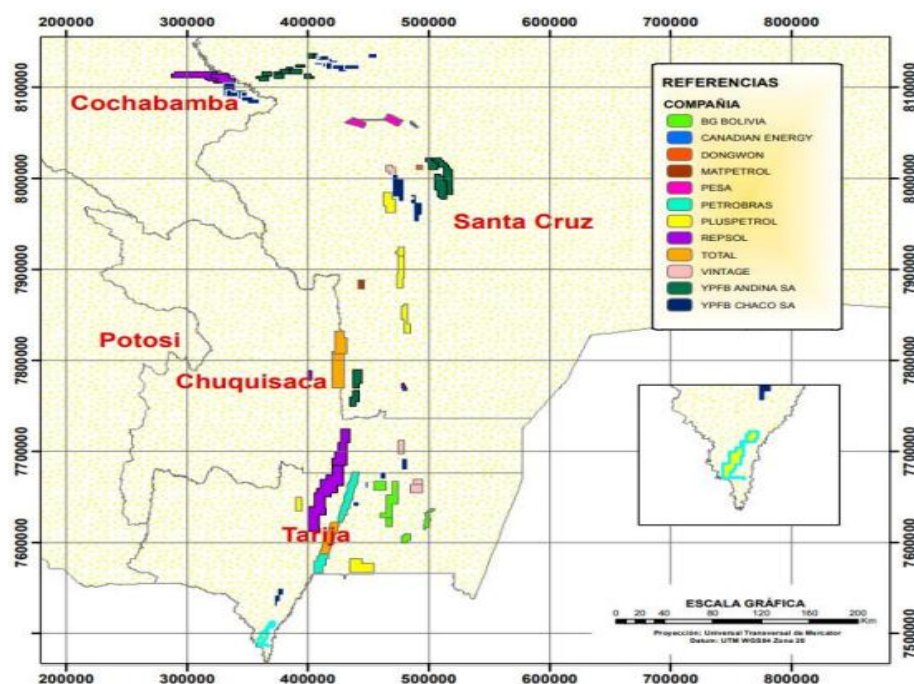
### **2.1.2. MARCO CONTEXTUAL**

#### **2.1.2.1. Ubicación**

El campo Bermejo, ubicado en la serranía Candado - Suaruro en el Subandino Sur, contribuye en forma continua a la producción nacional de petróleo para el mercado interno desde hace 88 años. (ANH, 2022)

**Figura 13**

*Campo de explotación BERMEJO - TORO*



**Fuente:** Recopilado de ANH, 2022

#### 2.1.2.2. Descripción de las Facilidades de Superficie

##### a) Batería de Producción Campo Bermejo

Situado a escasos kilómetros de la ciudad de Bermejo, comprende una planta de almacenamiento de petróleo crudo que recolecta la producción de los campos: BJO-10, BJO-7, BJO-2 y de algunos pozos marginales del campo Toro.

**Tabla 5**

*Tipo de levantamiento artificial por pozo*

| Pozo   | Sistema de Producción            | Estado |
|--------|----------------------------------|--------|
| BJO-10 | Bombeo Mecánico                  | Activo |
| BJO-7  | Bombeo Mecánico                  | Activo |
| BJO-2  | Bombeo por Cavidades Progresivas | Activo |

**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

La Batería Bermejo, cuenta con los siguientes componentes:

- Ocho tanques de almacenamiento de petróleo condensado y pesado.
- Un tanque para el almacenamiento de agua dulce
- Una pileta API para la acumulación de agua de formación y emulsión.
- Un sistema de inyección de agua de formación proveniente del purgado de los tanques de petróleo (recuperación secundaria).
- También cuenta con una línea de gas proveniente de la Planta de Gas Bermejo, la cual se convertiría en el punto de aprovisionamiento del gas requerido para la inyección al pozo BJO-10 que se encuentra a una distancia aproximada de 1 Km de terreno montañoso. (MURILLO, 2022).

**Figura 14**

*Ingreso a la batería Bermejo*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

La Planta de Gas, está situada en la Zona Arrozales que recibe la producción del pozo BJO-X44 (único pozo gasífero) para su tratamiento (separación Gas Condensado) y proveer de gas para consumo local y de la Batería de petróleo (Batería N°1 BJO).



**Figura 15**

*Vista satelital de la batería Bermejo*



**Fuente:** Elaboración propia basada en Google Maps, 2021

La producción proveniente de los pozos BJO-2, BJO-7 y BJO-10, ingresan a la batería Bermejo a través de un manifold, posteriormente su producción es almacenada en varios tanques de almacenamiento ubicados en toda la batería de producción. (MURILLO, 2022)

**Tabla 6**

*Datos operativos de los tanques de almacenamiento*

| TK   | TIPO DE FLUIDO<br>ALMACENADO | CAPACIDAD<br>(m <sup>3</sup> ) | ALTURA<br>(m) | DIÁMETRO<br>(m) |
|------|------------------------------|--------------------------------|---------------|-----------------|
| 1310 | Petróleo Crudo               | 790,15                         | 7,59          | 11,78           |
| 1311 | Petróleo Crudo               | 316,03                         | 5,01          | 9,064           |
| 1312 | Petróleo Crudo               | 315,9                          | 5,01          | 9,063           |
| 1313 | Petróleo Crudo               | 307,21                         | 4,83          | 9,07            |
| 1314 | Petróleo Crudo               | 294,84                         | 4,73          | 9,06            |
| 1315 | Petróleo Crudo               | 303,19                         | 4,9           | 9,06            |
| 1316 | Petróleo Crudo               | 296,21                         | 4,93          | 9,06            |
| 1317 | Petróleo Crudo               | 43,6                           | 2,56          | 4,69            |
| 1319 | Agua de Formación            | 27,9                           | 3,93          | 3,02            |

**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

Respecto al pozo Bermejo 2, el petróleo crudo producido es direccionado a los tanques TK-1317, TK 1313, TK 1312. (HANSA LTDA, 2021) Toda la producción almacenada, es

despachada mediante una bomba centrífuga de los tanques de almacenamiento a la manga de carga que realiza el llenado de los camiones cisternas.

**Figura 16**

*Bomba de cargado de crudo a cisternas*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

**Tabla 7**

*Especificaciones Técnicas de la bomba para cargado de petróleo crudo*

| Marca | Modelo     | Caudal                | Altura | Potencia | Rev      | Frecuencia |
|-------|------------|-----------------------|--------|----------|----------|------------|
| KSB   | RPH 50-200 | 45 m <sup>3</sup> /hr | 44 mca | 7,5 KW   | 2910 rpm | 50 Hz      |

**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

Como servicio auxiliar de la planta se cuenta con un sistema de protección contra incendios, el cual es alimentado a través de una bomba electro sumergible, la cual opera con los siguientes datos operativos:

**Tabla 8**

*Especificaciones técnicas de la bomba Electro Sumergible*

| Φpozo  | Φdesc  | Caudal                | Profundidad de asentamiento de la bomba |
|--------|--------|-----------------------|-----------------------------------------|
| 6 pulg | 3 pulg | 20 m <sup>3</sup> /hr | 144 m                                   |

**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

Cabe recalcar que la producción de la bomba es destinada para alimentar al sistema contra incendio, la cual cuenta con bomba Bipartida de la marca KSB acoplada a un motor de combustión interna de la marca NISSAN.

**Figura 17**

*Vista de la bomba Bipartida de la RCI*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

Las características de los equipos son las siguientes:

**Tabla 9**

*Especificaciones técnicas de la bomba contra incendios*

| Marca | Modelo      | $\Phi$ succ | $\Phi$ desc | Potencia | Rev      | Frecuencia |
|-------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|------------|
| KSB   | RDL 150-310 | 8 pulg      | 6 pulg      | 433 HP   | 3000 rpm | 50 Hz      |

**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

#### **b) Pozo Bermejo X-2**

El pozo Bermejo X-2, actualmente, es el de mayor antigüedad del país, llegando a producir 35 BPD con bajos cortes de gas y agua, datos obtenidos por el registro PLT (a tiempo real) realizado en abril del 2020. Para la extracción de crudo en el pozo Bermejo X2, se cuenta con una bomba del tipo Tornillo, dicha bomba transmite el movimiento rotacional por medio de una correa conectada a un motor la cual es alimentado por el gas del mismo pozo.

**Figura 18**

*Bomba de cavidades progresivas del pozo BERMEJO X2*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

**Tabla 10**

*Especificaciones técnicas de la bomba de Tornillo del pozo BJO-X2*

| Marca   | Modelo        | Profundidad | Carga Axial   | Rev   |
|---------|---------------|-------------|---------------|-------|
| NETZSCH | NDH 040 RH 33 | 800 m       | 33.000,00 lbs | 5 rpm |

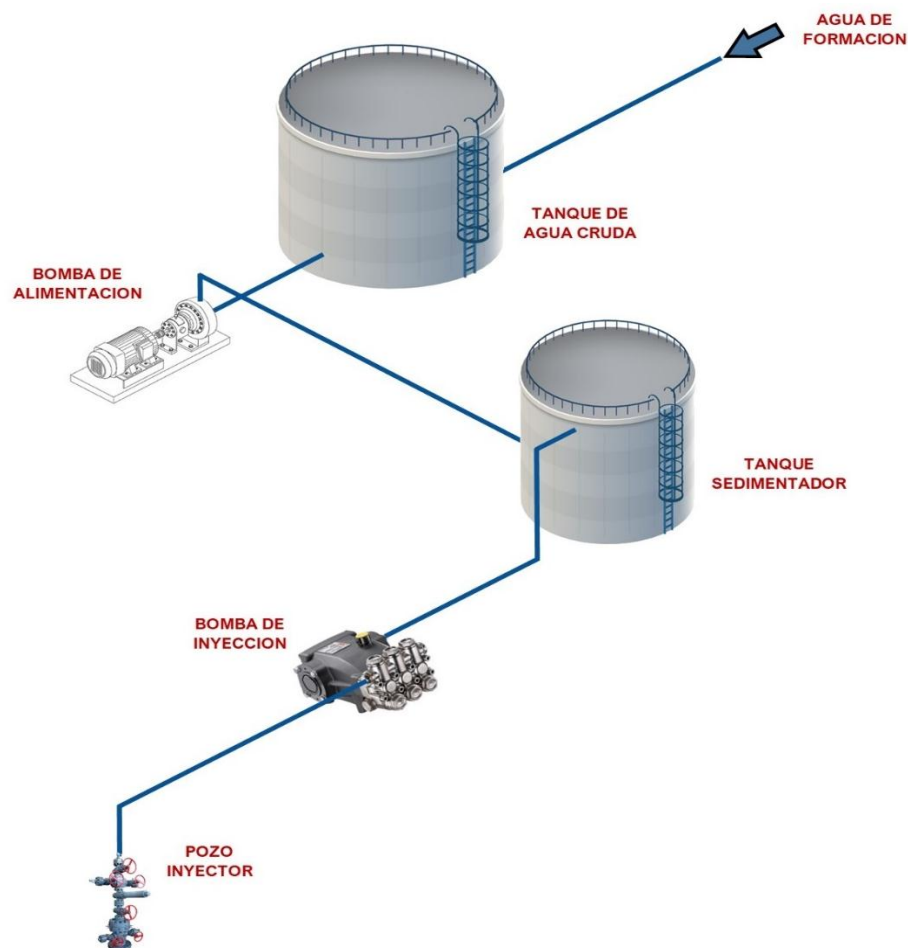
**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

#### **2.1.2.3. Planta de Tratamiento de agua para Inyección de Salmuera**

El agua de formación producida es enviada a una planta de tratamiento de agua donde se realiza la adecuación y eliminación de impurezas para la inyección.

**Figura 19**

*Planta de Tratamiento de Agua para la Inyección de Salmuera*



**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

La planta de tratamiento cuenta con las siguientes áreas operativas:

#### **Tanque de Agua Cruda**

El diseño actual del tanque de agua cruda es netamente la de un tanque de almacenamiento de agua sin ningún componente interno. La función de este tanque puede ampliarse a que, adicionalmente al almacenamiento del agua permita separar las tazas de crudo que pudiesen ingresar a la planta.



**Figura 20**

*Tanque vertical atmosférico que recolecta la producción de agua*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021



### **Tanque Sedimentador**

El agua que sale del tanque de agua cruda es direccionada al tanque sedimentador. El tanque no dispone de componentes internos en su diseño excepto un sistema de evacuación de agua en el fondo y un sistema de gas blanket en la parte superior.



### **Bombas Booster**

Para el trasvase de agua del tanque de agua cruda del tanque sedimentador se cuenta con una unidad Booster.

**Figura 21**

*Bomba Booster para la el Traslase de Salmuera*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021



## Bomba Reciprocante de Inyección

Finalmente se tienen dos corrientes de salida de la pileta API, con una línea de 3" y 2", ambas líneas se unifican en una línea de 3 pulg, a través de la cual se alimenta de agua a una bomba del tipo reciprocante que inyecta agua de formación a los pozos BJO 2 y BJO 46 con la finalidad de incrementar la presión de formación, esta bomba tiene la característica de manejar altas presiones. (HANSA LTDA, 2021).

**Figura 22**

*Bomba Reciprocante en operación*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

**Tabla 11**

*Especificaciones técnicas de la bomba Reciprocante*

| Marca | Modelo | Potencia        | Presión descarga | Presión Succión |
|-------|--------|-----------------|------------------|-----------------|
| FMC   | M 1218 | 75 HP (500 rpm) | 850 psi          | 150 psi         |

**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

El motor es del tipo de combustión interna, de la marca WAUQUESHA, la cual es accionado por el gas producido proveniente de la planta de tratamiento de gas y pozo.

**Figura 23**

*Motor de combustión interna de la bomba*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

Actualmente la bomba se encuentra con problemas de funcionamiento y desgastes internos detectados en mantenimientos programados debido a los siguientes puntos:

- Desgaste en la carcasa de la bomba debido a la presencia de Hierro.
- Vibración excesiva debido a problemas en el anillo de desgaste.
- Desalineación motor – bomba producto de cavitación en la bomba.

#### **2.1.2.4. Ducto de Transporte de Salmuera**

En la actualidad se cuenta con un ducto de acero al carbono de gran antigüedad, el cual tiene las siguientes características:

**Tabla 12**

*Longitud de las cañerías del sistema de Inyección de Agua*

| TRAMO                                | CAUDAL               | DIAMETRO | LONGITUD | P salida |
|--------------------------------------|----------------------|----------|----------|----------|
| Colector – TK Agua Cruda             | 95 m <sup>3</sup> /h | 6 pulg   | 1280 m   | -        |
| TK Agua Cruda – TK Sedimentador      | 75 m <sup>3</sup> /h | 4 pulg   | 493 m    | -        |
| TK Sedimentador – Bomba Reciprocante | 73 m <sup>3</sup> /h | 3 pulg   | 650 m    | -        |
| Bomba Reciprocante – Pozo Inyector   | 10 m <sup>3</sup> /h | 2 pulg   | 990 m    | 3500 psi |

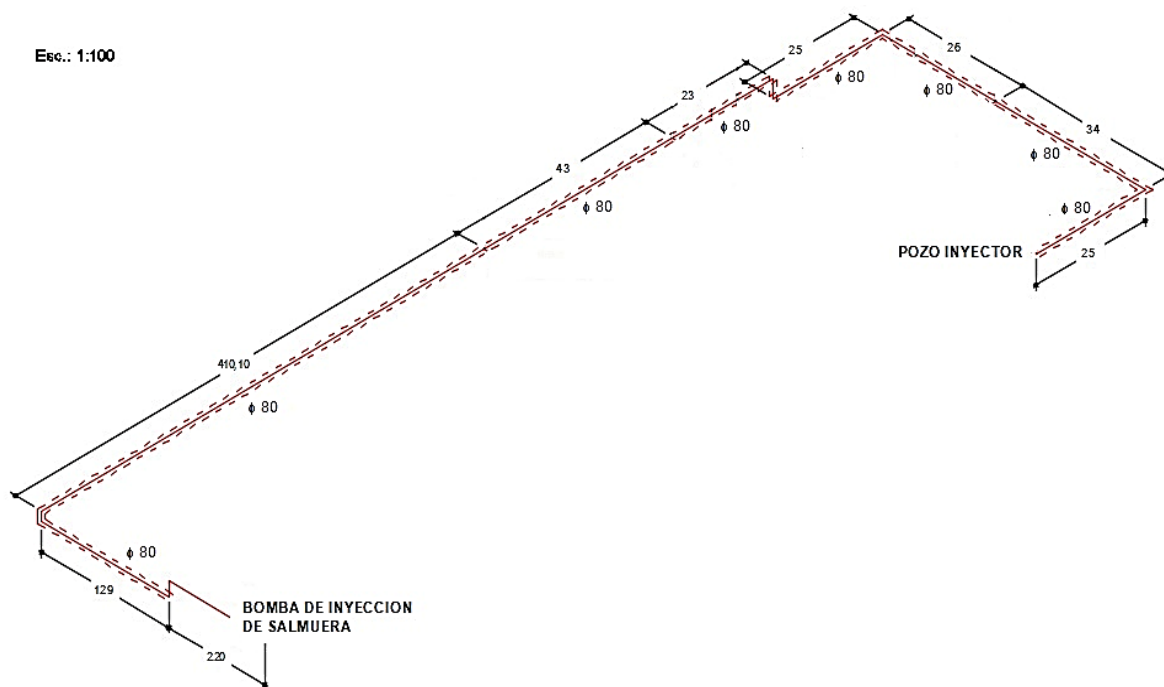
**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

Para el presente proyecto se tomará como análisis solamente el tramo de la bomba reciprocante al pozo inyector, cuya trayectoria es la siguiente:



**Figura 24**

*Línea de transporte de salmuera para inyección*



**Fuente:** Elaboración propia basada en informe HANSA LTDA, 2021

El estado mecánico de las cañerías es malo debido a un grado alto de taponamiento y a daños internos producidos por material corrosivo, como ser hierro y cloruros.

**Figura 25**

*Punto de medición de caudal de la línea de salmuera*



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

Figura 26

***Daños por corrosión en la línea de transporte de salmuera***



**Fuente:** HANSA LTDA, 2021

**2.1.2.5. Pruebas de corrosión realizadas al ducto de transporte de salmuera**

A continuación, se sistematizará la información obtenida sobre la evaluación de las cañerías realizada por medio de “**cupones de corrosión**”. Se usaron cupones de prueba los cuales tenían un tamaño de 50 mm × 10 mm × 2 mm.

**Tabla 13**

*Composición química de la muestra ensayada (% en peso)*

| ESPÉCIMEN | % CROMO   |
|-----------|-----------|
| CARBÓN    | 0.22      |
| SILICIO   | 0.29      |
| MANGANESO | 0.5       |
| AZUFRE    | 0.005     |
| CROMO     | 2.94      |
| MOLIBDENO | 0.3       |
| NÍQUEL    | 0.1 – 0.5 |

**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

Se determinó que el agua de formación tiene una alta salinidad debido al CaCl<sub>2</sub>. Los componentes y concentración de la solución corrosiva se detallan a continuación.

**Tabla 14**

*Componentes y la concentración correspondiente de los medios simulados*

| SALES             | CANTIDAD (wt %) |
|-------------------|-----------------|
| NaCl              | 14.5            |
| MgCl <sub>2</sub> | 0.6             |
| CaCl <sub>2</sub> | 3.3             |
| KCl               | 0.14            |
| SrCl <sub>2</sub> | 0.1             |

**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

**a) Matriz de prueba**

Para revelar el comportamiento de corrosión en más detalles, algunas pruebas de pérdida de peso fueron diseñadas y conducidas en términos de condiciones de campo: (1) influencia de la temperatura (2) influencia del tiempo de exposición y (3) influencia de corte de agua.

**Tabla 15**

*Condiciones experimentales de corrosión dinámica de cupones.*

| No | MUESTRA DE MATERIALES | TEMPERATURA (°C) | TIEMPO DE EXPOSICIÓN (días) | CORTE DE AGUA (WT %) |
|----|-----------------------|------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1  | Acero negro           | 45               | 7                           | 100                  |
| 2  | Acero negro           | 65               | 7                           | 100                  |
| 3  | Acero negro           | 85               | 7                           | 100                  |
| 4  | Acero negro           | 105              | 7                           | 100                  |
| 5  | Acero negro           | 85               | 14                          | 100                  |
| 6  | Acero negro           | 85               | 7                           | 20                   |
| 7  | Acero negro           | 85               | 7                           | 40                   |
| 8  | Acero negro           | 85               | 7                           | 70                   |

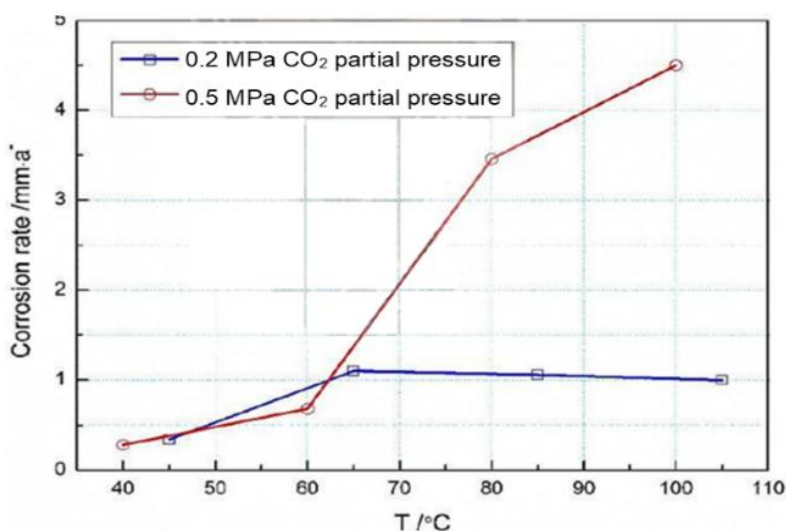
**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

**1. Influencia de la Temperatura**

Se puede encontrar que a medida que aumenta la temperatura, la velocidad de corrosión primero aumenta y luego se vuelve estable. En la primera etapa, la velocidad de corrosión asciende gradualmente con la temperatura y llega hasta el máximo de 1,14 mm / a 65 ° C. La tasa de corrosión aumenta en aproximadamente 156.4% que la probada a 45 ° C.

**Figura 27**

*Efectos de la temperatura en la velocidad de corrosión para el acero en ambientes de CO<sub>2</sub>*

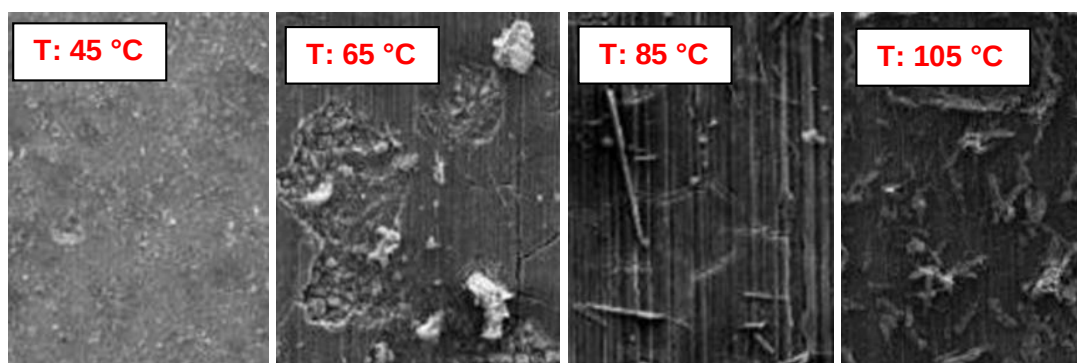


**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

La corrosión por CO<sub>2</sub> del acero se vuelve más severa con el incremento de la temperatura. Además, el producto de corrosión puede precipitar gradualmente en la superficie de los cupones al aumentar la temperatura, y se puede formar una película protectora hermética contra la corrosión por CO<sub>2</sub>. Como resultado de la precipitación del producto, la transferencia de sustancia del acero a CO<sub>2</sub> la corrosión media se vuelve parcialmente retardada y, en este caso, la velocidad de corrosión se mantiene en aproximadamente 1,0 mm / a hasta 105 ° C.

**Figura 28**

*La morfología SEM de las capas de productos de corrosión*



**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

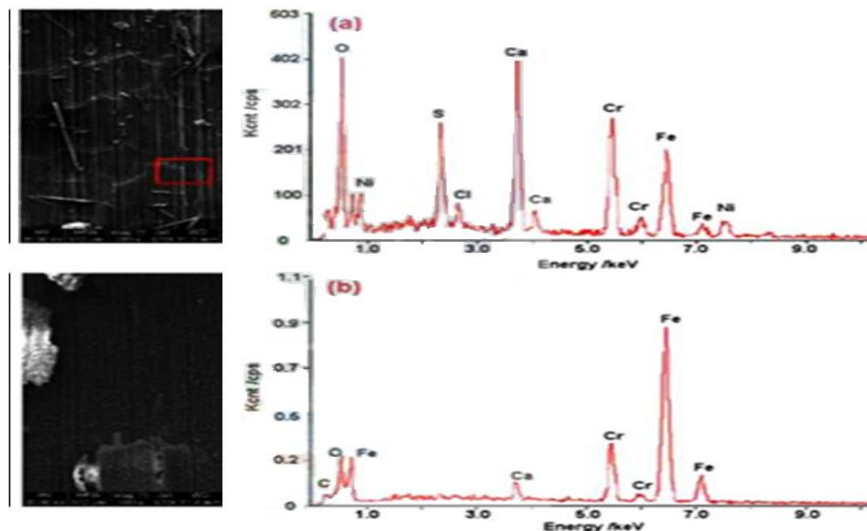
## 2. Influencia del tiempo de exposición

Se realizaron pruebas de pérdida de peso con muestras de cañerías a 85 ° C durante 7 y 14 días en el agua de inyección simulada. Se observó que las tasas de corrosión de muestras de acero corroídas durante 7 días y 14 días eran de 1,05 mm / a y 0,86 mm / a, respectivamente.

Se encontró que el contenido de Fe aumenta con el tiempo de exposición, lo que puede atribuirse a la formación de carbonato de hierro ( $\text{FeCO}_3$ ). Además, esta observación proporciona una explicación de la precipitación granular formada en la superficie de la película mencionada anteriormente.

**Figura 29**

*La morfología SEM y el análisis EDS.*



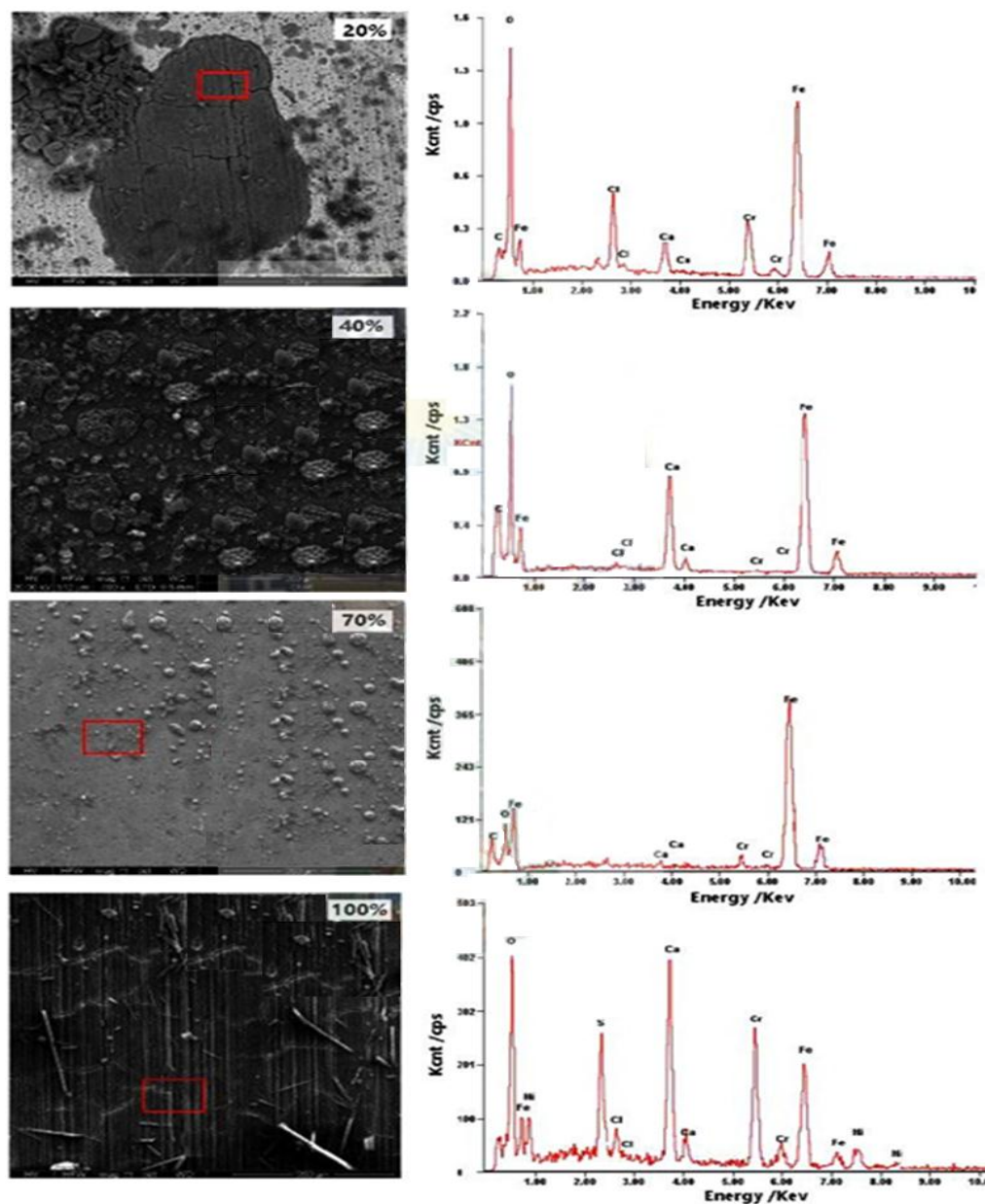
**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

## 3. Influencia del corte de agua

El contenido de hierro total en la salmuera, tiene un impacto importante en el proceso de corrosión del acero a largo de la vida operativa. Aquí, se investigó el efecto del contenido de hierro sobre la corrosión del acero. La figura siguiente presenta el cambio en la tasa de corrosión del acero en el ambiente de  $\text{CO}_2$  con una variación en el rango de 20% a 100%.

**Figura 30**

*La morfología SEM y el análisis EDS*



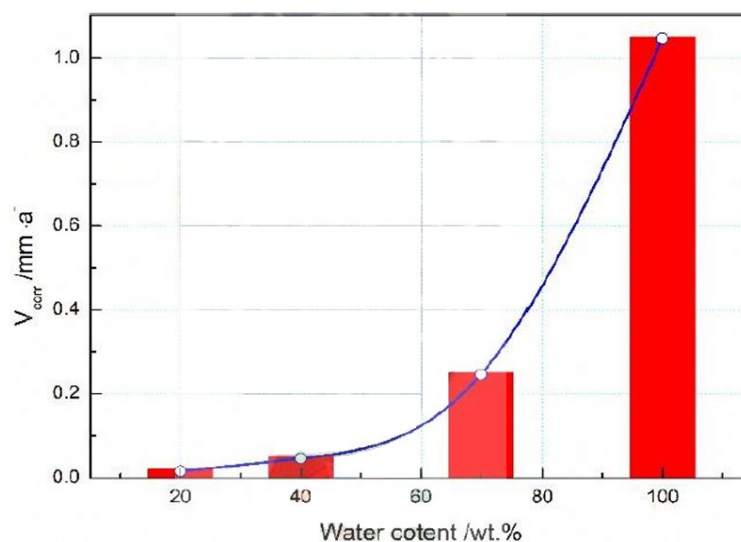
**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

En la figura anterior, se registra que la corrosión se vuelve más severa con el aumento de los cortes de agua con un alto contenido de hierro total. Cuando el corte de agua varió de 20% a 100%, la tasa de corrosión aumentó de 0.02 mm / a 1.04 mm / a, aumentando alrededor de 52 veces más bajo que el último. Por otro lado, se observó un aumento espectacular a medida que el corte de agua aumentó del 40% al 70%.



**Figura 31**

*La morfología SEM y el análisis EDS.*



**Fuente:** informe Pluspetrol, 2018

De todas las pruebas realizadas se puede concluir lo siguiente:

- El incremento de la temperatura tiene poca incidencia en la velocidad de corrosión debido a que a cierto valor se forma una capa protectora en el acero.
- La salinidad y la presencia de cloruros en el agua de formación incide de manera discreta con la velocidad de corrosión en la cañería.
- El exceso del contenido de hierro afecta de manera exponencial la velocidad de corrosión y debido a los altos valores de corrosión provocadas en el cupón de corrosión.

## **2.2. INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDO**

### **2.2.1 Descripción de los parámetros operativos**

Los parámetros operativos del ducto de transporte de salmuera serán equivalente al punto de descarga de la bomba reciprocante, es decir, se tendrá las siguientes condiciones operativas:

- **Rango de Caudal:** 12 GPM
- **Rango de Presión de descarga:** 2000 a 5000 psi
- **Presión de descarga operativa:** 3500 psi

Sobre las características del agua de formación o salmuera, se detallan las siguientes especificaciones:

**Tabla 16**

*Especificaciones de la salmuera de producción*

| No | PARÁMETRO                     | UNID.  | MÉTODO          | EQUIPO DE MEDICIÓN     | NORMA DE REFERENCIA | VALOR EN PUNTO G | LÍMITE PERM. |
|----|-------------------------------|--------|-----------------|------------------------|---------------------|------------------|--------------|
| 1  | Temperatura                   | °C     | Directa         | Oakton<br>PCTSTestr'50 | SM 2550 B           | 20               | N/D          |
| 2  | pH                            | Adim.  | Potenciométrico | Oakton<br>PCTSTestr'50 | SM 4500-H<br>B      | 7,2              | N/D          |
| 3  | Oxígeno Disuelto              | ppb    | Colorimétrico   | CHEMets<br>Visual Kit  | ASTM<br>D5543-25    | 0                | ≤10          |
| 4  | Sólidos totales en suspensión | mg/l   | Colorimétrico   | Hach DR900             | -                   | 2                | ≤10          |
| 5  | Turbidez                      | NTU    | Colorimétrico   | Hach DR900             | -                   | 2                | ≤10          |
| 6  | Aceites y grasas              | ppm    | Colorimétrico   | Hach DR900             | -                   | 0                | ≤7           |
| 7  | Bacterias Sulfato reductoras  | cfu/ml | Dilución serial | Tubos Múltiples        | API RP 38           | 0                | ≤10          |
| 8  | Bacterias Aeróbicas Totales   | cfu/ml | Dilución serial | Tubos Múltiples        | API RP 38           | 0                | ≤10          |

**Fuente:** Elaboración propia basada en (YPFB GERENCIA E&E, 2021)



A continuación, se describirá el análisis fisicoquímico del agua de formación;

**Tabla 17**

*Análisis Fisicoquímico del agua de formación*

| CATIONES                         | mg/l    | me/l    |
|----------------------------------|---------|---------|
| Sodio Na (Calc)                  | 31428,8 | 1366,47 |
| Calcio Ca                        | 235     | 11,75   |
| Magnesio Mg                      | 202     | 16,63   |
| Bario, Ba                        | 1,02    |         |
| ANIONES                          | mg/l    | me/l    |
| Cloruro, Cl                      | 494     | 1392,42 |
| Sulfato, SO <sub>4</sub>         | 8       | 0,18    |
| Hidróxidos, OH                   | 0       | 0       |
| Carbonato, CO <sub>3</sub>       | 0       | 0       |
| Bicarbonato, HCO <sub>3</sub>    | 137     | 2,25    |
| Hierro Total, Fe                 | 28,2    | 1,8     |
| Total, Sol Dis STD               | 1830    |         |
| Solidos susp                     | 24      |         |
| Turbidez                         | 10      |         |
| TPH                              | 102,63  |         |
| OTRAS PROPIEDADES                |         |         |
| Gravedad específica Med 80/80 °F |         | 1,032   |
| Resistividad Calc (ohm-m) @ 60°F |         | 2,72    |
| Salinidad equivalente, mg/l      |         |         |

**Fuente:** Elaboración propia basada en (YPFB GERENCIA E&E, 2021)

### 2.2.2. Selección de la Tubería para la conducción de Salmuera

La tubería industrial y los accesorios responden de manera diferente a las presiones internas, por ende, se tomará como referencia la norma ASTM D2837 “Método de prueba estándar para la obtención de una base de diseño hidrostático para materiales de tuberías termoplásticas o base de diseño de presión para productos de tuberías termoplásticas” con base en el diseño hidrostático (HDB) de:

- **4000 psi a 72 ° F (23 ° C) como se detalla en el PPI TR-4**
- **1000 psi a 180°F (82.2°C) como se detalla en el PPI TR-4**

Tomando en cuenta el análisis fisicoquímico del agua de formación descrito líneas arriba, se deduce que las cañerías de acero al carbono no serían una opción aconsejable para manejar el líquido debido al alto contenido de componentes corrosivos que se tiene, por ende, se tendrá que considerar tuberías plásticas del tipo reforzado, las cuales ganaron bastante popularidad en los últimos años.

De acuerdo a la siguiente clasificación extraída de la ASTM D2837 tenemos:

**Tabla 18**

*Características técnicas de materiales termoplásticos*

|                                                                         | PVC-U              | PP                  | PE                  |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Módulo de elasticidad, E (MPa)</b>                                   | >3.200             | >1.250              | >800                |
| <b>Densidad media (kg/m<sup>3</sup>)</b>                                | 1.400              | 900                 | 940                 |
| <b>Coefficiente medio de dilatación térmica lineal (K<sup>-1</sup>)</b> | 8x10 <sup>-5</sup> | 14x10 <sup>-5</sup> | 17x10 <sup>-5</sup> |
| <b>Conductividad térmica (WK<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>)</b>            | 0.16               | 1.20                | 0.36 a 0.50         |
| <b>Resistencia de superficie (ohmios)</b>                               | >10 <sup>12</sup>  | >10 <sup>12</sup>   | >10 <sup>12</sup>   |
| <b>Coefficiente de Poisson</b>                                          | 0.40               | 0.42                | 0.45                |

**Fuente:** Elaboración propia basada en (ASTM, 2022)

De acuerdo a la tabla descrita líneas arriba, se puede evidenciar que el material que cuenta con el módulo de elasticidad más elevado, es decir, que puede soportar mayor presión interna sin deformar su estructura es el PVCU o su equivalente CPVC (cloruro de polivinilo clorado)

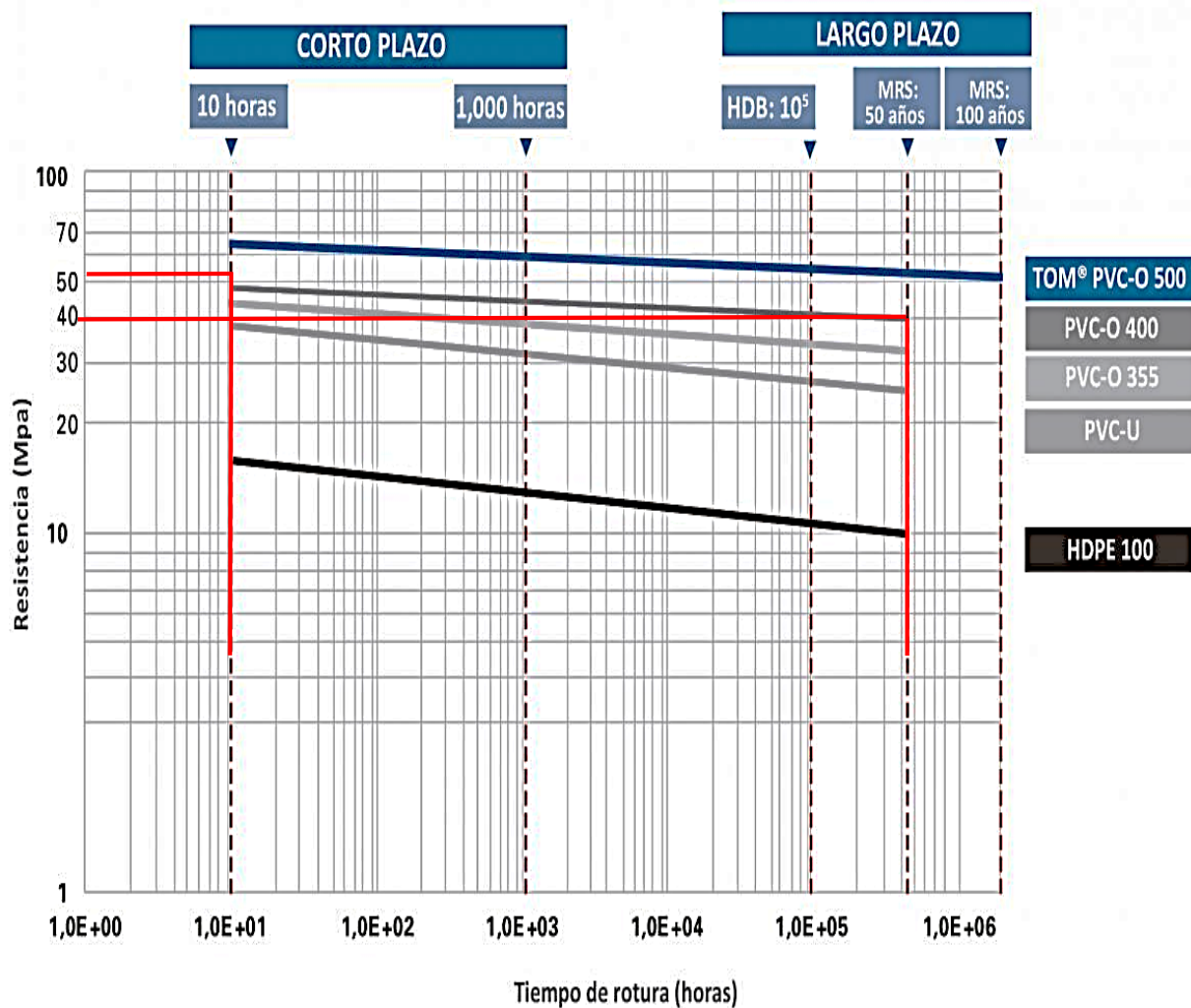
#### **2.2.2.1. Determinación de la Resistencia hidrostática a corto y largo plazo**

Según los lineamientos de la ASTM D2837, los materiales pierden propiedades mecánicas al estar sometidos durante largo tiempo a esfuerzos (LTHS). Esta característica definida como “fluencia” se manifiesta en mucho menor grado en el PVC-U (resistencia a la fatiga excepcional y una resistencia química muy buena) que, en los plásticos convencionales, lo que conlleva unas mejores propiedades a largo plazo. (ASTM, 2013)

Las características de una tubería PVC-U por encima de los 50 años como indican los ensayos a largo plazo (50 años). Eso quiere decir que la tubería puede resistir su presión nominal más allá de los 100 años, siempre y cuando no haya alteraciones en el funcionamiento de la instalación.

**Figura 1**

*Curva de regresión de Resistencia Hidrostática*



**Fuente:** Elaboración propia basada en (ASTM, 2022)

La grafica anterior nos indica que:

En 50 años, la tubería del tipo PVC-U debería perder una resistencia 13 Mpa, es decir de 38 Mpa (5.511,00 PSI) a 25 Mpa (3.625,00).

El rango de aceptación según la ASTM D2837 es:

**Tabla 19**

*Diseño Hidrostático Básico*

| Range of Calculated LTHS Values |                    | Hydrostatic Design Basis |         |
|---------------------------------|--------------------|--------------------------|---------|
| Psi                             | (MPa)              | Psi                      | (MPa)   |
| 190 to < 240                    | (1.31 to < 1.65)   | 200                      | (1.38)  |
| 240 to < 300                    | (1.65 to < 2.07)   | 250                      | (1.72)  |
| 300 to < 380                    | (2.07 to < 2.62)   | 315                      | (2.17)  |
| 380 to < 480                    | (2.62 to < 3.31)   | 400                      | (2.76)  |
| 490 to < 600                    | (3.31 to < 4.14)   | 500                      | (3.45)  |
| 600 to < 760                    | (4.14 to < 5.24)   | 630                      | (4.34)  |
| 760 to < 960                    | (5.24 to < 6.62)   | 800                      | (5.52)  |
| 960 to < 1200                   | (6.62 to < 8.27)   | 1000                     | (6.89)  |
| 1200 to < 1530                  | (8.27 to < 10.55)  | 1250                     | (8.62)  |
| 1530 to < 1730                  | (10.55 to < 11.93) | 1600                     | (11.03) |
| 1730 to < 1920                  | (11.93 to < 13.24) | 1800                     | (12.41) |
| 1920 to < 2160                  | (13.24 to < 14.89) | 2000                     | (13.79) |
| 2160 to < 2400                  | (14.89 to < 16.55) | 2250                     | (15.51) |
| 2400 to < 2690                  | (16.55 to < 18.55) | 2500                     | (17.24) |
| 2690 to < 3020                  | (18.55 to < 20.82) | 2800                     | (19.30) |
| 3020 to < 3410                  | (20.82 to < 23.51) | 3150                     | (21.72) |
| 3410 to < 3830                  | (23.51 to < 26.41) | 3550                     | (24.47) |
| 3830 to < 4320                  | (26.41 to < 29.78) | 4000                     | (27.58) |
| 4320 to < 4800                  | (29.78 to < 33.09) | 4500                     | (31.02) |
| 4800 to < 5380                  | (33.09 to < 37.09) | 5000                     | (34.47) |
| 5380 to < 6040                  | (37.09 to < 41.62) | 5600                     | (38.61) |
| 6040 to < 6810                  | (41.62 to < 46.92) | 6300                     | (43.41) |
| 6810 to < 7920                  | (46.92 to < 54.62) | 7100                     | (48.92) |

**Fuente:** (ASTM, 2013)

Lo anterior nos indica que la tubería PVC-U mantendrá una resistencia excepcional con el tiempo (50 años) lo cual garantiza que la presión interna de la tubería se mantendrá a 3550 años, por ende, cualquier fabricante de tuberías que cumpla la ASTM D2837 deberá cumplir dichos estándares de calidad y garantía.

### 2.2.2.2. Cálculo de la Presión en la tubería

Para definir la clasificación de presión de una tubería, el diámetro de la tubería y el grosor de la pared también deben tenerse en cuenta. La siguiente ecuación se utilizarán para relacionar la tensión y presión. (ASTM, 2013)

$$S = P \frac{(D-t)}{2t} \quad \text{ó} \quad S = P \frac{(d+t)}{2t} \quad \text{Ec. 15}$$

#### Dónde:

S = Estrés (Leído de la Tabla No 2.19)

P = Presión

D = Diámetro exterior promedio

d = Diámetro interior promedio

t = Espesor de pared mínimo (valor estandarizado, para 3" es igual a 0,337")

Reemplazando valores, tenemos:

$$3550 \text{ psi} = P * (3" - 0.337") / (2 * 0.337")$$

$$P = 324 \text{ psi} \approx 320 \text{ psi (valor referencial a } 73^{\circ}\text{F)}$$

El valor derivado de esta fórmula es la clasificación de presión que verá impresa en el costado de una tubería. Se basa en el rendimiento de la tubería a 73 ° F (25°C) en una aplicación de agua.

### 2.2.2.3. Selección del tipo de Tubería

Tomando en cuenta una marca referencial conocida en el mercado nacional (Tigre Plasmar) seleccionamos el tipo de tubería adecuado que cumpla los estándares para presiones elevadas:

**Tabla 20***Características técnicas de materia*

| Diámetro nominal | Código | Código nuevo | Diámetro externo mínimo (mm) | Espesor de pared mínimo (mm) | Barras por paquete | TRABAJO (bar) | Presión       |                |
|------------------|--------|--------------|------------------------------|------------------------------|--------------------|---------------|---------------|----------------|
|                  |        |              |                              |                              |                    |               | PRUEBA* (bar) | ROTURA** (bar) |
| CLASE INDUSTRIAL |        |              |                              |                              |                    |               |               |                |
| 1.1/2"           | TSGS05 | 10677112     | 48.1                         | 3.7                          | 5                  | 272.8         | 274           | 277            |
| 2"               | TSGS06 | 106772000    | 60.2                         | 3.9                          | 1                  | 269.3         | 279           | 311.0          |
| 2.1/2"           | TSGS07 | 10677212     | 72.8                         | 5.2                          | 1                  | 260.7         | 263           | 266.9          |
| 32               | TSGS08 | 10677300     | 88.7                         | 5.7                          | 1                  | 247.9         | 267           | 317.9          |

**Fuente:** (TIGRE PLASMAR, 2021)

La tubería seleccionada soporta una presión de 248 Bar (3597 psi) y especifica una presión de rotura de 317 Bar (3957 psi), lo cual brinda un factor de seguridad del 30% aproximadamente. Por otro lado, tomando en cuenta la longitud total que existe desde la bomba reciprocante hacia el pozo inyector (990 m) y considerando que la longitud total de cada barra es de 6 m, el número de barras que se debería adquirir sería de 165 barras, pero si consideramos un 10% de seguridad se debería comprar 182 barras de tubería.

### 2.2.3. Recambio de la bomba Reciprocante

#### 2.2.3.1. Selección de los materiales de la Bomba

Del análisis fisicoquímico del agua, resalta que la cantidad de cloruros y Hierro es grande, los cuales se caracteriza por ser altamente corrosivos. Por ende, los materiales seleccionados para la bomba, deben ser aptos para soportar la corrosión y la presión a la que están sometidos. (YPFB GERENCIA DE EXPLORACION & EXPLOTACION, 2020) Por lógica básica, el material seleccionado deberá ser acero inoxidable de muy alta calidad. Tomando en cuenta la velocidad de corrosión y de acuerdo con la figura 19, tiene que:

**Tabla 21***Tolerancias por corrosión en aceros*

| <b>Tolerancias por corrosión para tuberías de acero (3)</b> |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Clasificación</b>                                        | <b>Tolerancia<br/>por corrosión</b> | <b>Ejemplos</b>                                                                                                                                                                                                                                 |
| No corrosivo                                                | 0" (0mm)                            | Aire, nitrógeno, hidrocarburos anhidridos                                                                                                                                                                                                       |
| Medianamente<br>corrosivo                                   | 1/16" (1.5mm)<br>1/8" (3mm)         | Tratamiento de agua enfriamiento, vapor, hidrocarburos<br>húmedos                                                                                                                                                                               |
| Moderado<br>Severo                                          | 1/4" (6.4mm)                        | Gases agresivos húmedos, agua de servicio, lean aminas,<br>álcalis<br>Agua airada, ricas en aminas, CO2 húmedo a temperatura<br>ambiente, sulfuros o sulfitos calientes (<500°F), sales<br>húmedas, corrosivo deadlegs, vapor caliente (<100°F) |

**Fuente:** Catalogo Gardner Denver, 2022

La velocidad de corrosión para fluidos con presencia de sales disueltas, la velocidad de corrosión es considerada como severa, es decir la tolerancia por corrosión es de 6,4 mm.

Según la norma ASTM-48, tomando en cuenta el número de PREN:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + (3,3 \times \% \text{Mo}) + (16 \times \% \text{N})$$

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \times (\% \text{Mo} + 0,5\% \text{W}) + 16 \times \% \text{N}$$

Para fluidos altamente corrosivos, el valor deberá ser aproximadamente de 40. Para estas aplicaciones, generalmente se hace uso de bombas con material de Titanio, Astor C, acero dúplex S31803 (2205), 316L etc. Para el presente proyecto, tomando en cuenta aspectos técnico-económicos, se seleccionó un acero SAF 2205 (Acero Dúplex). (MURILLO, DESCRIPCION CAMPO BERMEJO, 2022)

**Tabla 22***Valores PREN para diferentes tipos de acero*

| TIPO DE ACERO                     | CROMO %   | MOLIBDENO % | NITRÓGENO % | PREN      |
|-----------------------------------|-----------|-------------|-------------|-----------|
| <b><i>Aceros Ferríticos</i></b>   |           |             |             |           |
| 430                               | 16,0-18,0 | NS          | NS          | 16,0-18,0 |
| 434                               | 16,0-18,0 | 0.9-1.4     | NS          | 19,0-22,6 |
| 441                               | 17.5-18.5 | NS          | NS          | 17.5-18.5 |
| 444                               | 17,0-20,0 | 1.8-2.5     | 0.030 MÁX.  | 23,0-28,7 |
| <b><i>Aceros austeníticos</i></b> |           |             |             |           |
| 304                               | 17.5-19.5 | NS          | 0,11 máx.   | 17.5-20.8 |
| 304LN                             | 17.5-19.5 | NS          | 0,12-0,22   | 19.4-23.0 |
| 316/316L                          | 16.5-18.5 | 2.0-2.5     | 0,11 máx.   | 23.1-28.5 |
| 316L (2,5% min Mo)                | 17,0-19,0 | 2.5-3.2     | 0,11 máx.   | 25.3-30.7 |
| 316LN                             | 16.5-18.5 | 2.0-2.5     | 0,12-0,22   | 25,0-30,3 |
| 904L                              | 19,0-21,0 | 4.0-5.0     | 0,15 máx.   | 32,2-39,9 |
| Sanicró 28                        | 24,0-26,0 | 3.0-4.0     | 0,11 máx.   | 35,9-43,0 |
| 254SMO                            | 19.5-20.5 | 6.0-7.0     | 0,18-0,25   | 42.2-47.6 |
| 1925hMo                           | 19,0-21,0 | 6.0-7.0     | 0,15-0,25   | 41.2-48.1 |
| 4565S                             | 24,0-26,0 | 4.0-5.0     | 0,30-0,60   | 42,0-52,1 |
| <b><i>Aceros dúplex</i></b>       |           |             |             |           |
| 2202                              | 22.0      | 0.4         | 0.20        | 26.5      |
| 2101LDX                           | 21,0-22,0 | 0.1-0.8     | 0,20-0,25   | 24.5-28.6 |
| SAF 2304                          | 22,0-24,0 | 0.1-0.6     | 0,05-0,20   | 23.1-29.2 |
| SAF 2205                          | 21,0-23,0 | 2.5-3.5     | 0,10-0,22   | 30.8-38.1 |
| SAF 2507                          | 24,0-26,0 | 3.0-4.0     | 0,24-0,35   | > 40      |
| Cero 100                          | 24,0-26,0 | 3.0-4.0     | 0,20-0,30   | > 40      |
| Ferrinox 255                      | 24,0-26,0 | 3.0-4.0     | 0,20-0,30   | > 40      |

**Fuente:** Multisteel, 2021**2.2.3.2. Selección de la Bomba**

Tomando como referencias los parámetros anteriormente descritos, seleccionamos un equipo de la marca BAOJI, debido a que son bombas muy usadas en el mercado nacional e internacional.



**Tabla 23**

*Modelos de Bombas Reciprocantes de la marca BAOJI*

| Modelo  | Flujo de<br>descarga | Max presión<br>descarga, PSI |
|---------|----------------------|------------------------------|
| 3B7.5   | 1.8~20.7             | 3625                         |
| 3ZB18.5 | 4.4~44               | 3625                         |
| 3ZB37   | 4~61.6               | 4567.5                       |
| 3ZB55   | 8.8~118.8            | 5800                         |
| 3ZB90   | 11~167.2             | 7250                         |
| 3ZB160  | 28.6~264             | 7250                         |
| 3ZB250  | 41.8~426.8           | 7250                         |

**Fuente:** (BAOJI, 2023)

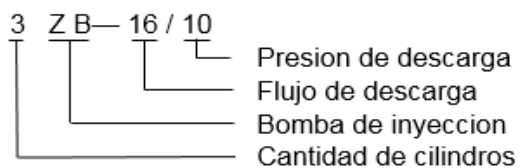
El modelo seleccionado será:

### **Plunger Pump 3ZB-18.5**

Cabe resaltar que dentro del equipo se Incluye accesorios de bomba, herramientas aleatorias, acumulador anticorrosión, válvula de seguridad anticorrosiva, etc.

Otras características a considerar son las siguientes:

-  **Norma de Diseño:** cumple con la API674 y GB/T9234
-  **Medio de Transmisión:** Agua de formación
-  **Temperatura del medio:** ≤80
-  **Aplicación:** Para Inyección de Agua en Yacimiento Petrolero
-  **Código Descripción:**





**Los parámetros operativos serán los siguientes:**

- ✓ **Flujo de descarga:** 13,63 m<sup>3</sup>/h
- ✓ **Presión:** 24,5 MPa.
- ✓ **Medio:** Fluido corrosivo

#### **2.2.3.3. Metalúrgica de la Bomba:**

Dando cumplimiento al análisis realizado líneas arriba, la bomba debería tener las siguientes características:

- ✓ **Cabezal de la bomba:** Acero inoxidable bidireccional 2205
- ✓ **Embolo de bomba:** Émbolo de cerámica
- ✓ **Émbolo:** acero inoxidable + émbolo de aleación a base de níquel.
- ✓ Gabinete de control inversor de 132Kw, el control el gabinete está instalado en el patín de la bomba; incluye flujo, detección de presión y temperatura; sobrepresión y protección contra desbordamiento

De esta manera garantizaríamos que la calidad del agua de formación no afecte las condiciones operativas del sistema de inyección

#### **2.2.3.4. Cálculo de la potencia entregada por la bomba**

Empleando la siguiente fórmula para determinar la potencia entregada por un equipo:

$$\text{HHP} = \text{Caudal (BPM)} \times \text{Presión (psi)} \times 0.0245 \quad \text{Ec. 16}$$

Tomando en cuenta los siguientes puntos de operación requeridos, los cuales fueron extraídos de la placa de identificación de la bomba, se tienen:

- Caudal: 1400 – 1600 Bbls/día = 1,11 BPM = 47 GPM
- Presión: 5000 psi.

$$\text{HHP} = 1,11 \text{ (BPM)} \times 5000 \text{ (psi)} \times 0,0245$$

$$\text{HHP} = 136 \text{ HP}$$

Los datos del motor con el que cuentan en la planta Bermejo son los siguientes:

**Tabla 24**

*Especificaciones del motor a gas de la bomba reciprocante*

|                     |                                                                                                              |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Brand/Model:</b> | <b>Waukesha VRG-155U</b>                                                                                     |
| <b>Description:</b> | Used Waukesha VRG-155U with following features: • 29 HP • 2000 RPM • 4 Cylinder • Dims (48"L x 39" W x 40"H) |
| <b>HP:</b>          | 139                                                                                                          |
| <b>RPM:</b>         | 2200                                                                                                         |

**Fuente:** Elaboración basada en (HANSA LTDA, 2021)

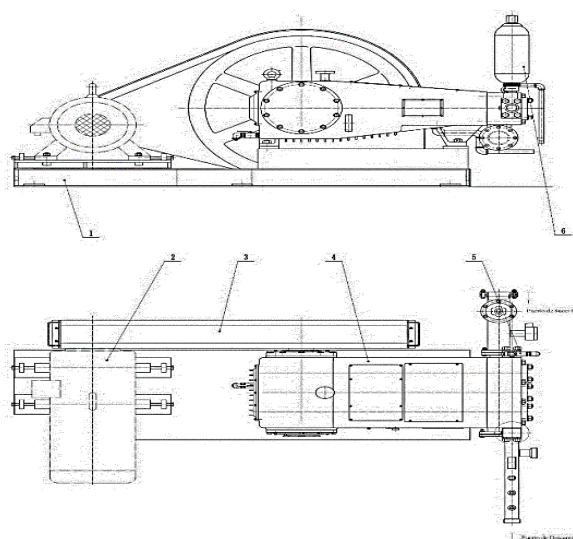
Lo cual indica que, por el momento, el motor con el que cuentan actualmente podría satisfacer el accionamiento de la bomba nueva seleccionada, y se procedería a la adecuación y armado de la bomba nueva con el motor antiguo más la construcción de una nueva base, de esa manera reduciríamos de manera considerable el costo evitando la compra de un nuevo.

#### 2.2.3.5. Esquema final de la instalación:

Tomando en cuenta la bomba seleccionada, las características del motor y el sistema de acople sugerido, es que elaboramos un esquema tentativo sobre la instalación del conjunto bomba-motor.

**Figura 32**

*Esquema final propuesto para la bomba de inyección de salmuera*



**Fuente:** Elaboración basada en (BAOJI, 2023)

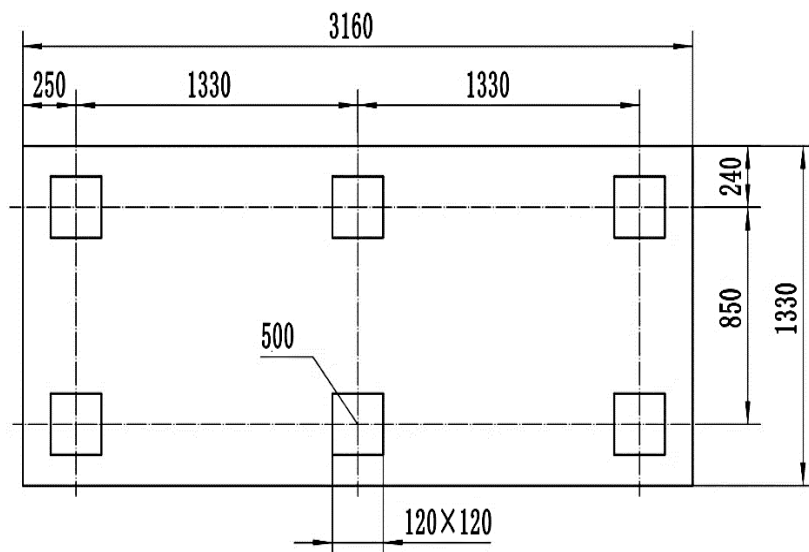
Donde:

- 1 Base Metálica
- 2 Motor de accionamiento
- 3 Par de Transmisión por correa
- 4 Conjunto de la Bomba
- 5 Válvula de Seguridad
- 6 Acumulador de Presión

Por otro lado, al acoplar la bomba nueva con el motor antiguo, se tendrá que hacer una base estructural, de manera que ambos equipos queden operando de manera óptima.

**Figura 33**

*Esquema final propuesto para la instalación de la base estructural*



**Fuente:** Elaboración basada en (BAOJI, 2023)

#### 2.2.4. Estimación de costos del proyecto

El cálculo del costo del presente proyecto será desglosado de la siguiente manera:

### 2.2.4.1. Costos de la provisión equipos

**Tabla 25**

*Costos por la provisión de los equipos*

| ITEM       | Descripción del ITEM                          | Unidad | Cantidad | Precio Unit.<br>USD | Precio Total<br>Bs | Precio Total<br>USD |
|------------|-----------------------------------------------|--------|----------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1          | Bomba Plunger Pump<br>3ZB-18.5<br>(eje libre) | GBL    | 1        | 133.550,00          | 929.508,00         | 133.550,00          |
| 2          | Tubería 3" PVC-U SCH<br>80                    | pza    | 182      | 282,00              | 357.215,04         | 51.324,00           |
| Total, USD |                                               |        |          |                     |                    | 184.874,00          |

**Fuente:** Elaboración propia basada en (Alcoba, 2023)

### 2.2.4.2. Costos por el acoplamiento de la Bomba al Motor a Gas de Pozo

**Tabla 26**

*Costos por la provisión de los equipos*

| ITEM       | Descripción del ITEM                                            | Unidad | Cantidad | Precio Unit.<br>USD | Precio Total<br>Bs | Precio Total<br>USD |
|------------|-----------------------------------------------------------------|--------|----------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1          | Análisis de estrés realizado al<br>Conjunto Bomba-Motor         | GBL    | 1        | 2.350,00            | 16.356,00          | 2.350,00            |
| 2          | Construcción de base metálica<br>estructural                    | GBL    | 1        | 2.642,00            | 18.388,32          | 2.642,00            |
| 3          | Construcción del sistema de<br>transmisión por medio de correas | GBL    | 1        | 2.986,50            | 20.782,56          | 2.986,50            |
| 4          | Servicio de alineado del conjunto<br>Bomba-Motor                | GBL    | 1        | 650,00              | 4.524,00           | 650,00              |
| 5          | Puesta en marcha de la<br>instalación                           | GBL    | 1        | 580,00              | 4.036,8            | 580,00              |
| Total, USD |                                                                 |        |          |                     |                    | 9.208,5,00          |

**Fuente:** Elaboración propia basada en (Alcoba, 2023)

### 2.2.4.3. Costos Mecánicos por la instalación de Tuberías

**Tabla 27**

*Costos por la instalación de Tubería PVC-U*

| ITEM       | Descripción del ITEM                                                                                  | Unidad | Cantidad | Precio Unit.<br>USD | Precio Total<br>Bs | Precio Total<br>USD |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|----------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 1          | Costos por electro<br>fusión para tubería de 3<br>pulg. (incluye soportaría<br>y armado de Data-book) | GBL    | 182      | 65,00               | 82.336,8           | 11.830,00           |
| 2          | Prueba de certificación<br>Hidráulica                                                                 | GBL    | 1        | 818,00              | 5.693,28,00        | 818,00              |
| Total, USD |                                                                                                       |        |          |                     |                    | 12.648,00           |

**Fuente:** Elaboración propia basada en (Alcoba, 2023)

**Costo Total (USD) =** 184.874,00 + 9.208,5,00 + 12.648,00

**Costo Total (USD) =** 206.730,5

## 2.3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### 2.3.1. Análisis de resultados

Tomando en cuenta el alto contenido de contaminantes que tiene el agua de formación y el daño irreversible que ocasionó a las cañerías de transporte y al equipo de bombeo se sugirió hacer el cambio del tipo de tubular en lo que concierne a la línea de transporte y al material de la bomba de inyección.

En lo que respecta a la línea de transporte, se sugiere el cambio de tubular por otro que no sea propenso a la corrosión y que cumple estándares de calidad dentro del rubro petrolero, es decir tuberías CPCV, este tipo de tubería es de mayor fácil en su instalación y minimiza los trabajos de mantenimiento, por lo cual se constituiría en la mejor opción para conducir la salmuera en la actualidad.

Por otro lado, referente a la bomba reciprocante, se propuso el cambio de dicha bomba tomando en cuenta la calidad del agua, por lo cual, el material constructivo del equipo debería ser mínimamente acero dúplex, este tipo de acero garantizaría una vida útil de 20 años. Muy

importante resaltar también que se sugiere mantener el motor a gas natural con el que actualmente cuentan debido a que se encuentra en condiciones operativas aceptables ya que este componente no entra en contacto con la salmuera. De igual manera se sugiere realizar el acople de la bomba motor mediante una transmisión por correa y tomando en cuenta la construcción de una base metálica que considere las altas cargas y esfuerzos a los cuales se verá sometido.

### CAPITULO III: CONCLUSIONES

-  Se realizó una descripción de la Batería Bermejo, la cual hasta la fecha es uno de los campos con mayor antigüedad en el país, actualmente produce petróleo crudo y gas natural, el primero es enviado a la refinería Guillermo Elder Bell de la ciudad de Santa Cruz y en lo que respecta a la producción de gas es la materia prima para la generación de electricidad y consumo doméstico, comercial e industrial de la ciudad de Bermejo.
-  Tomando en cuenta el valor de presión elevado con el que la salmuera será despachado de la bomba reciprocante, se seleccionó un tipo de tubería que cumpla los estándares de la norma ASTM D2837, es decir tubería “PVC-U”, el cual es una tubería multicapa ideal para trabajar con líquidos corrosivos y el rango de presión de trabajo interno es elevado.
-  Se seleccionó un fabricante de tuberías con presencia en el mercado nacional (Tigre Plasmar). Muy importante resaltar que la producción de este tipo de tubería implica un determinado tiempo de entrega y el costo es mucho más elevado que una tubería convencional.
-  De acuerdo a la calidad del agua de formación y aplicando el método PREN, se determinó que el material constructivo de la bomba reciprocante deberá ser mínimamente acero inoxidable “Super Dúplex”
-  Se realizó la selección de una bomba reciprocante en “eje libre” del fabricante BAOJI, el cual tiene gran presencia en el mercado mundial con la fabricación de equipos de acuerdo a los estándares de la norma API 673. Cabe resaltar que dicha bomba será acoplada al motor a gas natural con el que cuentan actualmente y se realizara un acoplamiento mediante transmisión por correa, de esta manera realizando un análisis de estrés se garantizaría la correcta operación de unidad de inyección de salmuera.
-  El costo de inversión total para el presente trabajo asciende a 206.730,5 USD, precio que incluye las obras civiles, mecánicas y eléctricas. Dicho monto se considera accesible para la empresa y puede ser inscrito en el programa operativo anual.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcoba, Y. C. (2023). Jefa de Proyectos Multisteel Bolivia. (R. A. Llanos, Entrevistador)
- ANH. (2012). REGLAMENTO PARA CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE PLANTAS DE ALMACENAJE DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS. ANH.
- ANH. (2022). <https://www.anh.gob.bo/>. Obtenido de <https://www.anh.gob.bo/w2019/contenido.php?s=5&O=1401>
- API. (2014). API 2610. Washington D. C.: API.
- API 610. (2021). Centrifugai Pumps for Petroleum Petrochemical, and Natural Gas Industries. Washington D. C.: API.
- Bracho, J. (2021). ESTACIONES DE FLUJO. MARACAIBO: INSTITUTO UNIVERSITARIO POLITECNICO "SANTIAGO MARIÑO".
- CORZAN. (2023). MATERIAL & PIPING SOLUTIONS. MEXICO: CORZAN.
- E. Luna, M. (3 de Julio de 2006). Guia para la Seleccion de Válvulas de Retención.
- ENERGY & COMMERCE. (2023). ENERGY & COMMERCE. Obtenido de <https://energyandcommerce.com.mx/>
- HANSA LTDA. (2021). INFORME RELEVAMIENTO CAMPO BERMEJO. SANTA CRUZ.
- HANSA LTDA. (2022). CATALOGO HIMOINSA. LA PAZ - BOLIVIA.
- KSB . (2022). BOMBAS RPH. FRANKENTHAL: KSB.
- López, J. E. (2001). Manual de instalaciones de GLP. Madrid - España: CEPESA ELF GAS, S.A.
- MULTISTEEL. (2022). CATALOGO BOMBAS RSA. SAU PAULO: MULTISTEEL.
- MURILLO, J. A. (2022). DESCRIPCION CAMPO BERMEJO. (J. C. VILLCA, Entrevistador)
- PAZ, F. S. (1993). MANUAL PARA SELECCION Y DISEÑO DE BOMBAS. CALI - COLOMBIA.
- Pefow Equipamientos S.A. (2005). Manuel de Equipos Pefow. Buenos Aires.

QUILUMBA, F. R. (2018). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA IMPULSAR. QUITO - ECUADOR: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.

SAGREDO, M. A. (2011). IMPLEMENTACION DE GAS LIFT EN EL POZO BERMEJO. SUCRE, CHUQUISACA, BOLIVIA.

Viejo Zubicaray, M. (2001). Bombas: Teoría, diseño y aplicaciones. a: b.

WEG. (2021). MOTORES ELECTRICOS. RIO DE JANEIRO: WEG.

YPF. (2011). Manual de Operaciones y Mantenimiento en Aeroplantas. BUENOS AIRES: YPF.

YPFB AVIACION. (2023). INFORME TECNICO ANUAL. SANTA CRUZ : YPFB AVIACION.

YPFB Corporación. (2012). YPFB Corporación. Recuperado el 4 de abril de 2012, de La Industria del Petróleo y del Gas: <http://www.ypfb.gob.bo>

YPFB CORPORACION. (2022). YPFB. Obtenido de YPFB:  
<https://www.ypfb.gob.bo/es/informacion-institucional/noticias/706-pozo-bjo-x2-afort%C3%B3m%C3%A1s-de-778-mil-barriles-de-petr%C3%B3leo-en-74-a%C3%B1os-de-producci%C3%B3n-continua.html#:~:text=En%20la%20actualidad%20el%20pozo,reservorios%20someros%20del%2>

ANEXOS